

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

APLICAÇÃO DE TÉCNICAS DE EMISSÃO ACÚSTICA NA MONITORAÇÃO DO  
DANO ESTRUTURAL

por

Gabriel Birck

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

Porto Alegre, julho de 2013.

APLICAÇÃO DE TÉCNICAS DE EMISSÃO ACÚSTICA NA MONITORAÇÃO DO  
DANO ESTRUTURAL

por

Gabriel Birck

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

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Thamy Cristina Hayashi  
Coordenadora do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Mecânica dos Sólidos**

Orientador: Prof. Dr. Ignacio Iturrioz

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Jakson Manfredini Vassoler

Prof. Dr. Juan Pablo Raggio Quintas

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Leticia Fleck Fadel Miguel

Porto Alegre, 03 de julho de 2013.

Dedico esse trabalho aos meus pais, Erni e Rose,  
que sempre me apoiaram e tornaram possível  
esta realização e ao meu irmão, Guilherme.

## AGRADECIMENTO

Em primeiro lugar, agradeço ao Prof. Dr. Ignacio Iturrioz, pelos ensinamentos e pelo apoio durante toda a minha formação.

Ao colega Lisandro Maders pela ajuda prestada durante o desenvolvimento desse trabalho.

Aos meus pais, Erni e Rose, agradeço por todo o apoio e compreensão durante todos esses anos e também por vocês serem um constante exemplo na minha vida, por tudo que já me ensinaram.

A todos os meus amigos, que de alguma forma estiveram comigo, em algum momento, durante todos esses anos, muito obrigado por tornarem essa jornada mais divertida.

Ao Grupo de Mecânica Aplicada (GMAp) do Departamento de Engenharia Mecânica da UFRGS, pela disponibilidade dos equipamentos de medição.

*"No que diz respeito ao empenho, ao compromisso, ao esforço, à dedicação, não existe meio termo. Ou você faz uma coisa bem feita ou não faz."*

*Ayrton Senna*

*"Faça o que é certo e faça bem feito, sem esperar reconhecimento"*

*Erni J. Birck*

BIRCK, G. **Aplicação de técnicas de emissão acústica na monitoração do dano estrutural**. 2013. 29f. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

## **RESUMO**

As técnicas de emissão acústica tiveram um avanço significativo na última década na monitoração do dano tanto em estruturas geometricamente complexas, como plantas industriais, como no estudo da resposta intrínseca de materiais heterogêneos. Essencialmente a técnica de emissão acústica consiste na medição das ondas elásticas que diferentes mecanismos de ruptura produzem no sólido quando este é excitado mecanicamente. Dentro deste escopo é que se desenvolve este trabalho, com o objetivo de correlacionar o sinal de emissão acústica com parâmetros que ajudem a monitorar os danos causados na estrutura. Para este estudo, foram realizados ensaios experimentais em duas vigas de poliestireno expandido (Isopor), uma com pré-trinca e a outra sem. Também foi realizada uma análise numérica de uma amostra, através do Método de Elementos Discretos, com o objetivo de comparar os resultados. O processamento dos dados experimentais obtidos permitiu alcançar resultados coerentes tanto no cálculo de índices globais para monitorar o tipo de dano esperado, como na determinação de modos de falha e localização na análise de eventos isolados. Resultados preliminares da simulação de um dos ensaios também mostraram as possibilidades desta ferramenta.

**PALAVRAS-CHAVE:** Emissão acústica, Mecânica da fratura, Avaliação do dano.

BIRCK, G. **Application of acoustic emission techniques in the monitoring structural damage**. 2013. 29f. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

## **ABSTRACT**

Acoustic emission techniques have had a significant advancement in the last decade in monitoring the damage in both geometrically complex structures, such as industrial plants, and in the study of the intrinsic response of heterogeneous materials. Essentially, the acoustic emission technique consists of measuring elastic waves that different rupture mechanisms produce in the solid when it is mechanically excited. Within this scope, this work is developed, in order to correlate an acoustic emission signal with parameters that help monitor the damage in the structure. For this study, experimental tests are performed in two beams of expanded polystyrene (Styrofoam), with and without cracks. A numerical analysis with the Discrete Element Method is also performed, in order to compare results. Processing of the experimental data allowed achieving consistent results in both the calculation of global indexes to monitor the type of damage expected as well as in the determination of failure modes and location on the analysis of isolated events. Preliminary simulation results of the tests also showed the capabilities of this tool.

**KEYWORDS:** Acoustic emissions, Fracture mechanics, Damage assessment.

## SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	1
2.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	2
2.1	Emissão Acústica .....	2
2.1.1	Identificação de eventos de Emissão Acústica .....	2
2.1.2	Ondas Elásticas.....	3
2.1.3	Técnica de localização 1D.....	3
2.1.4	Análise do valor-b.....	4
2.2	Modos de propagação da trinca.....	5
2.2.1	Determinação do modo de propagação da trinca por EA.....	5
3.	METODOLOGIA .....	6
3.1	Determinação de parâmetros mecânicos do material .....	6
3.1.1	Módulo de Elasticidade (E).....	6
3.1.2	Densidade ( $\rho$ ).....	7
3.2	Emissão Acústica .....	7
3.2.1	Descrição dos Ensaios .....	7
3.2.2	Evento Acústico.....	8
3.2.3	Simulação Numérica.....	9
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	9
4.1	Emissão Acústica .....	9
4.1.1	Número de Eventos.....	9
4.1.2	Cálculo do “Valor b” .....	10
4.1.3	Modo de Falha.....	11
4.1.4	Localização da fonte.....	12
4.1.5	Simulação Numérica.....	13
5.	CONCLUSÃO .....	14
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	15
	ANEXO I - EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NO ENSAIO .....	16
	APÊNDICE I – SINAL MEDIDO PELOS MICROFONES .....	17
	APÊNDICE II – TÉCNICA DE LOCALIZAÇÃO 3D.....	18
	APÊNDICE III – AMOSTRAS ENSAIADAS .....	20
	APÊNDICE IV – CARREGAMENTO.....	20

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1 – Caracterização de um evento: (a) Aplicação de faixa limite, (b) N° de picos. ....	3
Figura 2-2 – Método de localização da fonte. ....	4
Figura 2-3 – Representação dos modos de falha.....	5
Figura 2-4 – Padrões de radiação e da onda: (a) de uma abertura de trinca, (b) de uma trinca por cisalhamento orientada verticalmente. Adaptado de Grosse et al. 2008, p.79.....	6
Figura 3-1 – (a) Esquematização da distribuição das forças e apoios. (b) Representação do ensaio do corpo de prova. ....	6
Figura 3-2 – Posições dos microfones nas amostras: (a) com pré-trinca central e (b) sem pré-trinca. ....	7
Figura 3-3 – Sinal com (preto) e sem (cinza) a aplicação do filtro. ....	8
Figura 3-4 – Caracterização de eventos de Emissão Acústica (EA) no sinal filtrado. Imagem à direita: evento de EA ampliado. ....	8
Figura 3-5 – Representação do modelo numérico implementado, unidades em mm. ....	9
Figura 4-1 – Distribuição da amplitude normalizada X tempo normalizado para as amostras: (a) sem pré-trinca e (b) com pré-trinca.....	10
Figura 4-2 – Amostra sem pré-trinca: (a) Valor-b, (b) N° de eventos instantâneos (barras), eventos acumulados (linha cinza clara) e carregamento (linha cinza escura) ao longo do tempo. ....	10
Figura 4-3 – Amostra com pré-trinca: (a) valor-b, (b) N° de eventos instantâneos (barras), eventos acumulados (linha cinza clara) e carregamento (linha cinza escura) ao longo do tempo ....	11
Figura 4-4 – Modo de falha da amostra sem pré-trinca.....	11
Figura 4-5 – Modo de falha da amostra com pré-trinca central. ....	12
Figura 4-6 – Representação da localização da fonte nas amostras: (a) sem pré-trinca (b) com pré-trinca.....	13
Figura 4-7 – (a) Sinal característico do evento de EA. (b) Modo de falha.....	13
Figura 4-8 – Posição da falha da estrutura analisada pelo DEM. ....	13
Figura 4-9 – Amostra ensaiada sem pré-trinca rompida.....	14
Figura AI-5-1 - Microfone usado no ensaio. ....	16
Figura AI-5-2 - Equipamentos usados: (a) amplificador e (b) computador com o software PULSE.....	16
Figura AP-6- 1 - Sinal da amostra sem pré-trinca no último período antes do colapso. ....	17
Figura AP-6- 2 - Sinal da amostra com pré-trinca no último período antes do colapso. ....	17
Figura AP-6- 3 - Sinal obtido da simulação numérica.....	18
Figura AP-6- 4 – Amostra com pré-trinca após ensaio.....	20
Figura AP-6- 5 – Amostra sem pré-trinca após ensaio.....	20
Figura AP-6- 6 – Carregamento e deslocamento para a amostra sem pré-trinca.....	20

## LISTA DE TABELAS

Tabela 4-1 – Localização da fonte. ....	12
---	----

## 1. INTRODUÇÃO

A técnica de emissão acústica (EA) se apresenta hoje como uma das metodologias mais promissoras para avaliar e entender os processos de dano em estruturas. Esta técnica pode ser utilizada em materiais de diferentes tipos de comportamento. Estruturas metálicas, concreto, rocha ou plásticos podem ser estudadas utilizando esta técnica. O método de emissão acústica consiste em medir através de sensores estrategicamente localizados na estrutura em estudo, as ondas elásticas que emanam do dano que um determinado carregamento produz, sendo que este método se enquadra em ensaios não-destrutivos, o qual pode parecer um contra-senso, mas isto é devido a que muitas vezes não é necessário levar a peça até a ruptura e sim só aplicar um nível de sobrecarga ou uma carga cíclica para poder inferir informação sobre a estrutura ou material estudado.

Esta técnica já é estudada há anos no âmbito da sismologia (Grosse et al., 2008), onde os eventos acústicos são os sismos captados pelos sismógrafos. Com o avanço tecnológico, em equipamentos de medição e de processamento de dados, foi possível trazer conceitos adquiridos da sismologia, onde se trabalha na escala de quilômetros para escalas de edifícios de dezenas de metros ou a problemas de laboratório com estruturas de uns poucos centímetros. Esta técnica é utilizada no âmbito industrial para a detecção de trincas em tanques industriais, vasos de pressão ou estruturas industriais em geral, prédios históricos ou qualquer outro tipo de estrutura de considerável complexidade geométrica (Chiquito, 2012, p.177-179). E também esta técnica é utilizada para estudar o comportamento do material até a sua ruptura (Grosse et al., 2008). Métodos numéricos que permitem simular a ruptura de materiais podem fornecer informações complementares para interpretar registros experimentais de emissão acústica. Entre estes métodos pode-se mencionar o método dos elementos discretos formado por barras. Este método é hábil na simulação de fratura e fragmentação do sólido, quando uma barra do modelo atinge seu limite de resistência, ela é retirada do mesmo, respeitando o balanço das energias envolvidas no processo.

O objetivo geral deste trabalho é:

- Explorar as técnicas de emissão acústica na evolução do dano de estruturas de geometria simples.

Como objetivos específicos podem-se citar:

- i. Realizar o processamento dos dados obtidos nos ensaios próprios de emissão acústica;
- ii. Interpretar os parâmetros e curvas, correlacionando-os com as características do dano ocorrido nas duas estruturas estudadas.
- iii. Análise teórica preliminar de um dos ensaios realizados empregando o Método dos Elementos Discretos.

Após a presente introdução é apresentada na seção 2 a fundamentação teórica do trabalho. Posteriormente, na seção 3 é realizada a descrição da metodologia utilizada. Na seção 4 os resultados são discutidos, e finalmente na seção 5 é realizada a conclusão geral do trabalho.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 Emissão Acústica

As ondas elásticas que emanam da região de onde ocorre uma ruptura podem ser captadas por sensores. Esta técnica de captura destas ondas é chamada de Emissão Acústica (EA). Fisicamente, o fenômeno de EA é uma liberação rápida de energia causada pela alteração estrutural no sólido, no qual ondas elásticas são geradas, ou seja, uma transformação de energia mecânica em energia sonora.

A técnica de emissão acústica (TEA) é considerada um ensaio não-destrutivo (Grosse et al., 2008), pois, geralmente os ensaios são realizados durante o funcionamento ou carregamento de trabalho da estrutura. Com isso, a TEA pode ser muito útil na detecção prematura de falhas e trincas, evitando que a estrutura venha a falhar completamente. Além de que a emissão acústica capta ondas elásticas geradas pela nucleação e pelo crescimento de algum defeito na estrutura, sendo ela mesma a fonte geradora dos sinais, sem a necessidade de um equipamento emissor externo (emissão artificial). Por isso, a TEA é considerada um ensaio não-destrutivo passivo.

A realização de ensaios por EA tem suas vantagens e desvantagens. O lado positivo desta técnica é a facilidade de executar o ensaio no ambiente de trabalho da estrutura, inclusive durante o serviço. Além de que, segundo Grosse et al. (2008), este método só é capaz de detectar a formação de novas fissuras e a progressão de fendas existentes ou processos de fricção.

Por outro lado, mesmo que se tenham amostras de mesma forma, tamanho, propriedades e carregamento, é quase impossível reproduzir os mesmos sinais. Isto é devido à heterogeneidade presente em todos os materiais, resultando somente em sinais similares. Esta é uma razão de o porquê é útil comparar a resposta dos sinais de EA com outros métodos de ensaio, como, por ultra-som, raios-X ou a inspeção visual.

Sinais de EA de materiais utilizados usualmente na construção (concreto, madeira, metais, pedras e compósitos) são geralmente de baixas amplitudes e elevadas frequências, segundo Carpinteri et al. (2008a, 2009) tipicamente na faixa de kHz e MHz, no qual necessita sensores de elevada sensibilidade, que por sua vez, estão sujeitos ao ruído do ambiente. Para isso, é necessária a aplicação de métodos de amplificação do sinal e de filtragem deste ruído.

#### 2.1.1 Identificação de eventos de Emissão Acústica

A identificação de eventos de EA é com certeza a fase mais crítica de uma análise pela TEA. Cada evento é caracterizado principalmente pela sua máxima amplitude, mas também por outros parâmetros que estão apresentados na Figura 2-1(a). Para realizar o processamento é necessário definir uma magnitude limite (faixa limite), no qual após a magnitude ser atingida é que se considera o sinal como um evento de EA, como visto na Figura 2-1(a).

É possível também avaliar o evento de EA no domínio frequência. Assim, calcula-se a frequência (média) daquele sinal identificado como evento, e verifica-se se a sua frequência corresponde com a frequência típica de sinais de EA, na faixa de kHz e MHz. A frequência média é calculada pelo número total de picos dividido pela duração do evento, como visto na Figura 2-1(b).

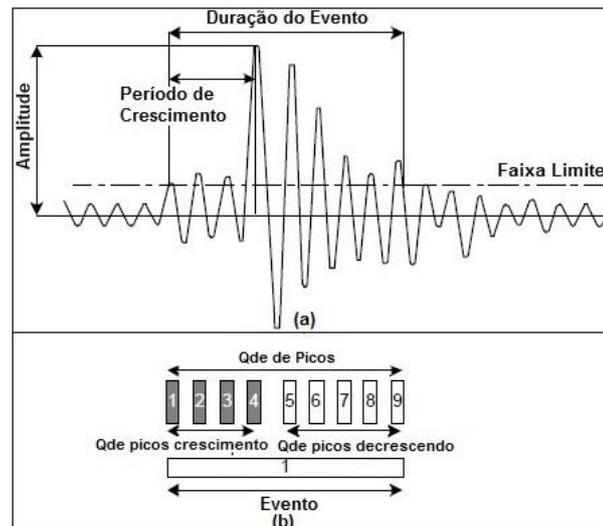


Figura 2-1 – Caracterização de um evento: (a) Aplicação de faixa limite, (b) N° de picos.  
Fonte: figura adaptada de Grosse et al., 2008, p.43.

### 2.1.2 Ondas Elásticas

Os sinais de emissão acústica são formados por ondas elásticas de vários tipos, as principais neste contexto são chamadas de ondas-P, relacionadas com as mudanças de volume, e ondas-S ou de Corte, relacionadas com as mudanças de forma do contínuo. A onda-P, também chamada de onda longitudinal ou volumétrica, se desloca no material como uma série de compressões e trações. A velocidade de propagação de cada onda depende do material, como visto na equação 2.1 para ondas-P ( $C_p$ ) e na equação 2.2 para ondas-S ( $V_T$ ). Sendo elas importantes na localização da fonte de emissão (Potel, 2009).

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

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

onde  $\nu$  é coeficiente de Poisson,  $E$  é o módulo de elasticidade e  $\rho$  é a densidade do material.

### 2.1.3 Técnica de localização 1D

O método de localização da fonte mais simples é o chamado método de zona, onde as coordenadas de origem da fonte não são determinadas, mas sim uma zona provável da localização da fonte. Contudo, este é também o método mais impreciso de localização, já que a geometria do componente influencia o método, como por exemplo, em um arame no qual uma dimensão é muito maior que as outras, que permite uma localização melhor (Grosse et al., 2008). Este método considera a fonte como um ponto localizado entre dois sensores, como visto na Figura 2-2.

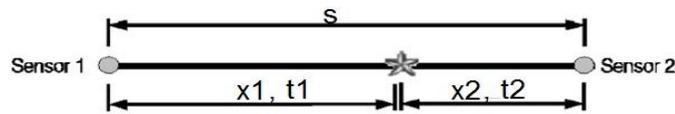


Figura 2-2 – Método de localização da fonte.

Substituindo a equação 2.3 em 2.4 ou 2.5, a resposta é obtida através da solução linear das equações 2.4 e 2.5.

$$s = x1 + x2 \quad (2.3)$$

$$x2 = C_p * (t2 - t_0) \quad (2.4)$$

$$x1 = C_p * (t1 - t_0) \quad (2.5)$$

onde  $x1$  e  $x2$  são as distâncias à fonte dos sensores 1 e 2 respectivamente,  $s$  a distância entre os dois sensores,  $t1$  e  $t2$  são os tempos de chegada do evento em cada sensor,  $t_0$  o tempo que ocorreu o evento e  $C_p$  é a velocidade de propagação do som no material, definida pela equação 2.1. Uma técnica mais avançada de localização tridimensional (3D) é apresentada no Apêndice II.

#### 2.1.4 Análise do valor-b

Usando a técnica de EA é possível avaliar o desenvolvimento dos danos na estrutura, a partir da análise estatística da distribuição de amplitude de sinais de EA que emerge das microfissuras crescentes. Este estudo iniciou-se com a geofísica, no qual expressa a magnitude ( $m$ ) igual ao logaritmo da amplitude do evento de EA.

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

onde  $A$  é a amplitude. E de acordo com a lei de Gutenberg-Richter (GR) (Shiotani, 1994), que descreve a distribuição estatística do sinal de amplitudes da EA, tem-se que:

$$N(\geq A) = \zeta A^{-b} \quad (2.7)$$

onde  $\zeta$  e  $b$  são coeficientes que caracterizam o comportamento do modelo e  $N$  o número de sinais de EA com amplitude  $\geq A$ . Para EA o foco é no coeficiente  $b$ , chamado de “valor-b”, que caracteriza a frequência relativa dos eventos de baixa amplitude em comparação com eventos de alta amplitude. Um pequeno valor de  $b$  indica que têm-se poucos eventos de grande amplitude e um grande valor de  $b$  indicaria o contrário. Aplicando logaritmo em ambos os membros, tem-se:

$$\text{Log} N = \text{Log} \zeta - b * m \quad (2.8)$$

O expoente  $b$  da lei GR, o assim chamado Valor  $b$ , muda com as diferentes etapas de crescimento dos danos: 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 indicaria que uma falha eminente se aproxima. Esta observação é o fundamento da chamada “Análise do valor- $b$ ”, utilizada para a avaliação de danos (Shiotani, 1994 e Carpinteri, 2009).

Por outro lado, o processo de danos também é caracterizado por uma progressiva localização identificada através da dimensão fractal  $D$  do domínio danificado. É possível

provar que  $2b = D$  (Carpinteri, 2008b, 2009). Portanto, é possível identificar as modalidades de libertação de energia no elemento estrutural durante o processo de acompanhamento 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 libertação de energia ocorre através de pequenos defeitos distribuídos em todo o volume, e  $D = 2,0$ , o que corresponde a  $b = 1,0$ , quando a libertação de energia ocorre em uma superfície (uma única trinca). No primeiro caso, o dano difuso é observado, enquanto que no segundo, a localização numa macrotrinca acontece. A faixa de 1 a 1,5 para o valor- $b$  ainda é discutida por alguns pesquisadores.

O valor- $b$  é o coeficiente angular da reta de tendência linear do gráfico em escala logarítmica do número de eventos de emissão acústica acumulados versus a sua amplitude. Estes gráficos são apresentados nas Figura 4-2(a) e Figura 4-3(a).

## 2.2 Modos de propagação da trinca

A propagação de uma trinca pode ocorrer de três modos distintos, através de movimentos relativos das superfícies das trincas. Estes movimentos relativos podem ser de tração, cisalhamento ou torção, que são chamados respectivamente de modo I, II e III como vistos na Figura 2-3. “Cada um desses modos está associado a um tipo básico de campo de tensões na vizinhança da ponta da trinca. Qualquer problema de deformação da ponta da trinca pode ser tratado como uma combinação desses modos de deslocamento” (Chiquito, 2012, p.63).

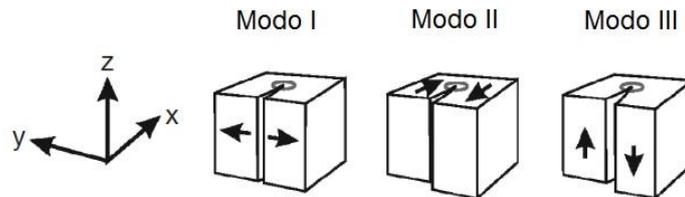


Figura 2-3 – Representação dos modos de falha.  
Fonte: Carpinteri, 2008, p56.

O modo I é de abertura de trinca, é devido ao carregamento em tração provocando o deslocamento das superfícies da trinca perpendicularmente a si mesmas. O modo II é o modo de deslizamento devido ao cisalhamento no plano, que provoca o deslocamento das superfícies da trinca paralelamente a si mesma e perpendicular a frente de propagação. Já o modo III é o modo de rasgamento, que surge do cisalhamento fora do plano que provoca o deslocamento das superfícies da trinca paralelamente a si mesma.

### 2.2.1 Determinação do modo de propagação da trinca por EA

Para verificar em que modo (Modo I, II ou III) a trinca está se propagando é aplicada a chamada técnica do primeiro movimento (“*first motion technique*”). Esta técnica consiste em analisar as polaridades dos impulsos da onda P que chegam a cada sensor. Segundo Grosse et al. (2008), o sentido de polaridade da onda em torno da fonte é determinada pelo padrão de irradiação da fonte. Utilizando a distribuição das polaridades, é possível estimar a orientação dos planos nodais (onde nenhum deslocamento acontece), e assim, o mecanismo de propagação.

No caso do modo de propagação I (abertura) da trinca em todos os sensores seriam medidas polaridades positivas do início da onda-P (Figura 2-4a). Já na propagação por cisalhamento (modo II), a polaridade de início da onda mudaria de positivo (deflexão

ascendente na forma da onda) para negativo (descendente) de acordo com a posição do sensor em relação à fonte e aos planos de cisalhamento, como mostrado na Figura 2-4b.

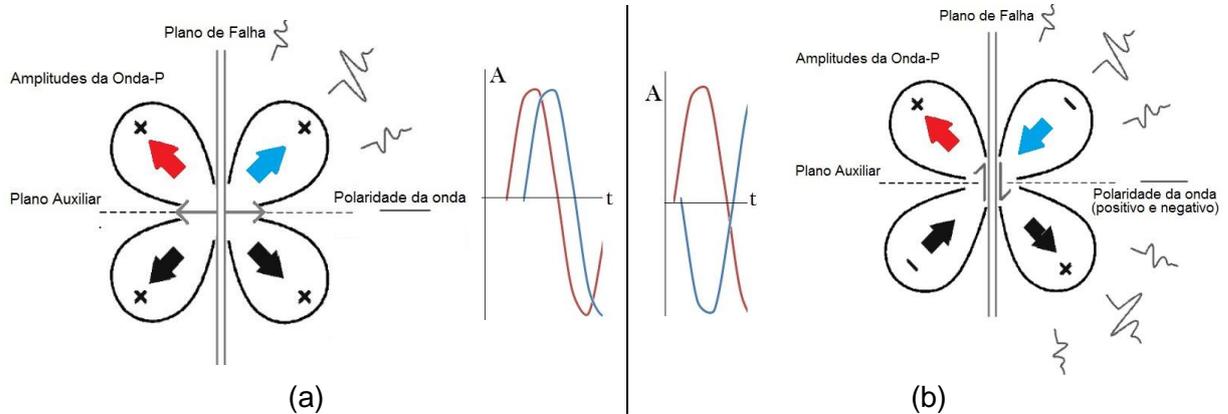


Figura 2-4 – Padrões de radiação e de onda: (a) de uma abertura de trinca, (b) de uma trinca por cisalhamento orientada verticalmente. Adaptado de Grosse et al. 2008, p.79.

Assume-se também que os sensores tenham sido devidamente calibrados, de modo que um desvio positivo do sinal indica um movimento para longe da fonte (isto é, de compressão). Além de que, a posição dos sensores deve estar distribuída de forma que a trinca esteja entre eles.

### 3. METODOLOGIA

#### 3.1 Determinação de parâmetros mecânicos do material

Os ensaios experimentais foram realizados em vigas de Poliestireno Expandido (Isopor), devido a sua baixa rigidez e baixo custo. Para definir as propriedades do material utilizado, módulo de elasticidade ( $E$ ) e densidade ( $\rho$ ), é apresentado a seguir o procedimento.

##### 3.1.1 Módulo de Elasticidade ( $E$ )

Para a determinação do módulo de elasticidade, foi realizado um ensaio de 4-pontos, dois pontos para o apoio e dois pontos para a aplicação da carga (Figura 3-1a) de uma viga retangular simples apoiada. Este ensaio ocorreu em conjunto com o ensaio de emissão acústica.

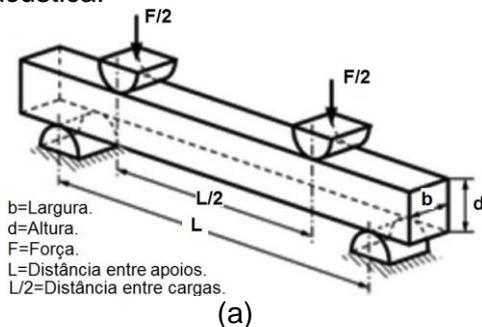


Figura 3-1 – (a) Esquemática da distribuição das forças e apoios. (b) Representação do ensaio do corpo de prova.

O corpo de prova (CP) utilizado possui dimensões de 32(b)x49(d)x355mm. A distância entre os apoios (L) foi de 302 mm e entre carregamento de 150 mm. O ensaio foi realizado na máquina modelo DL-2000 disponível no laboratório, no qual foi aplicado um deslocamento prescrito com incremento de 1 mm/min. Com uma célula de carga media-se a força aplicada ao longo do tempo (EMIC, 2003).

Para o cálculo do módulo de elasticidade seguiu-se o procedimento disponível na norma ASTM D6272 (2010), que trata da determinação de propriedades mecânicas de materiais plásticos reforçados ou não através do ensaio de 4 pontos de uma viga retangular. Desta norma se obteve a equação 3.1 para o cálculo do módulo de elasticidade.

$$E = \frac{0,17L^3m}{bd^3} \quad (3.1)$$

onde E é o módulo de elasticidade (MPa), L a distância entre os suportes (mm), b a largura da viga (mm), d a altura da viga (mm) e m a inclinação reta da curva força-deslocamento (N/mm). Substituindo os valores e calculando o valor m pela linha de tendência da seção linear do gráfico de força-deslocamento, apresentado na Figura AP-6- 6 do Apêndice IV. Obtido o valor m de 6,452 N/mm e substituindo todos os valores na equação 3.1, chega-se a um módulo de elasticidade de 8,02 MPa.

### 3.1.2 Densidade ( $\rho$ )

A obtenção da densidade do Isopor é calculada através da pesagem da massa do corpo de prova dividido pelo seu volume. O corpo de prova apresenta as mesmas características da Figura 3-1b com medidas de 31x45x350 mm e massa de 13,3 gramas. Resultando em uma densidade de 27,24 kg/m<sup>3</sup>.

## 3.2 Emissão Acústica

### 3.2.1 Descrição dos Ensaios

Os sinais de emissão acústica foram obtidos através do ensaio de duas vigas, uma com pré-trinca central e outra sem, onde quatro microfones foram posicionados como mostrado na Figura 3-2. As dimensões das vigas também estão nesta figura. A posição dos apoios e do carregamento são os mesmos do ensaio de flexão 4 da Figura 3-1(b).

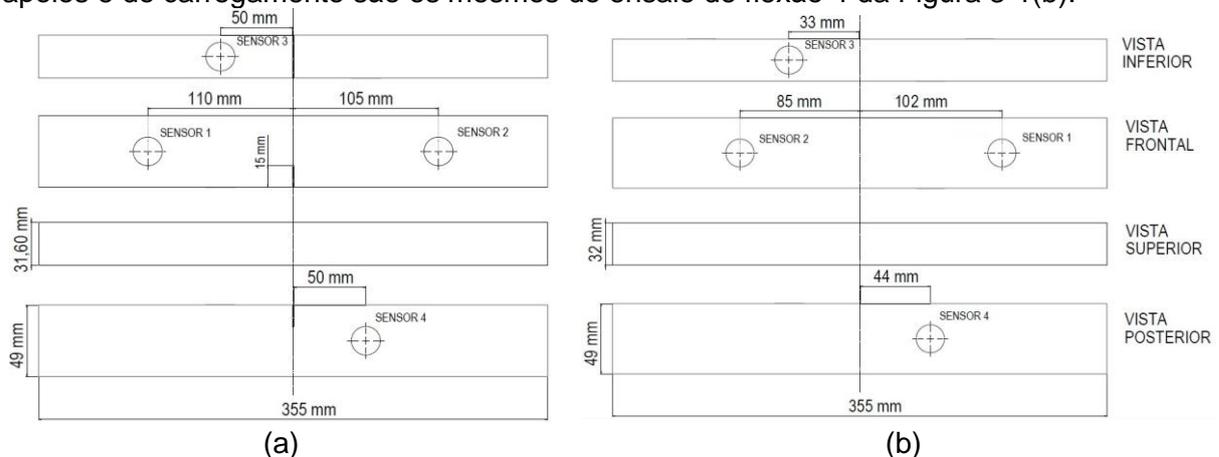


Figura 3-2 – Posições dos microfones nas amostras: (a) com pré-trinca central e (b) sem pré-trinca.

Nos ensaios se aplicaram deslocamentos prescritos nos pontos de aplicação da carga representados na Figura 3-1. A aquisição de dados de EA foi realizada através de equipamentos da marca Brüel & Kjær, apresentados no Anexo I. Os dados adquiridos foram Força (N), Deslocamento (mm). E os eventos de EA através dos 4 sensores (4 canais) de Pressão Sonora (Pa) pelo Tempo(s). Estes equipamentos foram disponibilizados pelo laboratório do Grupo de Mecânica Aplicada do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Através da avaliação dos sinais é possível determinar parâmetros que caracterizem a falha e a evolução da mesma. O tempo de ensaio foi aproximadamente de 27 minutos para a amostra sem pré-trinca e 11 minutos para a amostra com pré-trinca.

### 3.2.2 Evento Acústico

Para a análise de emissão acústica (EA) deve-se identificar do evento sua amplitude máxima e o tempo no qual ela ocorre, além do formato da onda gerada. Nesta etapa deve-se ter uma atenção especial para não considerar ruídos do ambiente e de equipamentos utilizados.

Assim, é definido e aplicado um filtro de passa-alta com frequência de corte de 1 kHz, já que os eventos esperados no ensaio deste tipo de material podem ter conteúdo de frequência na faixa de 5 a 15 kHz (Justen, 2012). Na Figura 3-4, é apresentada a caracterização do evento após a aplicação do filtro. Na Figura 3-3 é mostrado o sinal com e sem a aplicação do filtro.

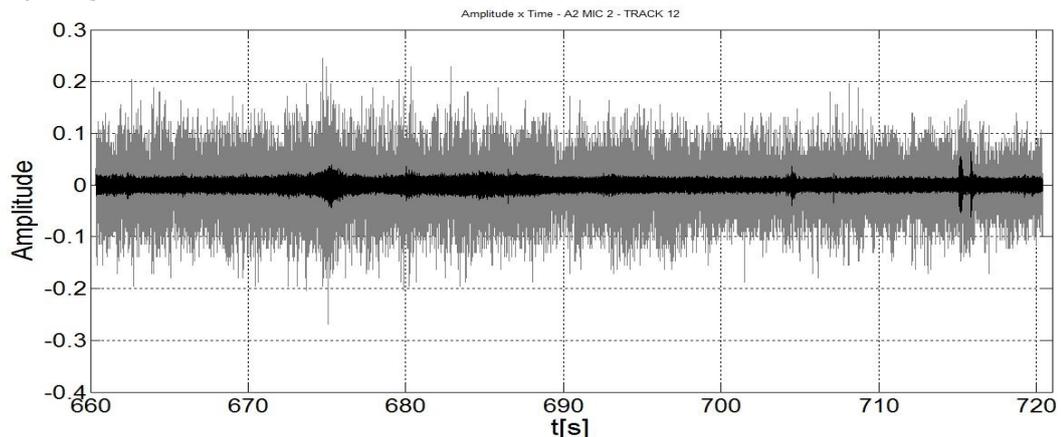


Figura 3-3 – Sinal com (preto) e sem (cinza) a aplicação do filtro.

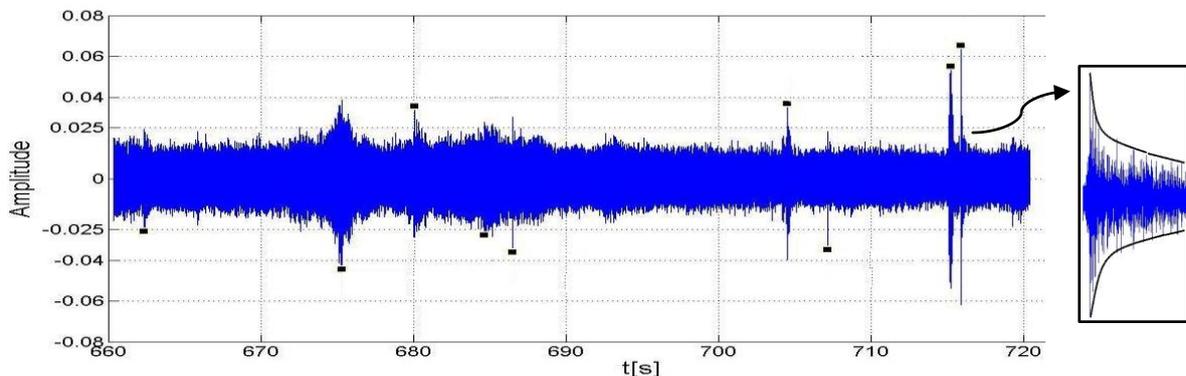


Figura 3-4 – Caracterização de eventos de Emissão Acústica (EA) no sinal filtrado. Imagem à direita: evento de EA ampliado.

A determinação das magnitudes de emissão acústica e os tempos no qual estes acontecem foram realizadas de forma manual.

### 3.2.3 Simulação Numérica

O modelo computacional empregado no trabalho é baseado no Método dos Elementos Discretos (DEM) por barras, no qual representa o contínuo através de um arranjo de barras de treliça, com rigidez equivalente ao contínuo que se quer representar. Os elementos são representados pela lei bi-linear inspirada no modelo de Hillerborg. Mais detalhes sobre este modelo pode-se encontrar em Kostaski, 2012.

O modelo simulado tem suas dimensões semelhantes à amostra sem pré-trinca, no qual foi gerada uma viga com 15x23x176 módulos cúbicos de dimensão 2 mm. O modelo simulado e a posição dos microfones são apresentados na Figura 3-5. As posições dos apoios e carregamento são os mesmo do experimental.

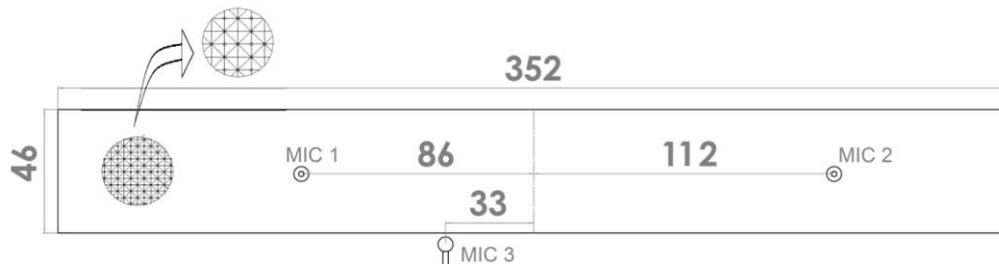


Figura 3-5 – Representação do modelo numérico implementado, unidades em mm.

Os resultados obtidos pelo DEM são resultados preliminares, já que o modelo está sendo calibrado utilizando a configuração de ruptura e a curva de carga versus deslocamento global obtidas experimentalmente.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Emissão Acústica

#### 4.1.1 Número de Eventos

Para cada amostra foram identificados os eventos em relação ao tempo e a sua amplitude máxima. Estes dados são apresentados na Figura 4-1(a) para a amostra sem pré-trinca e na Figura 4-1(b) da amostra com pré-trinca central.

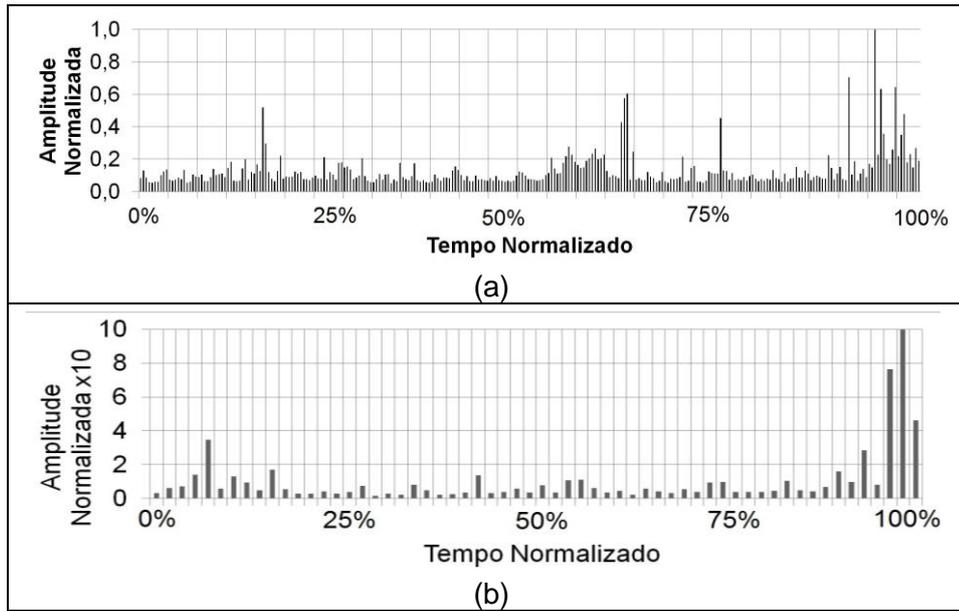


Figura 4-1 – Distribuição da amplitude normalizada X tempo normalizado para as amostras: (a) sem pré-trinca e (b) com pré-trinca.

De ambos os gráficos pode-se perceber que os eventos de maiores amplitudes estão localizados no final do ensaio, ou seja, quando ocorre a falha estrutural das amostras, o qual era esperado. Os números totais de eventos caracterizados foram de 269 para a amostra sem pré-trinca e 60 eventos para a amostra com pré-trinca.

4.1.2 Cálculo do “Valor b”

Com o logaritmo do número de eventos e da amplitude consegue-se obter através de uma linha de tendência linear o valor-b. Para a avaliação do desenvolvimento de uma trinca é necessário avaliar a amostra por períodos de tempo, para que assim, seja possível determinar a evolução do valor-b. Para a amostra sem pré-trinca foi calculado em cinco períodos de 320s do tempo total, como mostrado na Figura 4-2(b). Na Figura 4-2(a) é apresentada o valor-b para cada período.

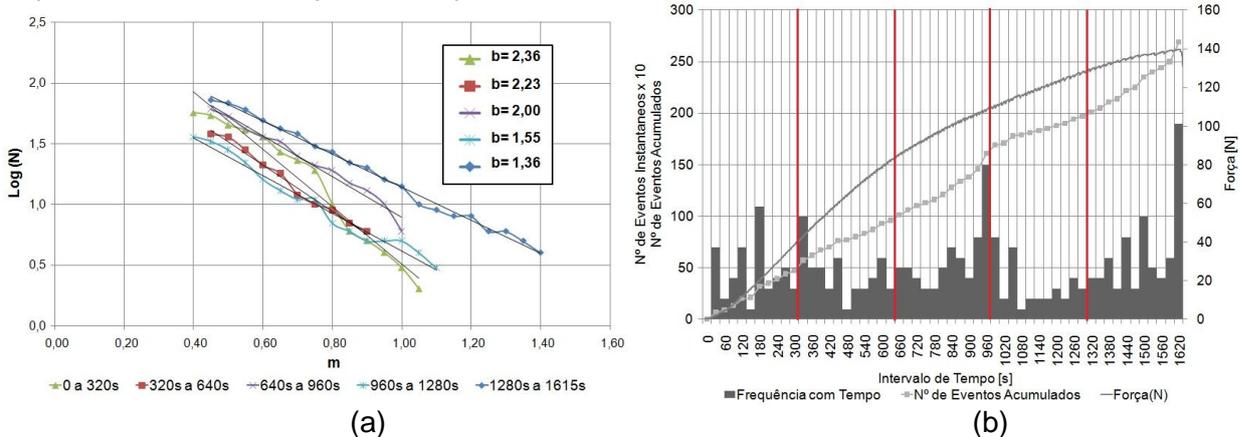


Figura 4-2 – Amostra sem pré-trinca: (a) Valor-b, (b) N° de eventos instantâneos (barras), eventos acumulados (linha cinza clara) e carregamento (linha cinza escura) ao longo do tempo.

Pela Figura 4-2(a), percebe-se que o valor- $b$  inicia-se em 2,36 para o período de 0 a 320 segundos e decai até 1,36 no último período. Isto indica que nos períodos iniciais as fontes dos eventos de EA estão sobre todo o volume e nos períodos finais esses eventos tendem a emanar de uma macrotrinca.

Para a amostra com pré-trinca o valor- $b$  foi analisado em períodos de 215 segundos, como mostrado na Figura 4-3(b).

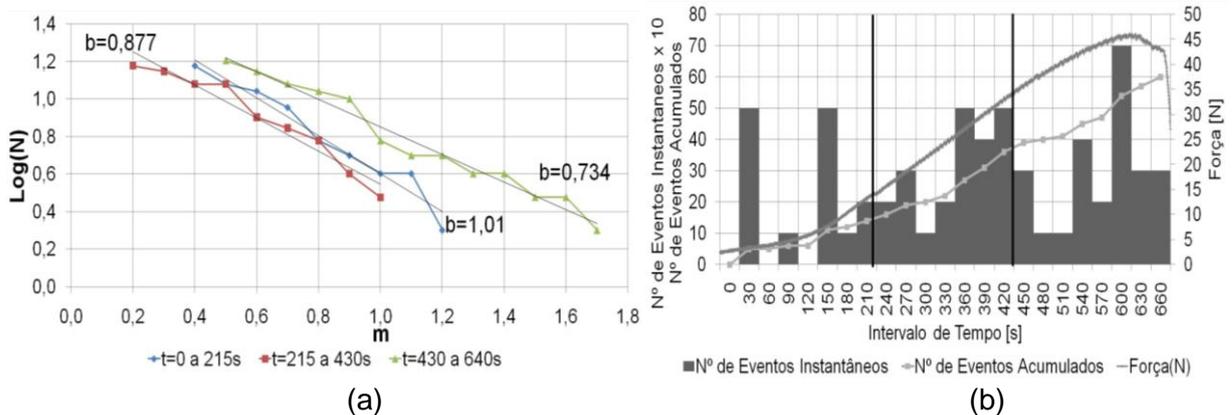


Figura 4-3 – Amostra com pré-trinca: (a) valor- $b$ , (b) Nº de eventos instantâneos (barras), eventos acumulados (linha cinza clara) e carregamento (linha cinza escura) ao longo do tempo

Como é visto na Figura 4-3(a), o valor- $b$  apresenta-se com valores de 1 ou abaixo, o que indica que os eventos de EA resultam de uma fonte, ou seja, a trinca é a fonte principal dos eventos de EA.

#### 4.1.3 Modo de Falha

Para verificar o mecanismo de propagação da falha, foi analisado o mesmo evento em dois sensores no mesmo plano (Microfones 1 e 2). Na Figura 4-4 é apresentado um evento ocorrido na amostra sem pré-trinca, e na Figura 4-5 para a amostra com pré-trinca.

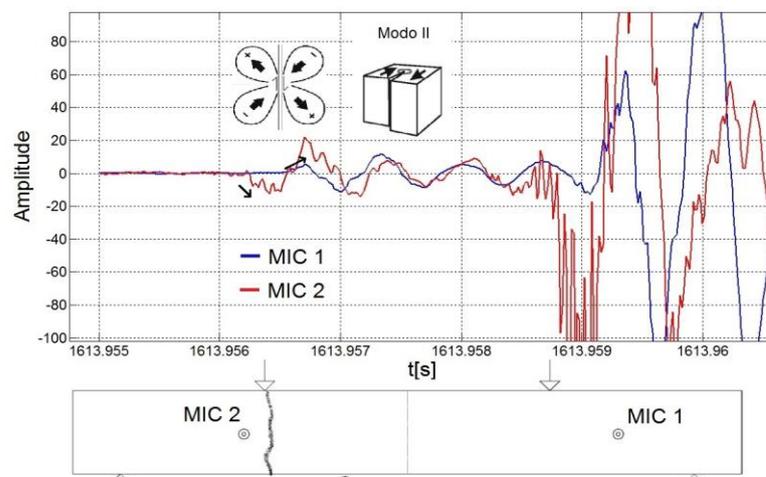


Figura 4-4 – Modo de falha da amostra sem pré-trinca.

É possível verificar na Figura 4-4 que as polaridades de início de cada onda são opostas, o que caracteriza a falha de Modo II, ou seja, de cisalhamento. O que é possível, já que no local da falha, perto da aplicação da carga, há forças cisalhantes e momento atuante.

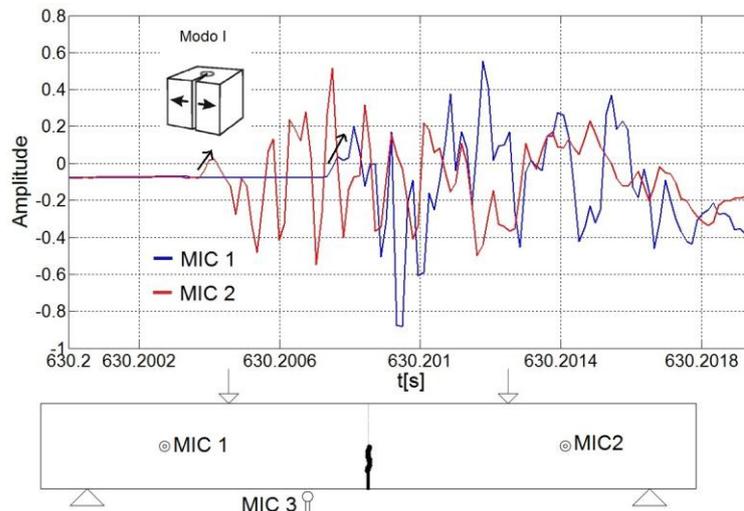


Figura 4-5 – Modo de falha da amostra com pré-trinca central.

Na Figura 4-5 a polaridade de início em cada sensor é igual, ambas positivas, o que caracteriza o Modo I de falha, a abertura de trinca. O que era esperado devido à pré-trinca localizada no meio da estrutura.

#### 4.1.4 Localização da fonte

É aplicada a localização de zona descrita na metodologia no sinal não filtrado. Este método é bastante impreciso, porém, é útil para determinar de forma rápida qual é a zona da estrutura mais provável que esteja à fonte. Na Tabela 4-1 são apresentadas as localizações de alguns eventos dos últimos instantes antes da ruptura.

Tabela 4-1 – Localização da fonte.

Amostra sem pré-trinca			Amostra com pré-trinca		
Tempo do evento	Distância do		Tempo do evento	Distância do	
	Sensor 1	Sensor 2		Sensor 1	Sensor 2
1610,32s	151 mm	36 mm	605,38s	95,1 mm	119,9 mm
1612,07s	205,2 mm	18,1 mm	608,86s	128,1 mm	86,9 mm
1613,95s	209 mm	22 mm	630,22s	130,9 mm	84,1 mm
1613,97s	144,8 mm	42,2 mm	633,35s	105,2 mm	109,8 mm

Da tabela, conclui-se para a amostra sem pré-trinca que a fonte está em raio médio de 30 mm do sensor 2, como pode ser visto na Figura 4-6(a). E para a amostra com pré-trinca central, Figura 4-6(b), a fonte está localizada entre os sensores a uma distância média de 100 mm do sensor 2. No ensaio experimental, a fratura do material para a amostra sem pré-trinca ocorreu a aproximadamente 20 mm a direita do sensor 2, enquanto na amostra com pré-trinca ocorreu na trinca a 105 mm do microfone 2.

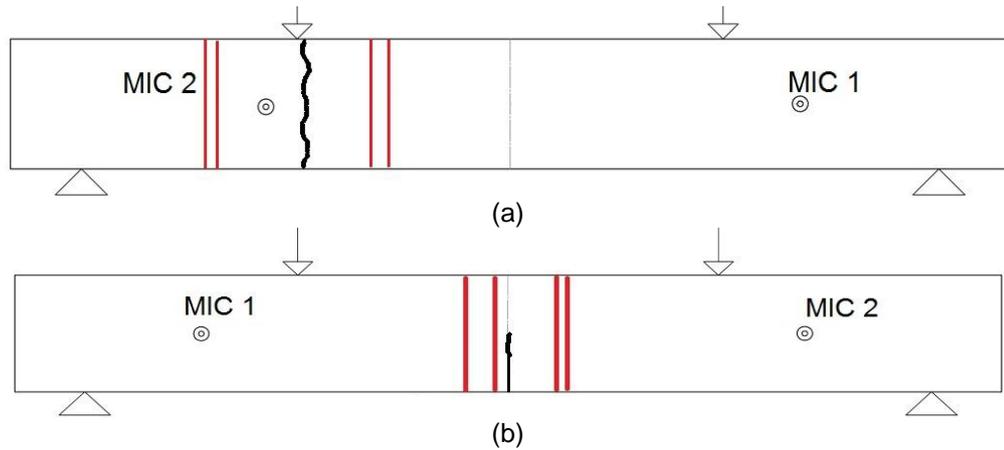


Figura 4-6 – Representação da localização da fonte nas amostras: (a) sem pré-trinca (b) com pré-trinca.

#### 4.1.5 Simulação Numérica

Os sinais obtidos através do Método dos Elementos Discretos (DEM) para todos os sensores estão na Figura AP-6- 3 do Apêndice I. Na Figura 4-7(a) é mostrada a forma característica de um evento e Figura 4-7(b) a análise do modo de falha através dos sensores 1 e 2. O dano causado na estrutura devido ao carregamento é apresentado na Figura 4-8.

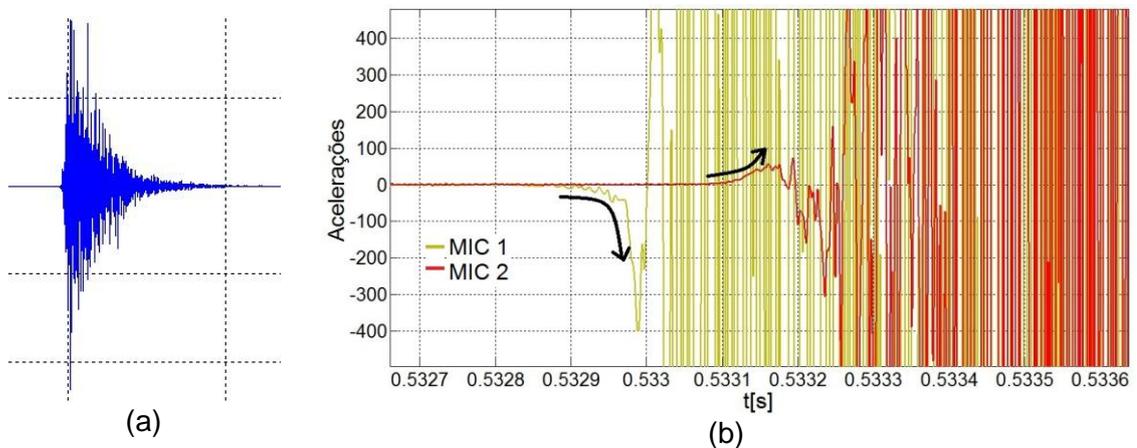


Figura 4-7 – (a) Sinal característico do evento de EA. (b) Modo de falha.



Figura 4-8 – Posição da falha da estrutura analisada pelo DEM.



Figura 4-9 – Amostra ensaiada sem pré-trinca rompida.

Da verificação da polaridade de início de cada evento nos microfones 1 e 2, verificou-se também que o evento analisado está associado ao modo de falha II. Também as configurações de ruptura experimental e numérica se mostraram semelhantes, como pode ser visto na Figura 4-8 e Figura 4-9.

## 5. CONCLUSÃO

Do ensaio experimental realizado sobre o poliestireno expandido foi possível concluir:

- Amostra sem pré-trinca: o valor-b decresceu com o passar do tempo, marcando uma localização de uma falha, ou seja, ocorreu um crescimento de trinca, no qual o modo de falha apresentado foi de cisalhamento (Modo II) localizado ao lado da aplicação da força, justamente onde ocorre a máxima força cisalhante.
- Amostra com pré-trinca: o valor-b permaneceu quase inalterado com a aplicação do carregamento, devido a uma pré-trinca já localizada no meio da estrutura. O modo de falha apresentado foi de abertura de trinca (Modo I), onde nesta seção da viga é caracterizada a presença de momento fletor devido ao tipo de carregamento.
- Simulação: apresentou o mesmo processo de modo de falha do modelo sem pré-trinca ensaiado e com localização semelhante, entre apoio e carga. E também, a forma da onda de EA resultante é semelhante à obtida nos ensaios experimentais.

**Considerações finais:** quanto à técnica de emissão acústica pode-se concluir que é uma ferramenta de grande utilidade na monitoração de danos em estruturas. Que possui como objetivo final fornecer informações úteis para evitar uma fratura catastrófica, correlacionando os sinais detectados através da emissão acústica com o crescimento do processo de fratura ou deterioração.

Cabe salientar que os sensores utilizados possuem uma limitação de captura de sinal de até 20 kHz, o que limita realizar estudos deste tipo com materiais de baixa rigidez. Para realizar este estudo em materiais mais rígidos, como compósitos, rochas ou metais seria necessário adquirir sensores que permitam a captura com frequência na ordem de MHz.

Como proposta de trabalhos futuros é sugerido o estudo e desenvolvimento da técnica de localização 3D através de método iterativo, apresentado no Apêndice II. E também, a avaliação do sinal de emissão acústica em uma estrutura com maiores dimensões para verificar se o efeito de escala se manifesta nos parâmetros de emissão acústica medidos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

American Society for Testing and Materials. **D6272-10**: “Standart Test Method for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and electrical insulating materials by four-point bending”. Estados Unidos, 2010.

Brüel & Kjær. “**Produtos**”. <http://www.bksv.com>. Acessado em 28/04/2013.

Carpinteri, Alberto; Lacidogna, Giuseppe (Eds.). “**Acoustic Emission and Critical Phenomena: From Structural Mechanics to Geophysics**”. Taylor & Francis Group, 2008a, Londres. p46-66.

Carpinteri A., Lacidogna G., Niccolini G., Puzzi S.: “**Critical defect size distributions in concrete structures detected by the acoustic emission technique**”. *Meccanica* 2008b; 43: 349–63.

Carpinteri A., Lacidogna G., Niccolini G.: “**Fractal analysis of damage detected in concrete structural elements under loading**”. *Chaos, Solitons and Fractals* 2009; 42: 2047–2056.

Chiquito, P. R. “**Prognóstico de danos em estruturas simples: implementação numérica-experimental**”, 214f. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná. Curitiba. 28 de Agosto de 2012.

EMIC – Maquinas de Ensaio. “**Manual da linha DL: 500/1000/2000/3000**”, 3ª edição, São José dos Pinhais-PR. Janeiro de 2003.

Grosse, Christian U.; Ohtsu, Masayasu (Eds.). “**Acoustic Emission Testing**”. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2008.

Justen, A. L. “**Aplicação de técnicas de emissão acústica na caracterização de dano em estruturas**”. Monografia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 19 de dezembro de 2012.

Kosteski, L.E. “**Aplicação do Método dos Elementos Discretos formado por barras no estudo do colapso de estruturas**”. 177f. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2012.

Shiotani T., Fujii K., Aoki T., Amou K.. “**Evaluation of progressive failure using AE sources and improved b-value on slope model tests**”. *Prog Acoust Emission* 1994; 7:529–34.

Potel, Catherine; Bruneau, Michel (Eds.). “**Materials and Acoustics Handbook**”. London: ISTE Ltd, 2009, p3-28.

## ANEXO I - EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NO ENSAIO

**4189-A-021 - 1/2-inch free-field microphone with Type 2671 preamplifier, 6 Hz to 20 kHz, prepolarized**



Overview	Specifications	Description	Accessories	Services
Capacitance				
Diameter	1/2 inch			
Dyn. Range	16.5 - 134 dB			
Freq. Range	20 - 20000 Hz			
Inherent Noise	16.5 dB A			
Lower Limiting Frequency -3dB	20 Hz			
Optimised	Free field			
Polarization	Prepolarized			
Polarisation Voltage				
Preamplifier Included				
Pressure Coefficient	-0.01 dB/kPa			
Sensitivity	50 mV/Pa			
Standards	IEC 61094-4 WS2F			
TEDS UTID				
Temperature Coefficient	-0.006 dB/°C			
Temperature Range	-30 - 100 °C			
Venting	Rear			
Input Type	CCLD IEPE			

Figura AI-5-1 - Microfone usado no ensaio.



Figura AI-5-2 - Equipamentos usados: (a) amplificador e (b) computador com o software PULSE.

## APÊNDICE I – SINAL MEDIDO PELOS MICROFONES

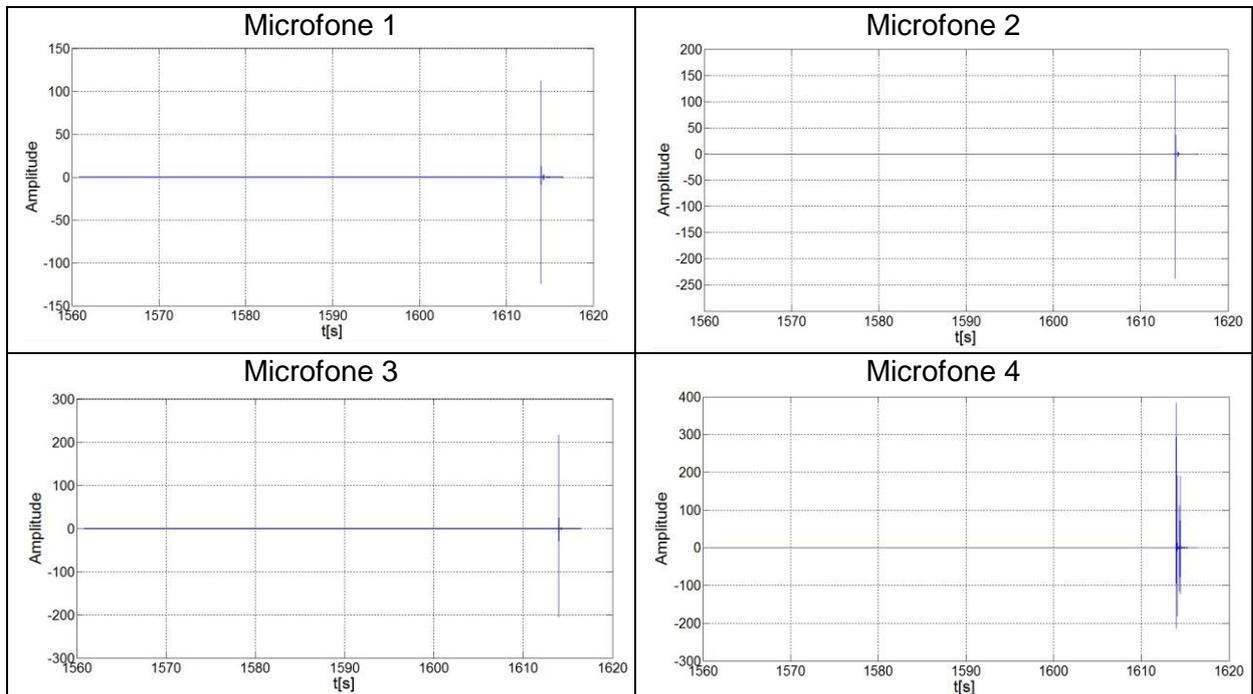


Figura AP-6- 1 - Sinal da amostra sem pré-trinca no último período antes do colapso.

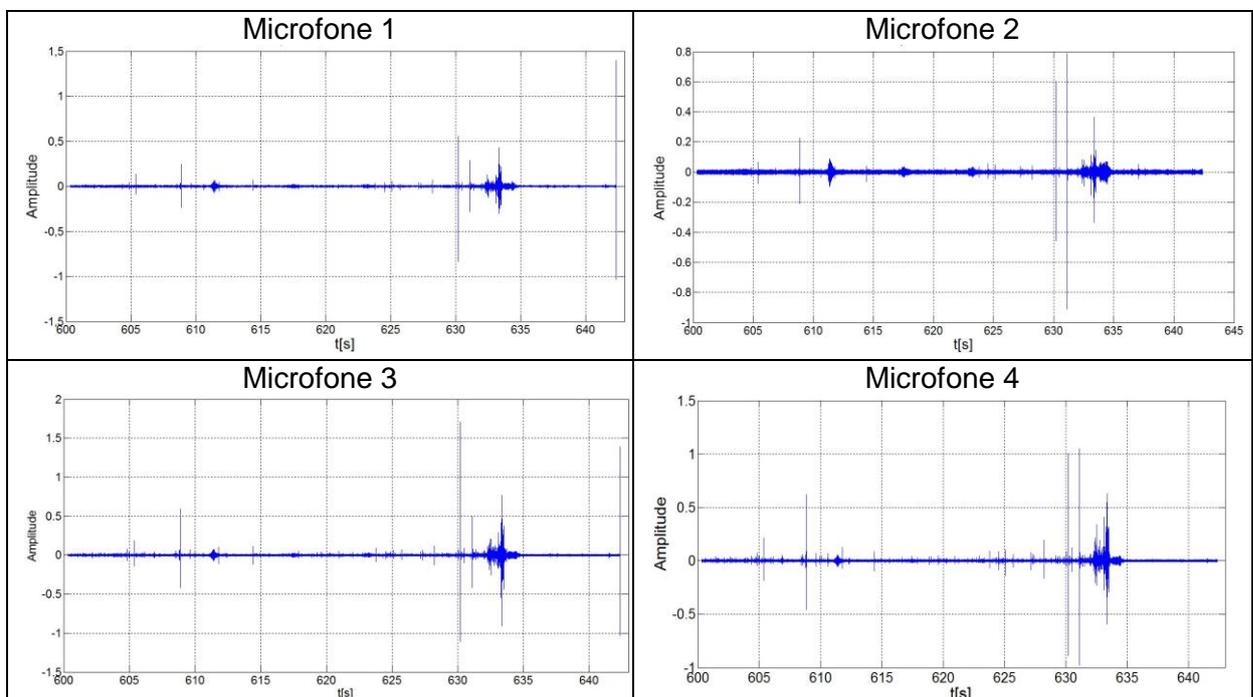


Figura AP-6- 2 - Sinal da amostra com pré-trinca no último período antes do colapso.

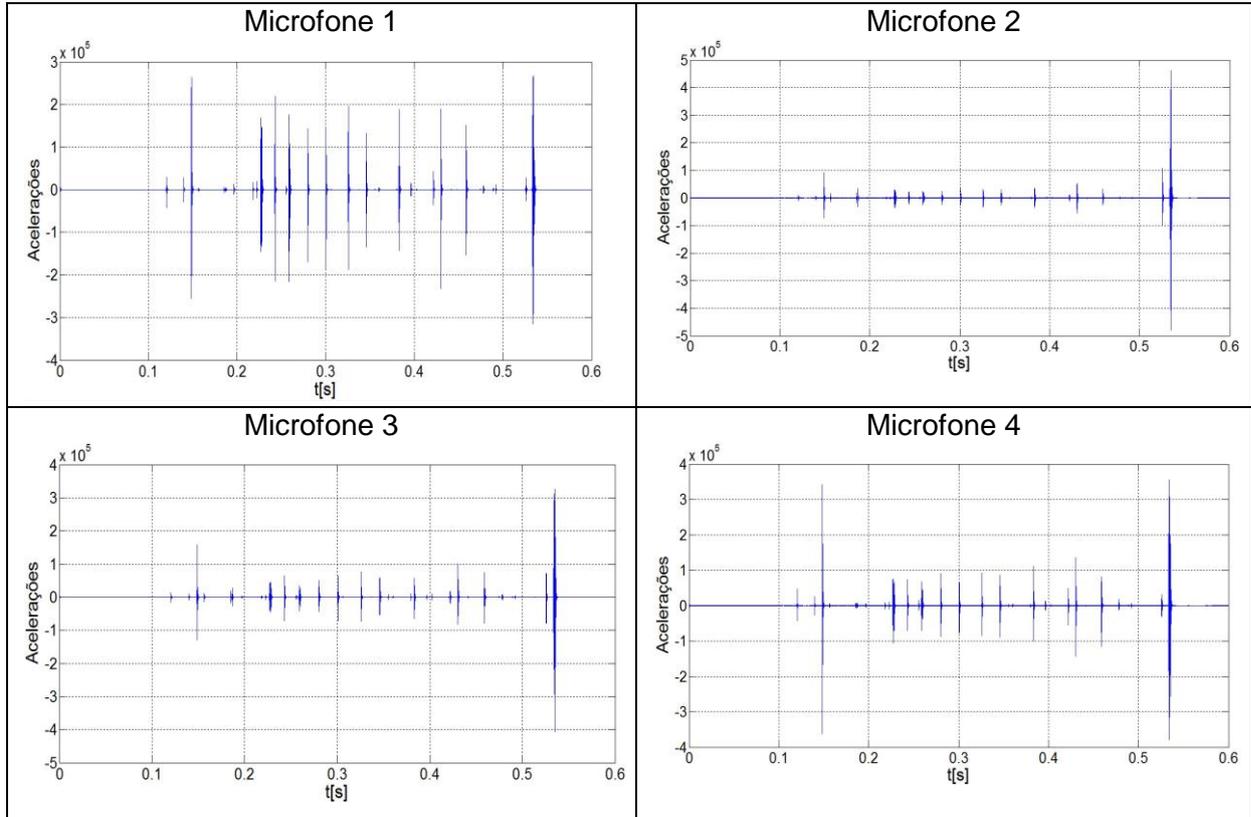


Figura AP-6- 3 - Sinal obtido da simulação numérica.

## APÊNDICE II – TÉCNICA DE LOCALIZAÇÃO 3D

A técnica de localização espacial (3D) apresentada em Grosse et al. (2008) é um processo iterativo para a determinação da localização (coordenadas  $x$ ,  $y$  e  $z$ ) da fonte a partir das posições de no mínimo 4 sensores ( $x_i$ ,  $y_i$ ,  $z_i$ ) e do tempo de chegada do evento ( $t_i$ ). Além da velocidade de propagação da onda no material ( $C_p$ ), que é definida pela Equação 2.1 (Potel, 2009).

O método consiste em calcular o tempo de viagem da fonte ao sensor, pela Equação 6.1 a partir de uma estimativa  $x_0$ ,  $y_0$ ,  $z_0$  e  $t_0$  da localização da fonte ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ), onde  $t_0$  é o primeiro chute para o tempo de origem do evento. No mínimo 4 sensores são necessários devido às quatro incógnitas do problema, a localização da fonte ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ) e o tempo de ocorrência do evento ( $t_0$ ).

$$t_i = \frac{\sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2}}{C_p} + t_0 \quad (6.1)$$

A equação 6.1 pode ser aproximada por uma série de Taylor, no qual somente o primeiro termo da série é usado. Assim a equação 6.1 pode ser reescrita como:

$$r_i = \left( \frac{\partial t}{\partial x_i} * \Delta x \right) + \left( \frac{\partial t}{\partial y_i} * \Delta y \right) + \left( \frac{\partial t}{\partial z_i} * \Delta z \right) + \Delta t \quad (6.2)$$

Em forma matricial, tem-se:

$$r = G * \Delta x \quad (6.3)$$

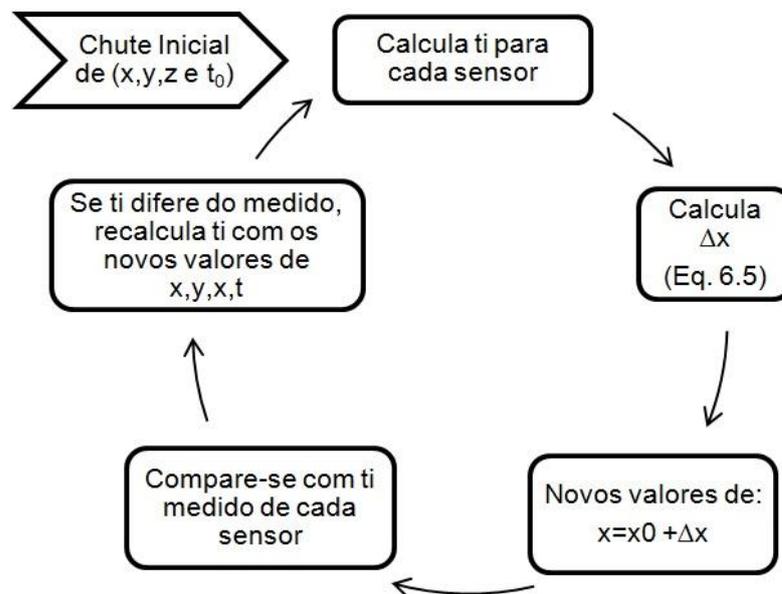
onde G é a matriz das derivadas parciais, r é o vetor de tempo ( $t_i$ ) para cada sensor e  $\Delta x$  é o vetor correção. A derivada parcial de um componente de G é dada pela equação 6.4.

$$\frac{\partial t}{\partial x_i} = \frac{(x - x_i)}{C_p} * \frac{1}{\sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2}} \quad (6.4)$$

Para calcular o vetor correção, a equação 6.3 é resolvida por inversão de matriz, dada por:

$$\Delta x = (G^T G)^{-1} G^T r \quad (6.5)$$

O processo iterativo está indicado no histograma a seguir:



### APÊNDICE III – AMOSTRAS ENSAIADAS

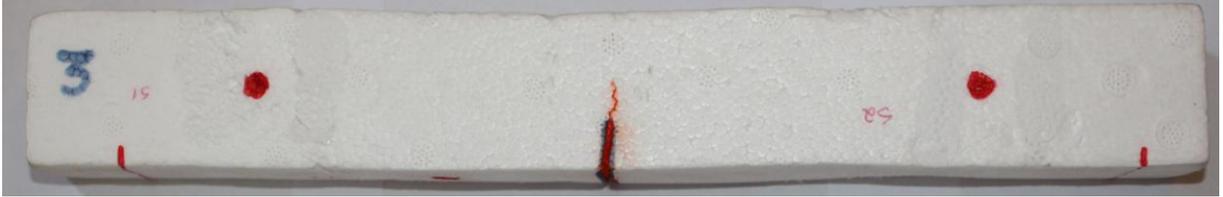


Figura AP-6- 4 – Amostra com pré-trinca após ensaio.



Figura AP-6- 5 – Amostra sem pré-trinca após ensaio.

### APÊNDICE IV – CARREGAMENTO

A seguir é apresentado o carregamento versus deslocamento para a amostra sem pré-trinca, utilizado na obtenção do módulo de elasticidade.

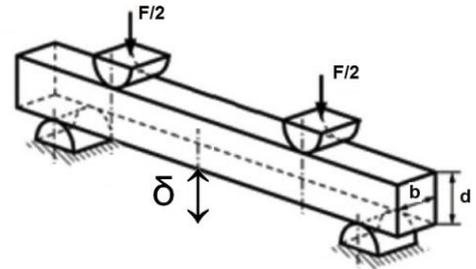
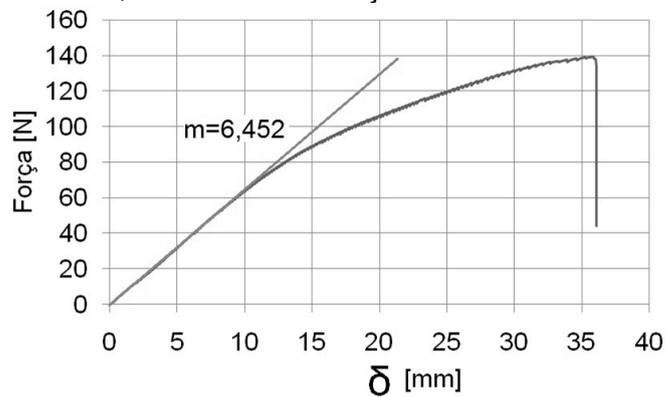


Figura AP-6- 6 – Carregamento e deslocamento para a amostra sem pré-trinca.