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

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

por

Rodolfo da Silva Rodrigues

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

Porto Alegre, Dezembro de 2012.

Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Escola de Engenharia

Departamento de Engenharia Mecânica

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

por

Rodolfo da Silva Rodrigues

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. Dr. Arnaldo Ruben Gonzalez
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Mecânica dos Sólidos**

Orientador: Prof. Dr. Ignacio Iturrioz

Comissão de Avaliação:

Profª. Drª. Letícia Fleck Fadel Miguel

Prof. Dr. Juan Pablo Raggio Quintas

Prof. Dr. Edson Hikaro Aseka

Porto Alegre, 17 de dezembro de 2012.

Dedico esse trabalho aos meus pais, Joelci e Nadir,
e ao meu irmão, Álvaro.

AGRADECIMENTO

Em primeiro lugar, agradeço ao Prof. Dr. Ignacio Iturrioz, pelos ensinamentos e pelo apoio durante toda a minha formação.
Aos colegas Adriel Liamar Justen e Lisandro Maders pela ajuda durante o desenvolvimento desse trabalho.
Aos meus pais, Joelci e Nadir, agradeço pelo suporte e pela compreensão durante todos esses anos. Agradeço, também, por serem um constante exemplo na minha vida, e por tudo que já me ensinaram.
Ao meu irmão, Álvaro, pelo companheirismo incondicional que se torna maior a cada dia.
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

RODRIGUES, R. S. **Aplicação de técnicas de emissão acústica na localização de dano em estruturas**. 2012. 31f. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

RESUMO

Técnicas de medição relacionadas com a interpretação de ondas que são transmitidas nos sólidos, para monitorar e/ou explorar as características do mesmo, têm crescido bastante atualmente, devido ao desenvolvimento de técnicas mais precisas, para a análise e interpretação dos resultados, e aos sensores, cada vez mais baratos e precisos. No caso específico da emissão acústica, as fontes emissoras são as rupturas, que geram ondas elásticas quando aparecem e se propagam em corpos submetidos a cargas. Simulações numéricas, desse tipo de ensaio de emissão acústica, podem ser de grande valia auxiliando na interpretação dos sinais capturados experimentalmente. Neste sentido o Método dos Elementos Discretos, que consiste num arranjo de barras, onde a rigidez das mesmas é equivalente ao contínuo que se quer representar, e onde a ruptura é representada pela retirada das barras que esgotaram sua resistência, levando em conta o balanço das energias envolvidas, é uma alternativa para auxiliar na interpretação dos eventos de emissão acústica. Neste contexto, no presente trabalho se realizaram avanços no sentido de calibrar o método dos elementos discretos, para simular um ensaio de emissão acústica. Os ensaios foram realizados em geometrias simples de isopor, material de baixo custo, com comportamento frágil e baixa rigidez, o que o torna adequado para trabalhar com os sensores utilizados. Foram determinados parâmetros mecânicos do material utilizado, tais como, módulo de elasticidade e taxa de liberação de energia de deformação, e, posteriormente, se testaram técnicas de localização da posição da fonte, a partir da medição dos sinais de vários sensores. Estes mesmos ensaios foram simulados com o método citado, com resultados similares. Comentários sobre as dificuldades na realização dos ensaios e na implementação numérica são realizados no fim do trabalho.

Palavras-chave: *emissão acústica, localização de dano, Método dos Elementos Discretos.*

RODRIGUES, R. S. **Application of acoustic emission techniques in the localization of damage in structures**. 2012. 31f. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

ABSTRACT

Measurement techniques related to the interpretation of waves that are transmitted in solids, to monitor and/or exploit the properties of them, have grown, nowadays, due to the development of more accurate techniques, for the analysis and interpretation of results, and sensors increasingly inexpensive and accurate. In the specific case of acoustic emission, the emission sources are the cracks, which generate elastic waves when they appear and grow in bodies subjected to loads. Numerical simulations, of this kind of acoustic emission testing, can be valuable in helping interpret the signals captured experimentally. In this sense the Discrete Element Method, which is an arrangement of bars, where the mechanical properties are equal to those of the material which it wants to represent, and where the crack is represented by removal of the bars, which have exhausted their resistance, considering the balance of energies involved, is an alternative to assist in the interpretation of acoustic emission events. In this context, in the present paper advances were made in order to calibrate the discrete element method to simulate an acoustic emission test. Tests were performed in simple geometries of Styrofoam, a low cost material with brittle behaviour and low stiffness, which makes it suitable to work with the sensors used. Were determined mechanical parameters of the material used, such as Young's modulus and strain energy release rate, and, subsequently, location techniques were used to determinate the source position, with the measurement of the signals of various sensors. These same tests were simulated, by the method mentioned above, with similar results. Comments about the difficulties in carrying out the tests and numerical implementations are conducted at the end of the paper.

Keywords: *acoustic emission, damage localization, Discrete Element Method.*

SUMÁRIO

AGRADECIMENTO iv
1 INTRODUÇÃO 1
2 FUNDAMENTAÇÃO 1
2.1 Método dos Elementos Discretos 1
2.1.1 Lei constitutiva não linear para representação do dano em materiais 3
2.2 Emissão Acústica 4
2.2.1 Parâmetros dos sinais de Emissão Acústica 5
2.2.2 Ondas Elásticas 5
2.2.3 Técnica de localização: Método da Hipérbole 5
2.3 Taxa de Liberação de Energia de Deformação 6
3 METODOLOGIA 6
3.1 Cálculo dos Parâmetros Mecânicos do Material 6
3.1.1 Módulo de Elasticidade (E) 6
3.1.2 Taxa de liberação de energia de deformação (G_f) 7
3.1.3 Densidade (ρ) 8
3.1.4 Fator de Falha (R_f) 8
3.2 Emissão Acústica 9
3.2.1 Ensaios Experimentais 9
3.2.2 Simulação Numérica 9
3.2.3 Técnica de localização 10
3.3 Validação 10
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO 10
4.1 Cálculo dos Parâmetros Mecânicos do Material 10
4.1.1 Módulo de Elasticidade (E) 10
4.1.2 Taxa de liberação de energia de deformação (G_f) 11
4.1.3 Densidade (ρ) 11
4.1.4 Fator de Falha (R_f) 11
4.2 Emissão Acústica 12
4.2.1 Ensaios Experimentais 12
4.2.2 Simulação Numérica 13
4.2.3 Técnica de Localização 13
4.3 Validação 14
5 CONCLUSÃO 15
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 15
ANEXO I - EQUIPAMENTOS USADOS NO ENSAIO 16
APÊNDICE I - METODOLOGIA DE CÁLCULO DA VELOCIDADE 17

APÊNDICE II - LIMITE DOS ENSAIOS E DA SIMULAÇÃO 18
APÊNDICE III - SINAL MEDIDO PELOS MICROFONES 19
APÊNDICE IV - MÉTODO DA HIPÉRBOLE 20

LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1 - Estratégia de discretização no DEM: (a) Módulo cúbico básico, (b) Geração de um corpo prismático com DEM e (c) Lei bi-linear utilizada nos elementos discretos..... 2
Figura 2-2 - (a) Comparação entre técnicas não-destrutivas ativas e passivas. (b) Evento típico de emissão acústica onde os principais parâmetros foram indicados 4
Figura 2-3 – (a) Exemplo de uma hipérbole, (b) Método da Hipérbole. 5
Figura 3-1 - (a) Ensaio para determinar o módulo de elasticidade, (b) corpo de prova. 6
Figura 3-2 – (a) Ensaio para determinar o G_f, (b) Fator de intensidade de tensão para vigas com seção retangular à flexão, com espessura unitária..... 7
Figura 3-3 - (a) ensaio experimental, (b) simulação numérica..... 9
Figura 4-1 - Gráfico de dispersão para determinar *E*..... 11
Figura 4-2 - (a) resposta, normalizada, do primeiro microfone, do corpo de prova 1, no ensaio experimental. (b) detalhe da posição de medição do tempo de chegada. 12
Figura 4-3 - (a) resposta, normalizada, para o primeiro microfone, na simulação numérica. (b) detalhe da posição de medição do tempo de chegada..... 13
Figura 4-4 - Método da hipérbole no (a) CP 01 do ensaio experimental e na (b) simulação numérica. 14
Figura AI-1 - Microfone usado no ensaio. 16
Figura AI-2 - Equipamentos usados: (a) amplificador e (b) computador com o software PULSE..... 16
Figura API-1 - Metodologia para determinar a velocidade de propagação da onda-P. 17
Figura APIII-1 - Corpo de prova 01, ensaio experimental..... 19
Figura APIII-2 - Corpo de prova 02, ensaio experimental..... 19
Figura APIII-3 - Corpo de prova 03, ensaio experimental..... 19
Figura APIII-4 - Simulação numérica..... 19
Figura APIV-1 - Método da hipérbole no (a) corpo de prova 1 e no (b) corpo de prova 2 do ensaio experimental. 20
Figura APIV-2 - Método da hipérbole no (a) corpo de prova 3 do ensaio experimental e na (b) simulação numérica. 20

LISTA DE TABELAS

Tabela 4-1 - Dados do ensaio do módulo de elasticidade. 10
Tabela 4-2 - Dados do ensaio da taxa de liberação de energia de deformação. 11
Tabela 4-3 - Dados do ensaio do fator de falha. 12
Tabela 4-4 - Tempos de chagada, em segundos, obtidos nos ensaios experimentais. 12
Tabela 4-5 - Tempos de chegada, em segundos, obtidos na simulação numérica..... 13
Tabela 4-6 - Resultado da técnica de localização. 14
Tabela 4-7 - Valores para a velocidade de propagação da onda-P. 14

1 INTRODUÇÃO

Sem dúvida, as técnicas de emissão acústica tem aumentado sensivelmente sua potencialidade ao utilizar técnicas de análise desenvolvidas e usadas na sismologia. Isto foi feito ao verificar-se que certos conceitos são válidos, independente da escala estudada, e que o evento de emissão acústica e o registro de um sismo em estruturas na escala de metros, como prédios, equipamentos ou corpos de prova ensaiados em laboratório, são semelhantes. A aplicação da emissão acústica no campo da mecânica dos sólidos tem sofrido um sensível aumento nos últimos anos, em parte, devido à melhoria dos equipamentos experimentais, mais modernos, que permitem realizar a captura de sinais com maior precisão, equipamentos mais econômicos e, além disso, devido ao desenvolvimento de novas técnicas de análise, entre elas, a utilização de métodos numéricos para representar o comportamento do sólido na simulação do registro da emissão acústica.

Entre eles, o método dos elementos discretos, que modela o contínuo como um arranjo regular de barras, onde sua rigidez é equivalente ao contínuo que se quer representar. O método é hábil na simulação de fratura e fragmentação de corpos, sendo que, quando uma barra do modelo esgota sua resistência, ela é retirada do mesmo, respeitando o balanço das energias envolvidas no processo.

A emissão acústica é utilizada no controle preventivo de equipamentos e também no estudo de novos materiais. E ela pode ser aplicada durante o funcionamento do equipamento, e faz a detecção do dano no momento em que este aparece.

Na técnica de emissão acústica, pode ser de utilidade estudar a evolução do dano e também a sua localização.

Neste contexto é possível definir os objetivos do presente trabalho:

Objetivo Geral: Verificar, experimentalmente e teoricamente, técnicas de localização de fontes de excitação, a partir do registro de emissão acústica de vários sensores.

Objetivos Específicos:

- Determinar, experimentalmente, os parâmetros que definem o comportamento do material utilizado no ensaio.
- Realizar medições de eventos de emissão acústica, e com as mesmas, aplicar o Método da Hipérbole (Othsu & Roose, 2009), para localizar a fonte da excitação.
- Verificar, numericamente, utilizando o método dos elementos discretos, os resultados obtidos experimentalmente.

Estrutura do Trabalho: Após a presente introdução, na seção 2, se apresenta a fundamentação teórica do trabalho, explicando, principalmente, o método dos elementos discretos e as técnicas de emissão acústica. Na seção 3 é feita a descrição da metodologia usada no trabalho. Na seção 4 os resultados são apresentados, e, por fim, na seção 5, é feita a conclusão do trabalho.

2 FUNDAMENTAÇÃO

2.1 Método dos Elementos Discretos

O Método dos Elementos Discretos (Discrete Element Method, DEM), utilizado neste trabalho, representa o contínuo por meio de um arranjo periódico, formado por barras, com a massa do contínuo concentrada nos nós. A massa concentrada ($\rho L^3/2$) corresponde a um nó interno onde ρ é a densidade e L é o comprimento do módulo cúbico. Os nós com massas (

$\rho L^3/16$), ($\rho L^3/8$) e ($\rho L^3/4$) são localizados nos cantos, bordas e superfícies livres, respectivamente. A discretização utilizada, emprega um módulo cúbico básico formado por 20 elementos e 9 nós, apresentados nas Figura 2-1a e b. Cada nó tem três graus de liberdade, que correspondem as componentes do vetor de deslocamentos, num sistema de referências global.

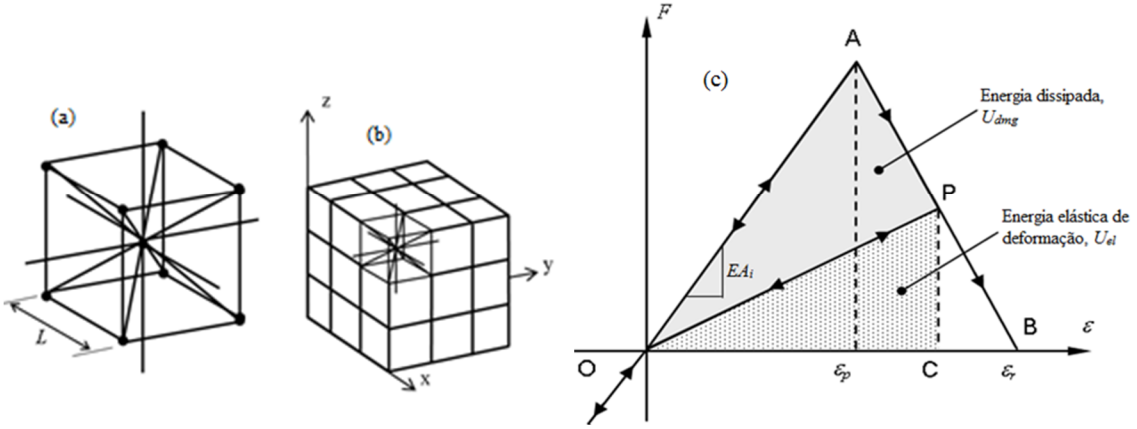

Figura 2-1 - Estratégia de discretização no DEM: (a) Módulo cúbico básico, (b) Geração de um corpo prismático com DEM e (c) Lei bi-linear utilizada nos elementos discretos.

No caso de um corpo isotrópico e elástico, a área transversal das barras longitudinais, A_l, esta definida pela Equação 2.1:

$$A_l = \phi L^2 \tag{2.1}$$

onde, L é o comprimento do módulo cúbico em consideração. A função $\phi = (9+8\delta)/(18+24\delta)$, onde $\delta = 9\nu/(4-8\nu)$, leva em conta o efeito de Poisson ν. Similarmente, a área A_d, das barras diagonais, é:

$$A_d = \frac{2}{\sqrt{3}}\delta\phi L^2 \tag{2.2}$$

O coeficiente $2/\sqrt{3}$, na Equação 2.2, leva em conta a diferença entre os comprimentos das barras longitudinais e diagonais, ou seja, $L = 2/\sqrt{3}\cdot L_d$.

Para se chegar à expressão do ϕ, é necessário realizar a equivalência entre a matriz de coeficientes elásticos isótropos e as propriedades direcionais das barras, como foi proposto por Nayfes Heftzy (1978).

A equação de movimento, resultante da discretização espacial, pode ser escrita como segue:

$$\mathbf{M}\ddot{\vec{\mathbf{x}}} + \mathbf{C}\dot{\vec{\mathbf{x}}} + \vec{\mathbf{F}}(t) - \vec{\mathbf{P}}(t) = 0 \tag{2.3}$$

onde, $\vec{\mathbf{x}}$, $\dot{\vec{\mathbf{x}}}$ e $\ddot{\vec{\mathbf{x}}}$ denotam os vetores contendo os deslocamentos, as velocidades e as acelerações nodais, respectivamente, **M** e **C** são as matrizes de massa e de amortecimento, as duas são diagonais e a matriz de amortecimento é proporcional à massa. Os vetores $\vec{\mathbf{F}}(t)$ e $\vec{\mathbf{P}}(t)$ representam, respectivamente, as forças nodais internas e externas.

Seguindo o critério de Courant-Friedrichs-Lewy (Bathe, 1996), a estabilidade do sistema de integração, está relacionada com o nível da discretização. Para a presente

implementação, os elementos menores serão os diagonais e o passo de tempo de integração será limitado pela Equação 2.4.

$$\Delta t \leq \frac{0.6L}{C_\rho} \tag{2.4}$$

onde, C_ρ é a velocidade de propagação das ondas elásticas longitudinais nas barras, mostrada na Equação 2.5 (Potel, 2009).

$$C_\rho = \sqrt{\frac{(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)}}\sqrt{\frac{E}{\rho}} \tag{2.5}$$

2.1.1 Lei constitutiva não linear para representação do dano em materiais

Rocha et al. (1991) estendeu o método dos elementos discretos para modelar o comportamento de materiais quase frágeis. Para isso ele utilizou uma lei bi-linear apresentada na Figura 2-1c. Esta lei constitutiva permite capturar os efeitos irreversíveis da nucleação de fissuras e da sua posterior propagação, levando em conta a redução da capacidade de carga. A área fechada pela curva força vs deformação (triangulo OAB na Figura 2-1c), representa a densidade de energia necessária para fraturar a área de influência do elemento. Assim, para um dado ponto *P* na curva força vs deformação, a área do triangulo *OPC* representa, a densidade de energia elástica guardada no elemento, que pode ser devolvida ao sistema, e a área do triangulo *OAP* é a densidade de energia dissipada na fratura. Quando a densidade de energia dissipada é igual à energia de fratura necessária para romper um elemento, este perde sua capacidade de carga à tração. Por outro lado, na compressão, o comportamento do elemento permanece linear elástico. Assim a falha em compressão é induzida por tração indireta.

São detalhados, a seguir, os significados dos símbolos apresentados na Figura 2-1c:

- *Força, F*: a força axial do elemento, como uma função da deformação longitudinal ε.
- *Área do elemento, A*: dependendo se é considerado um elemento longitudinal ou diagonal, o valor é A_l ou A_d, respectivamente.
- *Rigidez do elemento*: dependendo se é considerado um elemento longitudinal ou diagonal, ela é obtida pela multiplicação do Módulo de Elasticidade (*E*) por A_l ou A_d, respectivamente.
- *Tamanho do módulo cúbico do DEM, L.*
- *Taxa de liberação de energia de deformação,* G_f: a energia de fratura por unidade de área. Essa propriedade também é conhecida como *Energia específica de fratura* ou *Tenacidade*.
- *Área de fratura equivalente,* A_i^f : esse parâmetro reforça a condição de que a energia dissipada pela fratura do contínuo é equivalente à dissipada no modelo numérico.
- *Deformação de falha crítica* (ε_p): a máxima deformação obtida pelo elemento antes do inicio do dano (ponto A na Figura 2-1c). A relação entre ε_p e a taxa de liberação de energia de deformação, G_f, é dada em termos da Mecânica da Fratura Linear Elástica, como é mostrado na Equação 2.6.

$$\varepsilon_p = R_f\sqrt{\frac{G_f}{E\left(1-\nu^2\right)}} \tag{2.6}$$

onde, R_f é chamado de fator de falha, que leva em conta a presença de um defeito intrínseco de tamanho *d*. R_f é definido como:

$$R_f = \frac{1}{Y\sqrt{d}} \tag{2.7}$$

onde, *Y* é um parâmetro adimensional, que depende do espécime e da geometria da fratura.

É importante notar que, o tamanho do defeito intrínseco, *d*, é predeterminado, e pode ser considerado uma propriedade do material.

Quaisquer desordens nas propriedades do material podem ser introduzidas no modelo por uma distribuição randômica da taxa de liberação de energia de deformação, G_f.

- *Deformação limite* (ε_r): o valor da deformação para a qual o elemento perde sua capacidade de ser carregado (ponto C na Figura 2-1c).

Uma explicação mais extensa para essa versão do modelo pode ser encontrada em Kostesky (2011), (2012).

2.2 Emissão Acústica

A emissão acústica consiste na captura, utilizando sensores estrategicamente localizados, das ondas elásticas que emanam da região onde acontece uma ruptura dentro do material.

As técnicas de emissão acústica são consideradas únicas dentro da área de ensaios não-destrutivos, pois, diferente da maioria dos métodos não-destrutivos, na emissão acústica, os ensaios são, geralmente, aplicados durante o funcionamento, ou carregamento, da estrutura estudada. Além disso, a emissão acústica pode detectar a fratura nos primeiros estágios de ocorrência, muito antes que a estrutura falhe completamente.

Outra característica interessante da emissão acústica é que, como o método detecta as ondas elásticas emitidas pelo crescimento da fratura, ele é considerado uma técnica de ensaio não-destrutivo passiva. A distinção entre técnicas passivas e ativas pode ser observada na Figura 2-2a. Basicamente, as técnicas ativas utilizam uma fonte externa para gerar um sinal que, depois de passar pelo material, chega a algum receptor. Já no caso das técnicas passivas não é usado uma fonte externa, pois a própria fratura serve como fonte geradora de sinal, somente sendo necessário o posicionamento de receptores no corpo da estrutura.

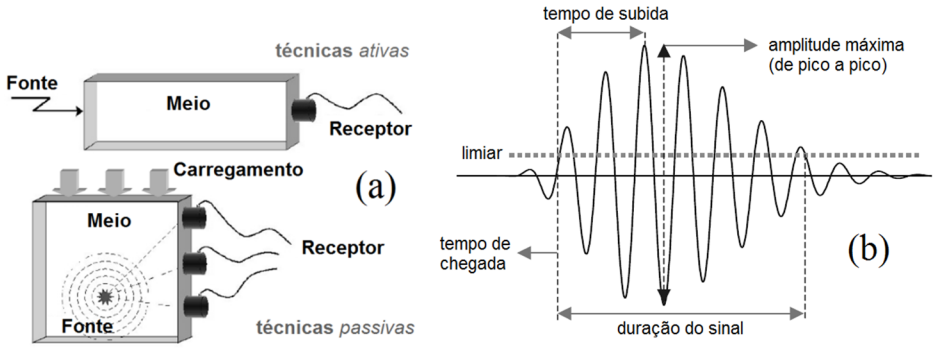

Figura 2-2 - (a) Comparação entre técnicas não-destrutivas ativas e passivas. (b) Evento típico de emissão acústica onde os principais parâmetros foram indicados

2.2.1 Parâmetros dos sinais de Emissão Acústica

Um evento típico de emissão acústica, apresentado na Figura 2-2b, pode ser caracterizado pelos seguintes parâmetros:

- Limiar (*trigger level*) é o nível de valores de amplitude, a partir do qual, o sinal é considerado um evento de emissão acústica.
- Tempo de subida (*rise time*) é o tempo entre o primeiro valor de amplitude que passa pelo limiar até o valor máximo de amplitude.
- Amplitude máxima (*max. amplitude*) é, como o nome já diz, o valor máximo da amplitude da onda, considerado de um pico a outro.
- Tempo de chegada (*arrival time*) é o tempo até que o limiar seja cruzado pela primeira vez.
- Duração do sinal (*signal duration*) é o tempo em que o sinal se mantem com amplitudes maiores que o limiar.

2.2.2 Ondas Elásticas

Os sinais de emissão acústica são formados por ondas elásticas de vários tipos, as principais 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 é a mais rápida, sendo bastante usada nas análises de localização de dano, juntamente com o parâmetro tempo de chegada. A Equação 2.5 mostra como é determinada a velocidade de propagação da onda-P no material.

2.2.3 Técnica de localização: Método da Hipérbole

Para localizar a fonte de uma excitação, quando a dimensão de profundidade não tem importância, pode-se usar uma técnica de localização planar chamada de método da hipérbole. Essa técnica necessita do uso de, no mínimo, três sensores. Para aplicar a técnica é necessário conhecer a posição dos sensores e o valor do tempo de chegada da onda-P em cada sensor, além, é claro, da velocidade de propagação da onda-P no material estudado.

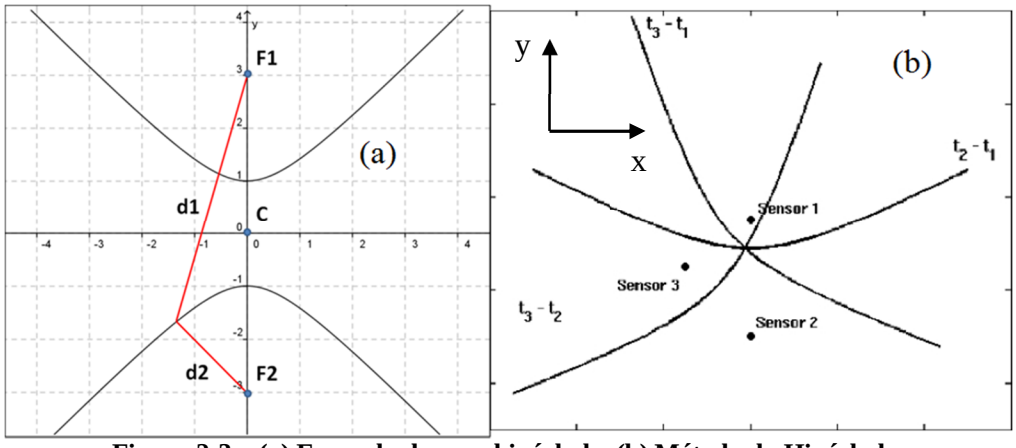

Figura 2-3 – (a) Exemplo de uma hipérbole, (b) Método da Hipérbole.

A hipérbole, como pode ser visto na Figura 2-3a, é formada pelos pontos onde a diferença entre *d1* e *d2* é constante. O método da hipérbole considera dois sensores posicionados nos focos da hipérbole (*F1* e *F2*) e calcula *d1* e *d2* usando os tempos de chegada da onda-P e a velocidade de propagação da mesma. Isso é feito para cada par de sensores,

gerando, no caso de três sensores, três hipérboles. O ponto onde essas três hipérboles se interceptam, como é mostrado na Figura 2-3b, é a fonte do sinal de emissão acústica.

É possível, devido a erros de medição, ruídos e outros problemas similares, que as três hipérboles não se interceptem, quando isso acontece, pode-se usar mais sensores, para aumentar, assim, a precisão do resultado.

2.3 Taxa de Liberação de Energia de Deformação

A taxa de liberação de energia de deformação (G_f), que também é conhecida como energia específica de fratura ou tenacidade, é um importante conceito dentro da Mecânica da Fratura, ele foi determinado por Griffith (1920) apud Branco (1999), para materiais totalmente frágeis, e posteriormente foi generalizado para materiais reais por Irwin (1949) apud Branco (1999). Esse conceito explica a resistência que os materiais apresentam com relação à propagação de trincas. A Equação 2.8 determina o G_f.

$$G_f = -\frac{dU}{dA} \tag{2.8}$$

onde G_f é a taxa de liberação de energia de deformação, U é a energia de deformação interna, e A é a área da trinca.

3 METODOLOGIA

3.1 Cálculo dos Parâmetros Mecânicos do Material

Para fazer a simulação numérica são necessárias algumas propriedades do material estudado, no caso o isopor. Essas propriedades são: módulo de elasticidade (E), taxa de liberação de energia de deformação (G_f), densidade (ρ) e fator de falha (R_f).

Na primeira fase desse trabalho, foram realizados os ensaios necessários para a determinação dessas propriedades, e esses ensaios são descritos a seguir.

3.1.1 Módulo de Elasticidade (E)

Com o intuito de determinar o módulo de elasticidade do isopor, foi realizado um ensaio, onde o isopor foi considerado uma viga engastada-livre com carregamento na ponta, como mostrado na Figura 3-1a.

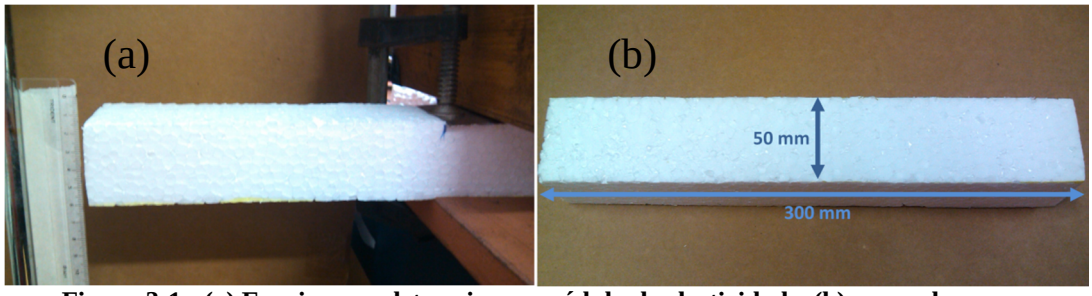

Figura 3-1 - (a) Ensaio para determinar o módulo de elasticidade, (b) corpo de prova.

Foi utilizado nesse ensaio um corpo de prova com perfil quadrado, com 50 mm de lado, e comprimento de 300 mm, como se pode ver na Figura 3-1b.

Durante o ensaio, esse corpo de prova foi engastado, de maneira a deixar, no caso A, 200 mm de distância entre o engaste e o ponto de aplicação da carga, e no caso B, 100 mm entre esses dois pontos, ou seja, se manteve a carga na extremidade livre da viga e a posição do engaste foi modificada.

Foram aplicados diferentes valores de carga, e, para cada valor, se mediu o deslocamento vertical da ponta livre do corpo de prova.

Depois disso, se isolou o módulo de elasticidade na equação da deflexão de uma viga engastada-livre, obtendo-se assim a Equação 3.1, mostrada abaixo.

$$E = \frac{P}{3Iv(x)}\left(\frac{3Lx^2}{2} - \frac{x^3}{2}\right) \tag{3.1}$$

onde, E é o módulo de elasticidade, P é o valor da carga, I é o momento de inércia, L é a distância entre o ponto de aplicação da carga e o engaste, e $v(x)$ é o valor do deslocamento vertical em um ponto com distância x a partir do engaste.

Aplicando, na Equação 3.1, os valores de carga e deslocamento obtidos nos ensaios, foi possível obter valores para o módulo de elasticidade.

Esses valores, juntamente com os valores da carga, foram usados para gerar um gráfico de dispersão, com valores de tensão vs deformação. Foi criada uma curva de tendência linear nesse gráfico, e o E foi determinado como sendo o coeficiente angular da equação dessa curva.

3.1.2 Taxa de liberação de energia de deformação (G_f)

Para a determinação da taxa de liberação de energia de deformação do isopor, foram utilizados corpos de prova com as mesmas dimensões daqueles usados na análise do módulo de elasticidade (Figura 3-1b), porem, para esse ensaio, foi feito, nesses corpos de prova, um entalhe, a 200 mm da ponta livre do corpo de prova, com 10 mm de profundidade, como é mostrado na Figura 3-2a. A figura também mostra a trinca propagando.

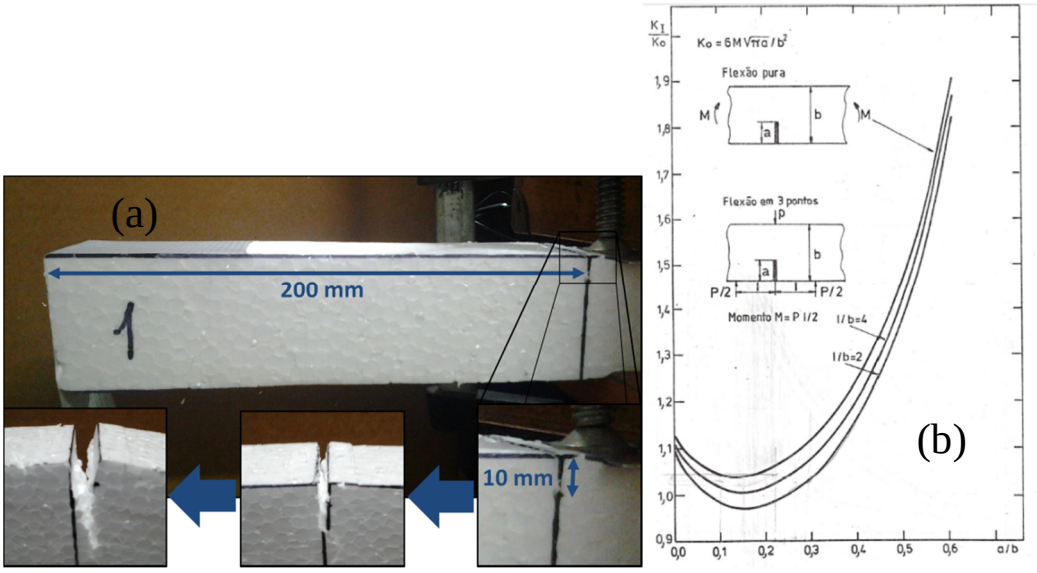

Figura 3-2 – (a) Ensaio para determinar o G_f, (b) Fator de intensidade de tensão para vigas com seção retangular à flexão, com espessura unitária.

Para determinar essa propriedade foi usado um método mostrado em Branco (1999), e ilustrado na Figura 3-2b, onde se carregava o corpo de prova até que a pré-trinca se propague de forma instável.

A equação mostrada na Figura 3-2b serve para um corpo com espessura unitária (no caso, 1 metro), como nesse ensaio o corpo de prova não tinha esse valor de espessura, essa equação teve que ser modificada, além disso, para o caso testado, o valor do momento (*M*) é a carga (*P*) vezes a distância entre o ponto de aplicação da carga e o entalhe (*L*). Dessa maneira se obteve a Equação 3.2.

$$K_0 = \frac{6PL\sqrt{\pi a}}{b^2 e} \tag{3.2}$$

onde K_0 é o fator de intensidade de tensão de referência, *P* é a carga em que a fratura começa, *L* é a distância entre o ponto de aplicação da carga e o entalhe, *a* é a profundidade do entalhe, *b* é a altura do perfil da viga, e *e* é a espessura do perfil da viga.

Aplicando, na Equação 3.2, o valor da carga obtido no ensaio, se chegou ao valor de K_0, que, através da Figura 3-2b e dos valores para *a/b* e *L/b*, foi usado para encontrar o valor de K_I.

Esse valor foi, então, aplicado na Equação 3.3, mostrada a seguir, para se obter, em fim, o valor da taxa de liberação de energia de deformação, G_f.

$$G_f = \frac{{K_I}^2}{E} \tag{3.3}$$

onde G_f é a taxa de liberação de energia de deformação, K_I é o fator de intensidade de tensão para o modo I, e *E* é o módulo de elasticidade.

Cabe salientar que, para realizar o cálculo da taxa de liberação de energia de deformação, existem cuidados a serem levados em conta, a respeito do tamanho do corpo de prova, da forma de aplicar a carga, entre outros. Para materiais usualmente utilizados em engenharia, isso é especificado em normas. Não foram levados em conta esses cuidados, considerando que, dentro dos objetivos do ensaio, a ordem de grandeza da variabilidade encontrada, entre um ensaio e outro, é aceitável.

3.1.3 Densidade (ρ)

Para obter o valor da densidade do isopor, foi feita a pesagem de um corpo de prova, com seção quadrada, com as mesmas dimensões mostradas anteriormente na Figura 3-1b. O valor da massa do corpo de prova foi, então, dividido pelo seu volume, chegando-se ao valor da densidade.

3.1.4 Fator de Falha (R_f)

O fator de falha, descrito na seção na qual o método dos elementos discretos foi explicado, é obtido a partir da deformação na qual o corpo começa a romper, chamada de ε_p, dentro do contexto do método dos elementos discretos.

O ensaio para determinar o valor do fator de falha, consistiu em carregar o corpo de prova, da mesma maneira que foi feito no caso A do ensaio do módulo de elasticidade. Foi usado, novamente, um corpo de prova com as dimensões mostradas na Figura 3-1b, a única diferença é que, dessa vez, o corpo de prova teve que ser carregado até que o mesmo começasse a romper. Com esse valor de carga, se usou a Equação 3.4 para determinar a tensão máxima no momento em que a falha se inicia no corpo de prova.

$$\sigma = \frac{PL\frac{b}{2}}{I} \tag{3.4}$$

onde σ é a tensão, P é a carga na qual a ruptura teve início, L é a distância entre o ponto de aplicação da carga e o engaste, b é a altura do perfil e I é o momento de inércia da seção.

Utilizando a lei de Hooke para achar, a partir desta tensão, a deformação na qual o corpo de prova começa a romper, ε_p, é possível, aplicando a Equação 2.6, achar uma estimativa para o fator de falha, R_f.

3.2 Emissão Acústica

3.2.1 Ensaios Experimentais

Os sinais de emissão acústica foram obtidos através do ensaio de placas com dimensões de 400x400x50 mm, onde quatro microfones foram posicionados e uma excitação foi aplicada, como indica a Figura 3-3.

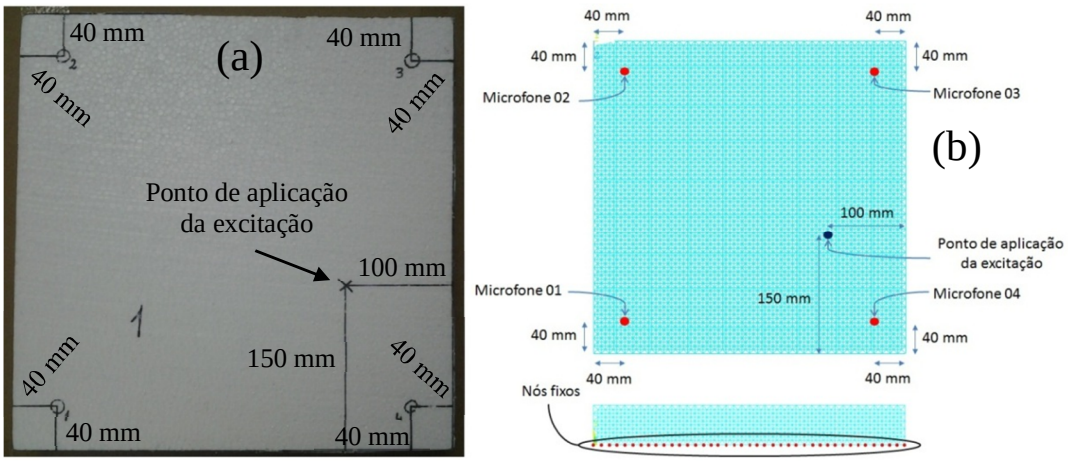

Figura 3-3 - (a) ensaio experimental, (b) simulação numérica.

Além disso, nesse ensaio, também foi colocado um quinto microfone, longe do corpo de prova, com o objetivo de captar somente os ruídos do ambiente.

Esse ensaio consistiu em aplicar uma excitação no lugar indicado, em cada um dos três corpos de prova, enquanto a aquisição de dados era feita, através de equipamentos da marca Brüel & Kjær, descritos no Anexo I desse trabalho. Estes equipamentos foram utilizados, no laboratório do Grupo de Mecânica Aplicada do Departamento de Engenharia Mecânica da UFRGS.

Cabe salientar que, como a excitação foi produzida por um pulso aplicado no corpo de prova, como é indicado na Figura 3-3, não foi produzido dano na estrutura. Desta forma não são esperadas rupturas internas no material durante os ensaios. Os parâmetros mecânicos relacionados com fratura do material e com a calibração do modelo, para simular a ruptura, não eram necessárias para este estudo, mas serão de extrema utilidade para a continuação do mesmo.

3.2.2 Simulação Numérica

A simulação numérica foi implementada utilizando o método dos elementos discretos. O modelo teve a mesma dimensão que as placas estudadas, gerando-se um prisma de 40x40x5

módulos cúbicos de dimensão 0,01 m. Um layout do modelo implementado se apresenta na Figura 3-3b. A posição dos microfones e condições de contorno também são mostrados nesta figura.

3.2.3 Técnica de localização

Os sinais obtidos nos ensaios experimentais e na simulação numérica foram aplicados no método da hipérbole, já explicado na fundamentação desse trabalho, a fim de analisar a localização da fonte do evento, e compará-lo com o local real em que a excitação foi aplicada.

3.3 Validação

Para garantir que a implementação numérica é coerente com a realidade, foram comparados os valores da velocidade de propagação da onda-P obtidos no ensaio experimental e na simulação numérica. A metodologia para a determinação dessas velocidades é mostrada no Apêndice I.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Cálculo dos Parâmetros Mecânicos do Material

4.1.1 Módulo de Elasticidade (*E*)

Com as dimensões do corpo de prova, mostradas na Figura 3-1b, e empregando a metodologia já descrita, foi possível calcular os valores de *E*, apresentados na Tabela 4-1.

Tabela 4-1 - Dados do ensaio do módulo de elasticidade.

	CP 01 - Caso A		**CP 01 - Caso B**	
Massa (g)	Deslocamento Vertical (mm)	Módulo de Elasticidade (N/m²)	Deslocamento Vertical (mm)	Módulo de Elasticidade (N/m²)
21,10	0,50	2119587,84	0,10	1324742,40
44,30	1,00	2225064,96	0,15	1854220,80
68,50	2,50	1376225,28	0,20	2150352,00
92,60	3,50	1328868,21	0,50	1162759,68
119,20	4,00	1496770,56	0,50	1496770,56
218,00	6,50	1684543,02	1,00	1368691,20
316,90	10,00	1591699,97	1,50	1326416,64
Coeficiente de variação	**CV(E)**	**22%**		

Com esses dados foi possível gerar o gráfico de dispersão mostrado na Figura 4-1. A partir do qual, se determinou que o valor do módulo de elasticidade é 1523955,33 N/m².

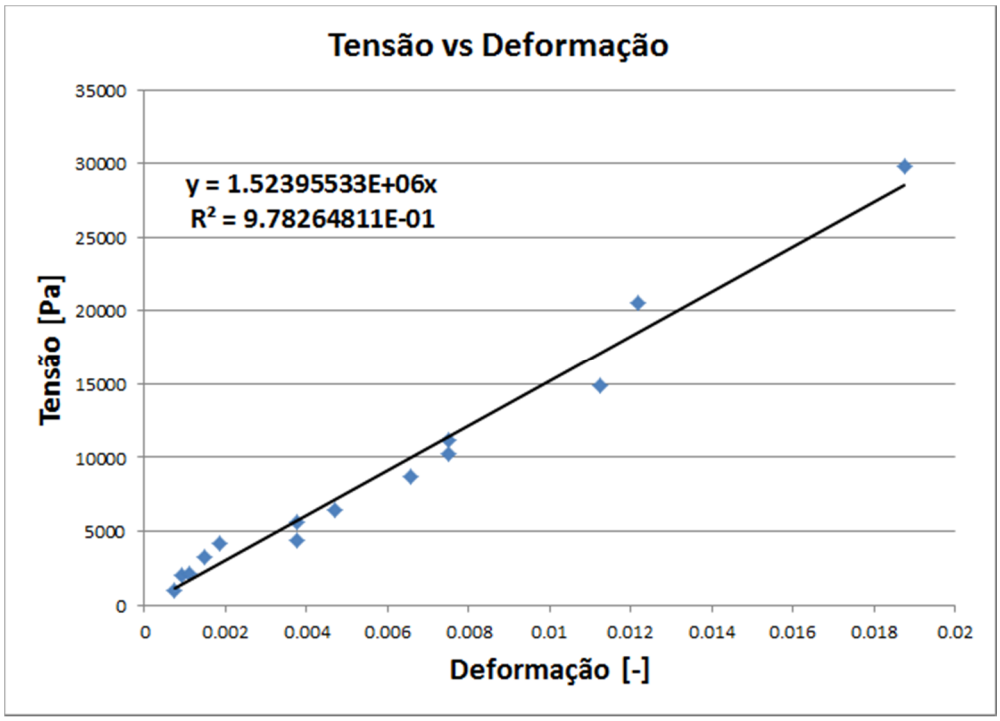

Figura 4-1 - Gráfico de dispersão para determinar *E*.

4.1.2 Taxa de liberação de energia de deformação (G_f)

Com os dados obtidos nos ensaios e seguindo a metodologia explicada anteriormente no trabalho, foi possível obter os resultados apresentados na Tabela 4-2.

Tabela 4-2 - Dados do ensaio da taxa de liberação de energia de deformação.

	P (g)	M (Nm)	K_0 (N/m$^{3/2}$)	K_I (N/m$^{3/2}$)	G_f (N/m)
CP 01	364,30	0,71	6080,99	6233,02	25,49
CP 02	415,00	0,81	6927,29	7100,47	33,08
CP 03	359,00	0,70	5992,52	6142,33	24,76
CP 04	352,40	0,69	5882,35	6029,41	23,85
Média		**G_f =**	**26,80**	**N/m**	
Coeficiente de variação		**CV(G_f) =**	**16%**		

4.1.3 Densidade (ρ)

A pesagem do corpo de prova mostrado na Figura 3-1b, apontou um valor de 0,005 kg. Calculando o volume do corpo, obteve-se um valor igual a 7,5E-4 m^3, o que resultou em uma densidade igual a 6,67 kg/m^3.

4.1.4 Fator de Falha (R_f)

Empregando a metodologia detalhada no trabalho, se realizou o cálculo do fator de falha. Os valores calculados são apresentados na Tabela 4-3.

Tabela 4-3 - Dados do ensaio do fator de falha.

	P (g)	σ (N/m^2)	ε	R_f (m$^{-1/2}$)
CP 01	790,40	74436,71	0,04630	11,04
CP 02	716,20	67448,85	0,04196	10,00
CP 03	886,80	83515,28	0,05195	12,39
CP 04	782,70	73711,56	0,04585	10,93
Média	**R_f =**	**11,10**	**m$^{-1/2}$**	

Cabe observar que, para a discretização utilizada, o valor de R_f calculado seria maior que o máximo permitido, de acordo com parâmetros internos do método (Kostesky, 2011, 2012). Como no problema a ser resolvido não será modelado o dano da estrutura, foi utilizado na simulação um valor menor, que é compatível com a discretização utilizada, de 8,0 m$^{-1/2}$.

4.2 Emissão Acústica

4.2.1 Ensaios Experimentais

Na Figura 4-2a é mostrada a resposta obtida, no corpo de prova 1, para o primeiro microfone. No Apêndice III, desse trabalho, o sinal dos outros microfones é mostrado, com exceção do microfone 5, que não foi explorado nesse trabalho.

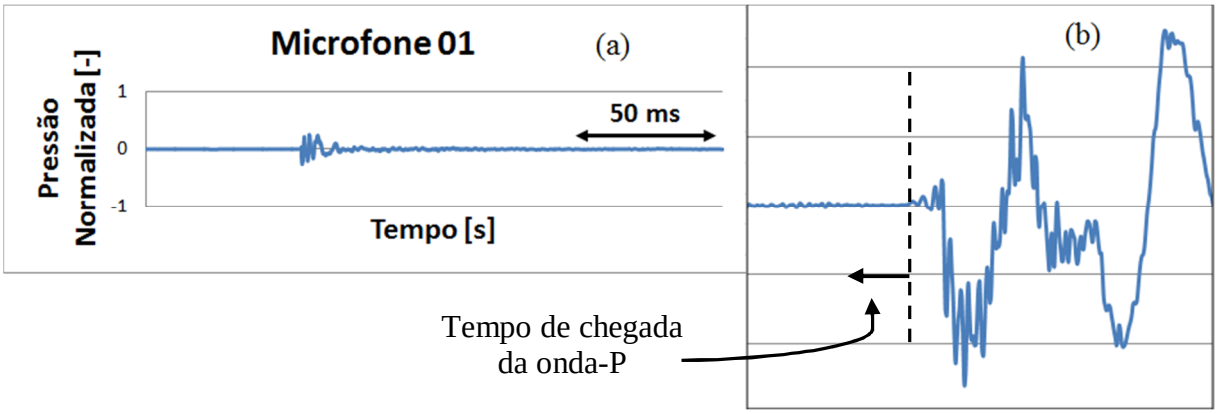

Figura 4-2 - (a) resposta, normalizada, do primeiro microfone, do corpo de prova 1, no ensaio experimental. (b) detalhe da posição de medição do tempo de chegada.

Através dos sinais captados com os microfones, foi possível medir o tempo de chegada, da onda-P, em cada um dos quatro microfones, nos três corpos de prova. Esses valores são mostrados na Tabela 4-4, e foram medidos, na posição mostrada pela linha tracejada na Figura 4-2b, com relação ao início dos ensaios, e não ao momento de aplicação da excitação.

Tabela 4-4 - Tempos de chagada, em segundos, obtidos nos ensaios experimentais.

	CP 01	CP 02	CP 03
Microfone 01	3,85355	3,31655	1,94907
Microfone 02	3,85366	3,31659	1,94911
Microfone 03	3,85350	3,31650	1,94902
Microfone 04	3,85334	3,31630	1,94885

4.2.2 Simulação Numérica

Os sinais, captados pelo primeiro microfone na simulação numérica, são mostrados na Figura 4-3a. No Apêndice III é mostrado o resultado dos outros microfones. As pequenas diferenças entre os sinais obtidos no ensaio experimental e na simulação numérica podem ser explicadas devido às limitações de cada caso. Como é mostrado no Apêndice II, para o ensaio, a máxima frequência, que pode ser captada, é 20 kHz, já, para a simulação, esse limite é 115 kHz.

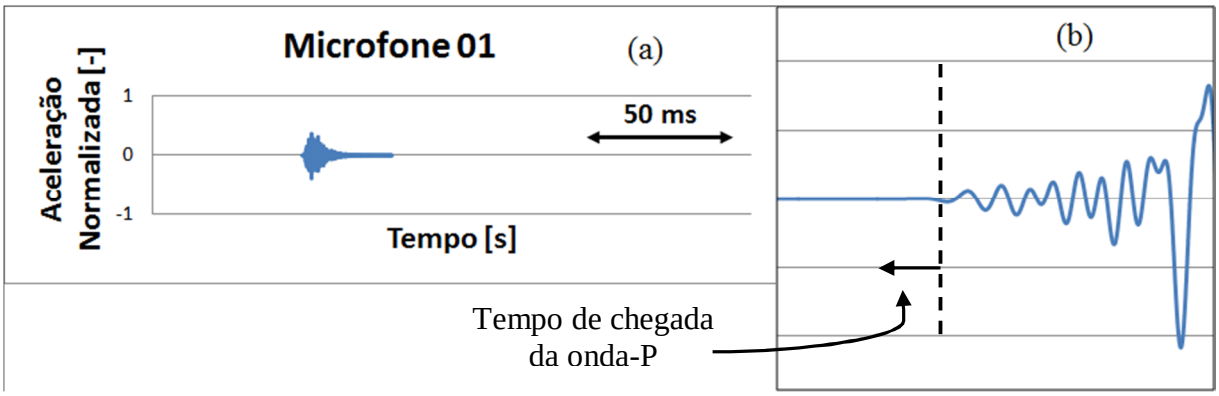

Figura 4-3 - (a) resposta, normalizada, para o primeiro microfone, na simulação numérica. (b) detalhe da posição de medição do tempo de chegada.

Com os sinais dos microfones, foi possível determinar o tempo de chegada, da onda-P, para cada microfone, esses valores são mostrados na Tabela 4-5. Assim como no ensaio experimental, aqui os valores foram medidos com relação ao início do ensaio. A Figura 4-3b mostra a posição, marcada pela linha tracejada, em que esses tempos foram medidos.

Tabela 4-5 - Tempos de chegada, em segundos, obtidos na simulação numérica.

	Tempo de Chegada [s]
Microfone 01	0,00037
Microfone 02	0,00047
Microfone 03	0,00026
Microfone 04	0,00012

4.2.3 Técnica de Localização

Com os dados obtidos nos ensaios e na simulação, foi possível aplicar o método da hipérbole. O resultado disso é mostrado na Figura 4-4, para (a) o primeiro corpo de prova do ensaio experimental e para (b) a simulação numérica. O Apêndice IV mostra os resultados paras os outros corpos de prova.

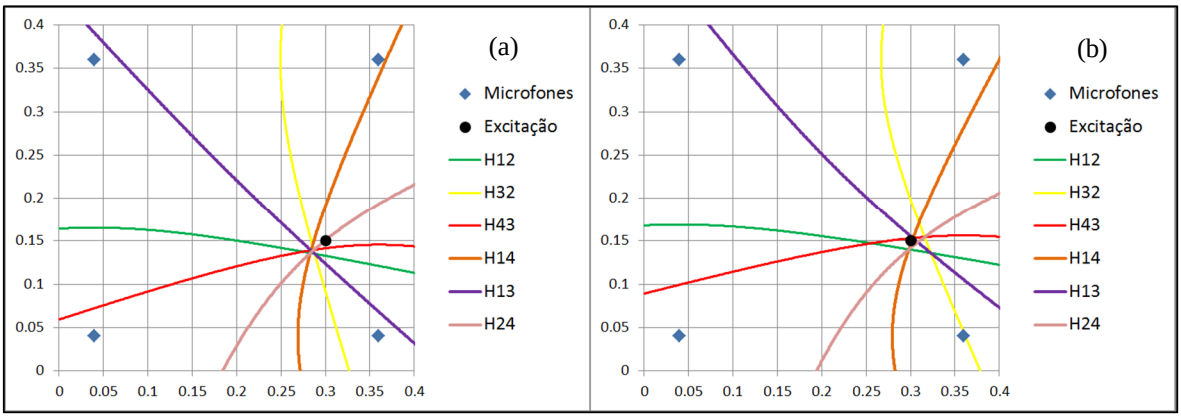

Figura 4-4 - Método da hipérbole no (a) CP 01 do ensaio experimental e na (b) simulação numérica.

Na Figura 4-4 se observa os microfones (losango azul), o local de aplicação da excitação (círculo preto) e as hipérboles geradas através da diferença de tempo de chegada entre pares de microfones (H12, por exemplo, é a hipérbole gerada pelos microfones 1 e 2). As dimensões na Figura 4-4 são dadas em metros.

Os resultados da aplicação do método são mostrados na Tabela 4-6, a falta de precisão observada para os resultados do ensaio experimental é causada pelo ruído do ambiente.

Tabela 4-6 - Resultado da técnica de localização.

	Experimental			Numérico	Verdadeiro
	CP 01	CP 02	CP 03		
Distância em X [m]	0,28570	0,27018	0,27333	0,30980	0,30000
Distância em Y [m]	0,13753	0,15201	0,15182	0,14625	0,15000
Distância total [m]	0,31708	0,31001	0,31266	0,34259	0,33541
Erro	-5,47%	-7,57%	-6,78%	2,14%	

4.3 Validação

Os valores da velocidade de propagação da onda-P, calculados para os três corpos de prova do ensaio experimental e para a simulação numérica, são apresentados na Tabela 4-7.

Tabela 4-7 - Valores para a velocidade de propagação da onda-P.

	Experimental			Numérico
	CP 01	CP 02	CP 03	
Velocidade da onde-P [m/s]	647,22	611,03	698,36	624,91

Todos os valores da velocidade de propagação da onda-P obtidos nos ensaios são próximos do valor encontrado para a simulação, isso, de certa forma, valida o modelo numérico.

5 CONCLUSÃO

Nesse trabalho foi realizado um estudo teórico-experimental da localização da fonte de ondas elásticas numa placa de isopor. Foram obtidos parâmetros do material utilizado, e as simulações numéricas foram realizadas utilizando o método dos elementos discretos.

Durante o trabalho foi possível obter as seguintes conclusões:

- O material da placa foi escolhido, levando em conta seu comportamento frágil (qualidade que será aproveitada na continuação deste estudo), o fato de ser econômico e o fato de apresentar baixa rigidez, se comparado com materiais convencionais, como aço e concreto, o qual permitiu utilizar os equipamentos de aquisição existentes.
- Observou-se uma diferença entre a máxima frequência que cada caso é capaz de capturar. No ensaio experimental esse valor é igual a 20 kHz, já, na simulação numérica, esse valor chega até 115 kHz.
- A técnica de localização se apresentou efetiva e simples de implementar.
- O modelo numérico foi implementado e calibrado, até mesmo para funcionar na representação do dano do material. Porém o modelo não foi utilizado na modelagem do dano.
- Os métodos simples empregados, para calcular diversos parâmetros necessários para calibrar o modelo numérico e para interpretar os resultados experimentais, se mostraram coerentes e com uma dispersão dentro do esperado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aki, K.: "**Scaling law of seismic spectrum**". J. Geophys. Res. 1967; 72, 1217-1231.

Bathe KJ (1996) Finite element procedures. Prentice-Hall, Inc., New Jersey.

Branco, Carlos M.. "**Fadiga de Estruturas Soldadas**". 2ªed. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1999.

Brüel & Kjær. "**Produtos**". http://www.bksv.com. Acessado em 12/11/2012.

Carpinteri A.: "**Scaling laws and renormalization groups for strength and toughness of disordered materials**". Int J Solid Struct 1994; 31:291–302.

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

Kosteski L., Iturrioz I., Batista R.G., Cisilino A. P.: "**The truss-like discrete element method in fracture and damage mechanics**". Engineering Computations, 2011; 6: 765−787.

Kosteski, L.E.; Barrios, R.; Iturrioz, I.: "**Crack propagation in elastic solids using the truss-like discrete element method**". Int J Fract, 2012;DOI 10.1007/s10704-012-9684-4.

Nayfeh A.H., Hefzy M. S.: "**Continuum modeling of three-dimensional truss-like space structures**". AIAA Journal, 1978; 8:779−787.

Pissarenko, G. S.; Iakovlev, A. P.; Matveiev, V. V.. "**Prontuário de Resistência dos Materiais**". Moscovo: Mir, 1985.

Potel, Catherine; Bruneau, Michel (Eds.). "**Materials and Acoustics Handbook**". London: ISTE Ltd, 2009.

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, 1991;SMiRT 11, Trans. Vol. J., Tokyo, Japan.

ANEXO I - EQUIPAMENTOS USADOS NO ENSAIO

Equipamentos usados no ensaio experimental:

4189-A-021 - ½-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-1 - Microfone usado no ensaio.

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

APÊNDICE I - METODOLOGIA DE CÁLCULO DA VELOCIDADE

A metodologia para o cálculo da velocidade de propagação da onda-P, nos ensaios e na simulação, é descrita a seguir.

Foi considerado o microfone 4 como referência, por ele apresentar o menor tempo de chegada.

Através da equação mostrada abaixo, foi calculada a velocidade, considerando os dados dos microfones 2 e 4.

$$C_\rho = \frac{d2 - d4}{t2 - t4}$$

onde, d2 é a distância entre a fonte e o microfone 2, d4 é a distância entre a fonte e o microfone 4, t2 é o tempo de chegada da onda-P no microfone 2 e t4 é o tempo de chegada da onda-P no microfone 4.

O mesmo procedimento foi realizado para os outros microfones, fazendo-se, por fim, o cálculo da média dos resultados.

Essa metodologia foi repetida para cada corpo de prova do ensaio experimental e para a simulação numérica.

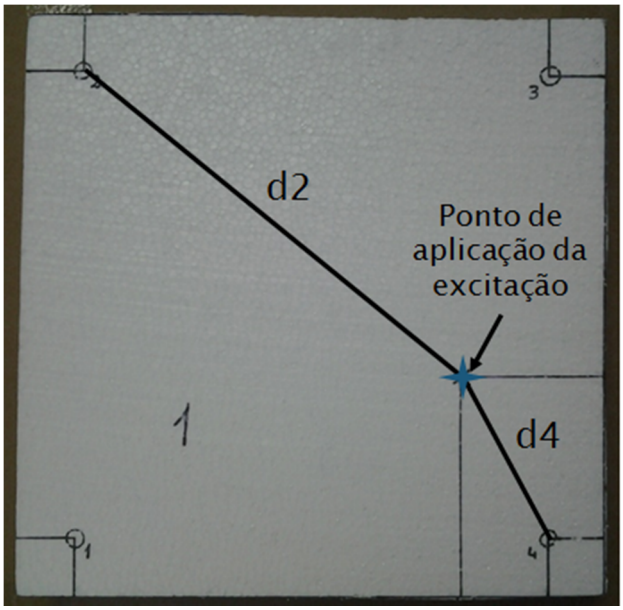

Figura API-1 - Metodologia para determinar a velocidade de propagação da onda-P.

APÊNDICE II - LIMITE DOS ENSAIOS E DA SIMULAÇÃO

Os ensaios e a simulação realizados nesse trabalho apresentaram uma diferença com relação à máxima frequência que conseguem captar.

No ensaio experimental esse limite é obtido através das especificações dos microfones utilizados. Essas especificações são mostradas no Anexo I desse trabalho, e de acordo com elas, os microfones conseguem captar frequências na faixa de 20 até 20000 Hz.

No caso da simulação numérica, esse valor é determinado pela inversa da equação que garante a estabilidade do sistema de integração (Equação 2.4).

$$f_{max} = \frac{C_\rho}{0.6L}$$

Através dessa equação se chega a um valor máximo, para a frequência que o modelo numérico consegue captar, igual a 115 kHz.

APÊNDICE III - SINAL MEDIDO PELOS MICROFONES

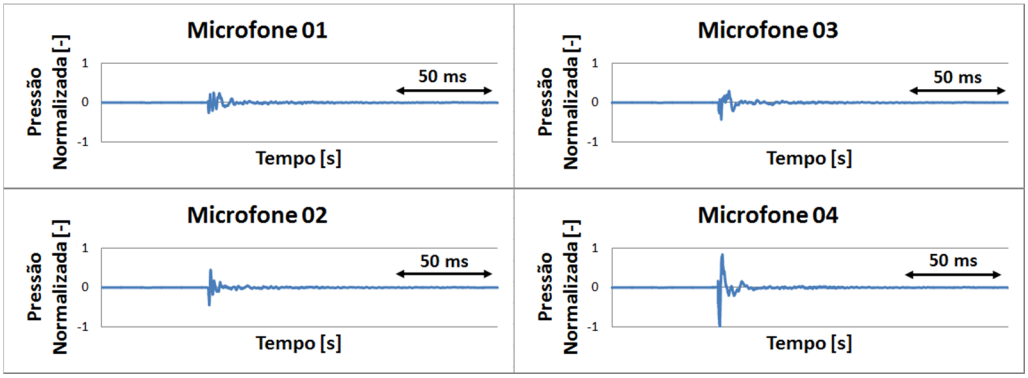

Figura APIII-1 - Corpo de prova 01, ensaio experimental.

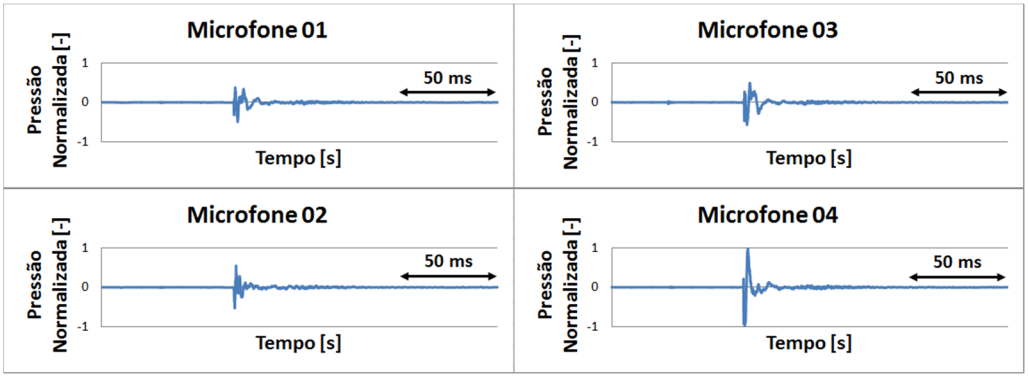

Figura APIII-2 - Corpo de prova 02, ensaio experimental.

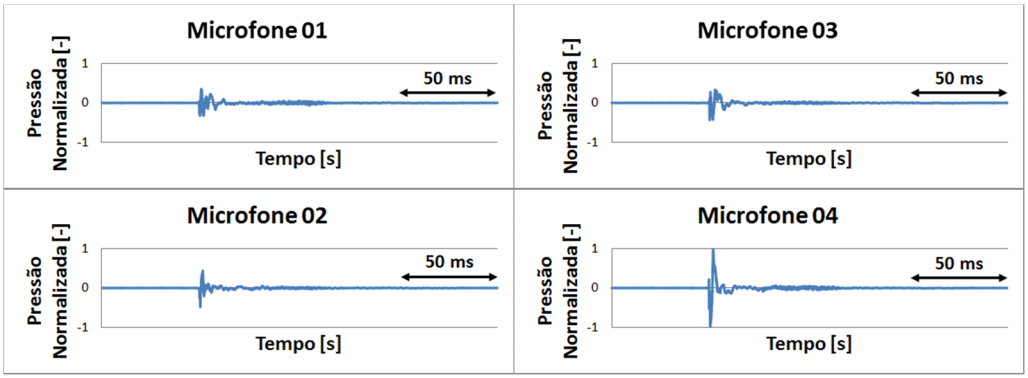

Figura APIII-3 - Corpo de prova 03, ensaio experimental.

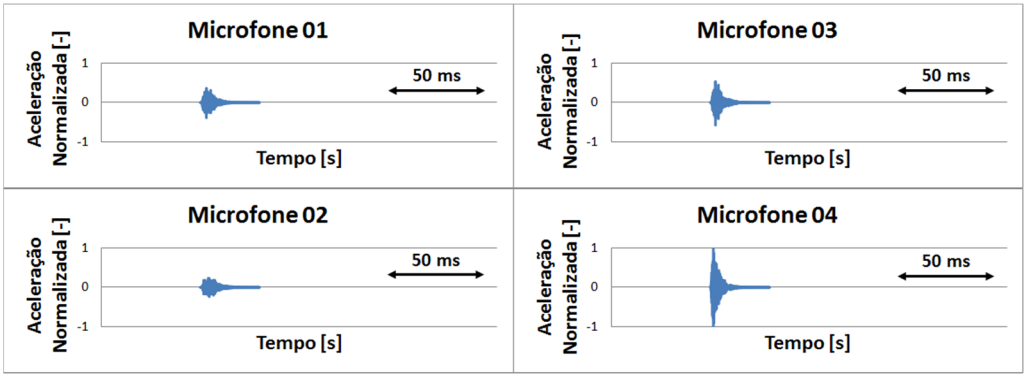

Figura APIII-4 - Simulação numérica

APÊNDICE IV - MÉTODO DA HIPÉRBOLE

Resultado da aplicação do método da hipérbole (dimensões dadas em metros):

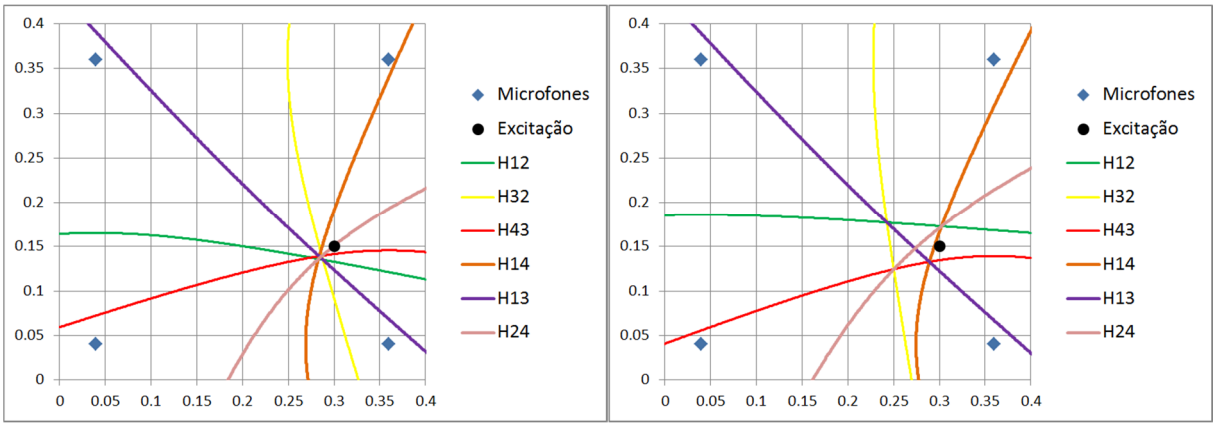

Figura APIV-1 - Método da hipérbole no (a) corpo de prova 1 e no (b) corpo de prova 2 do ensaio experimental.

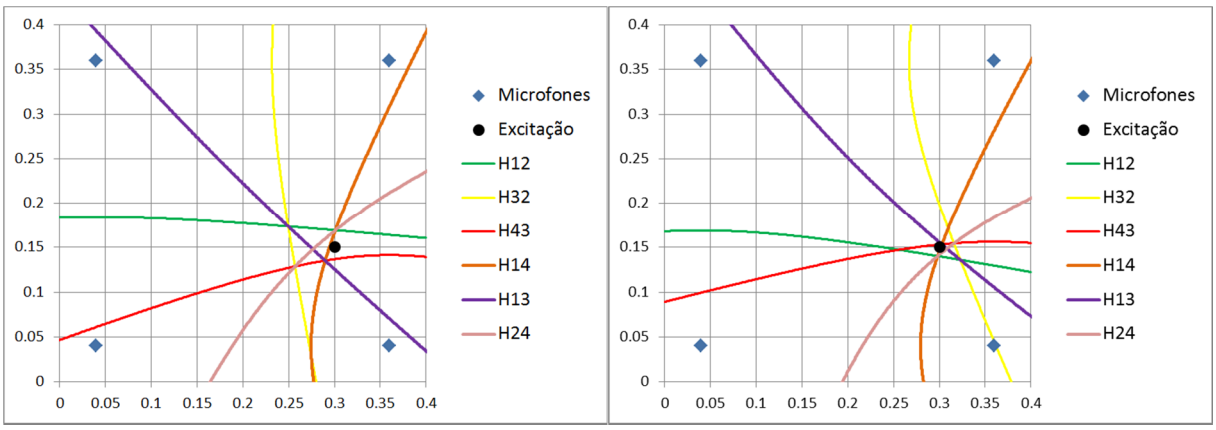

Figura APIV-2 - Método da hipérbole no (a) corpo de prova 3 do ensaio experimental e na (b) simulação numérica.