

ANÁLISE DO ISOLAMENTO AOS SONS AÉREOS E DE PERCUSSÃO DE UM PAINEL SIMPLES CONTENDO UMA JUNTA ELÁSTICA UTILIZANDO O MÉTODO DOS ELEMENTOS FRONTEIRA

Andreia Pereira¹, António Tadeu¹

¹ Centro de Investigação em Ciências da Construção
Departamento de Engenharia Civil
Universidade de Coimbra
3030-788 Coimbra
(apereira@dec.uc.pt; tadeu@dec.uc.pt)

Resumo

Neste artigo é analisada a influência, no isolamento aos sons aéreos e de percussão, da presença de uma junta elástica, colocada no interior de um painel simples com dimensões no plano infinitas, utilizando um modelo desenvolvido com base no Método dos Elementos Fronteira. Este modelo, considera a interacção sólido-fluido, não contempla restrições quanto à espessura do painel e permite determinar as características de propagação associadas aos vários tipos de ondas que ocorrem no meio sólido e acústico. Apresentam-se as curvas do índice de redução sonora para fontes cilíndricas posicionadas no meio acústico, e as curvas do nível sonoro obtido no espaço receptor, quando uma carga actua no meio elástico, segundo a direcção normal ao painel. Avalia-se a influência da espessura e do material que constituem a junta elástica, em receptores posicionados na proximidade desta, de forma a compreender melhor os fenómenos de reflexão que aí se geram. É ainda estudado o modo como a energia se propaga a uma certa distância da junta, de forma a estimar a sua capacidade de atenuação da propagação do som, por via sólida. A análise é efectuada, utilizando, como referência, as respostas conferidas pela camada simples na ausência da junta.

Palavras-chave: Isolamento, sons aéreos, sons de percussão, Método dos Elementos Fronteira.

Abstract

This paper analyses the airborne and impact sound insulation provided by a single panel of infinite extent bounded by two fluid media, with an elastic interlayer inserted inside the partition. The elastic interlayer is placed inside the panel such that it reduces the wave propagation through the elastic medium of the partition. The problem is solved in the frequency domain by implementing a Boundary Element model, which uses the full coupling between the fluid media and the elastic media. Analytical Green's functions for an elastic layer bounded by fluid media are used to avoid having to discretize the model outside the elastic interlayer. Airborne sound insulation and impact sound insulation responses provided by the presence of cylindrical sources are displayed to study the changes in sound insulation when an elastic interlayer is inserted inside a concrete partition. The influence of the thickness and of the material's interlayer is discussed, by assessing responses at receivers placed in the vicinity of the interlayer and further away from it. The responses calculated for an elastic layer of infinite extent bounded by two fluid media are used as a reference for drawing conclusions.

Keywords: Insulation, airborne sound, impact sound, Boundary Element Method.

1 Introdução

Um dos métodos utilizados para atenuar a transmissão do som por via sólida consiste na interposição, entre materiais rígidos, de materiais elásticos com características resilientes. Esta técnica tem sido utilizada no controlo do ruído que se propaga por via sólida, nomeadamente na execução de lajetas flutuantes, com o objectivo de reduzir a propagação de ruídos de percussão. No controlo da transmissão por via marginal entre compartimentos têm também sido utilizados materiais resilientes nas ligações dos elementos de construção. Neste caso é usual avaliar-se a propagação da energia através das ligações existentes entre os elementos de construção, em que são analisadas configurações em cruz, T e L na ausência e na presença de juntas resilientes.

A análise deste tipo de problemas é, geralmente, efectuada através do cálculo de coeficientes de transmissão e reflexão que se geram nestas junções. Vários investigadores propuseram métodos de cálculo para determinar estes coeficientes, assumindo que os painéis são semi-infinitos. Cremer *et al.* [1] estudaram vários tipos de ligações, na ausência e na presença de uma junta elástica. Estes autores consideraram o caso em que a propagação de ondas de compressão e de flexão se efectua para ondas que incidem segundo a normal à junção (incidência normal) e ainda a transmissão por flexão que ocorre em ligações com uma configuração em L, para incidência oblíqua. Kihlman [2] calculou a transmissão por flexão em ligações com a configuração de uma cruz, simétricas, para o caso de incidência segundo uma direcção arbitrária. O caso geral de transmissão considerando os três tipos de ondas (compressão, de corte e de flexão) e incidência segundo uma direcção arbitrária, para ligações em cruz, L e T foi elaborado por Wöhle *et al.* ([3], [4]) e por Gibbs *et al.* ([5], [6]).

Posteriormente, foram publicados vários trabalhos onde são apresentados desenvolvimentos e aplicações destas teorias. Gibbs [7] analisou, detalhadamente, a conversão de ondas que ocorre em ligações em L. Mees *et al.* [8] estudaram a transmissão de energia entre placas finas com extensão semi-infinita, ligadas em T, na ausência e na presença de uma junta elástica, sujeitas a uma onda de flexão que incide na junção, utilizando a mesma análise que Wöhle *et al.* ([3], [4]) e que Gibbs *et al.* ([5], [6]). A transmissão através destas ligações e da junta elástica é calculada analiticamente, sendo o efeito da rigidez da membrana elástica, resultante da restrição lateral dos seus movimentos, simulado utilizando o Método dos Elementos Finitos.

Craik *et al.* [9] utilizaram os coeficientes de transmissão previstos pelos modelos analíticos referidos ([5], [8]) num modelo de SEA (*Statistical Energy Analysis*) para analisar a transmissão que ocorre quando se introduzem juntas elásticas em ligações em T. Neste trabalho é analisada a atenuação sonora conferida pela introdução, na base de uma parede, de membranas elásticas, quando a energia que atinge a junção provém do pavimento. As respostas obtidas pelo modelo são comparadas com resultados experimentais para vários materiais. Neste trabalho os investigadores salientam que a introdução de juntas resilientes em edifícios reduz a transmissão da energia numa direcção, mas como não é dissipada, reflecte-se na junta e propaga-se noutra direcção. A junta modifica a distribuição da energia pelos vários elementos, mas não reduz a energia total no sistema.

As juntas elásticas são, igualmente, utilizadas com a função de possibilitar a dilatação térmica dos elementos estruturais. Este tipo de solução é também vantajosa do ponto de vista acústico, uma vez que introduz uma atenuação do ruído que se propaga por via sólida. Cremer *et al.* [1] analisaram o caso da transmissão das ondas longitudinais e de flexão considerando incidência normal, para o caso da presença de uma junta elástica no interior de um painel infinito.

Neste artigo é analisada a influência, no isolamento aos sons aéreos e de percussão, da presença de uma junta elástica, colocada no interior de um painel simples com dimensões no plano infinitas, utilizando um modelo numérico em que se faz uso do Método dos Elementos Fronteira (BEM). Este modelo, considera a interacção sólido-fluido, não contempla restrições quanto à espessura do painel e permite determinar as características de propagação associadas aos vários tipos de ondas que ocorrem no meio sólido e acústico. A junta elástica encontra-se ligada ao painel, através da imposição de condições de continuidade adequadas para os dois materiais elásticos. Apresentam-se as curvas do

índice de redução sonora para fontes cilíndricas posicionadas no meio acústico, e as curvas do nível sonoro obtido no espaço receptor, quando uma carga actua no meio elástico, segundo a direcção normal ao painel. Avalia-se a influência da espessura e do material que constituem a junta elástica, em receptores posicionados na proximidade desta, de forma a compreender melhor os fenómenos de reflexão que aí se geram. É ainda estudado o modo como a energia se propaga a uma certa distância da junta, de forma a estimar a sua capacidade de atenuação da propagação do som, por via sólida. A análise é efectuada, utilizando, como referência, as respostas conferidas pela camada simples na ausência da junta.

Inicialmente apresenta-se a formulação do problema, seguindo-se a descrição das aplicações efectuadas, bem como dos resultados obtidos. Por último apresentam-se as principais conclusões.

2 Formulação do problema

Considere-se uma camada simples, com espessura h , que divide um meio acústico, homogéneo e infinito. O meio acústico possui massa volúmica ρ_f , constante de Lamé λ_f e admite a propagação de ondas de pressão com uma velocidade $\alpha_f = \sqrt{\lambda_f / \rho_f}$. O painel, com massa volúmica ρ_1 , coeficiente de Poisson ν_1 e módulo de elasticidade transversal μ_1 , permite a propagação de ondas de compressão com velocidade $\alpha_1 = \sqrt{[2\mu_1(1-\nu_1)] / [\rho_1(1-2\nu_1)]}$ e ondas de corte com velocidade $\beta_1 = \sqrt{\mu_1 / \rho_1}$. Neste painel é introduzida uma junta elástica, com espessura e , massa volúmica ρ_2 , onde se propagam ondas de compressão com velocidade α_2 e de corte β_2 , conforme se encontra representado na Figura 1. O sistema é excitado por cargas lineares harmónicas segundo a direcção z , aplicadas no meio elástico, segundo a direcção y ou no meio acústico.

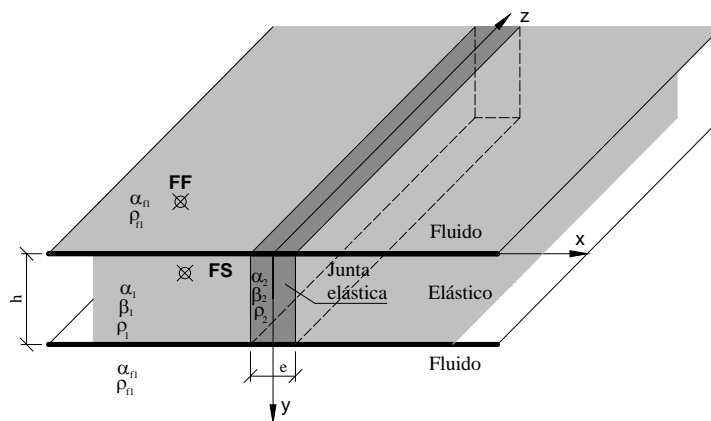


Figura 1 - Geometria do modelo de BEM constituída por uma junta elástica inserida numa camada simples.

2.1 Campo incidente

Quando o modelo descrito é solicitado por uma fonte linear harmónica, localizada no meio acústico (FF) em (x_0, y_0) , actuando com uma frequência de excitação ω , o campo incidente de pressões num ponto (x, y, z) é dado pela expressão seguinte:

$$\sigma^{full}(\omega, x, y, k_z) = \frac{-iA}{2} H_0^{(2)} \left(k_{\alpha_f} \sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2} \right), \quad (1)$$

em que A é a amplitude da onda incidente; $i = \sqrt{-1}$; $k_{\alpha_f} = \sqrt{\omega^2 / (\alpha_f)^2 - k_z^2}$ sendo $\text{Im}(k_{\alpha_f}) \leq 0$; k_z é o número de onda segundo a direcção z ($k_z = \frac{2\pi}{L_z} m$) e $H_n^{(2)}(\dots)$ são as funções de Hankel de ordem n do segundo tipo. Utilizando esta metodologia é necessário considerar a existência de um conjunto de fontes virtuais igualmente espaçadas de L_z ao longo da direcção z .

No caso de uma carga linear harmónica actuando numa camada elástica, na direcção y (F_y), o campo de deslocamentos incidente para cada número de onda axial k_z , $G_{j,l}^{full}$, (em que o índice $j = y$ define a direcção de aplicação da carga, e o índice $l = x, y, z$ indica a direcção do deslocamento), produzido por esta carga, actuando em (x_s, y_s) é dado, no domínio da frequência, pelas expressões seguintes [10]:

$$\begin{aligned} G_{yx}^{full}(\omega, x, y, k_z) &= -\frac{i}{4\rho\omega^2} \left(\frac{x-x_s}{r} \right) \left(\frac{y-y_s}{r} \right) B_2 \\ G_{yy}^{full}(\omega, x, y, k_z) &= -\frac{i}{4\rho\omega^2} \left[k_s^2 H_{0\beta} - \frac{1}{r} B_1 + \left(\frac{y-y_s}{r} \right)^2 B_2 \right] \\ G_{yz}^{full}(\omega, x, y, k_z) &= \frac{1}{4\rho\omega^2} k_z \left(\frac{y-y_s}{r} \right) B_1, \end{aligned} \quad (2)$$

em que $B_n = k_\beta^n H_{n\beta} - k_\alpha^n H_{n\alpha}$; $H_{n\alpha} = H_n^{(2)}(k_\alpha r)$ e $H_{n\beta} = H_n^{(2)}(k_\beta r)$ são as funções de Hankel de ordem n do segundo tipo; $k_s = \sqrt{\frac{\omega}{\beta}}$; $r = \sqrt{(x-x_s)^2 + (y-y_s)^2}$; $k_\alpha = \sqrt{(\omega/\alpha)^2 - k_z^2}$ com $\text{Im}(k_\alpha) \leq 0$ e $k_\beta = \sqrt{(\omega/\beta)^2 - k_z^2}$ com $\text{Im}(k_\beta) \leq 0$.

2.2 Campo reflectido

O campo de ondas resultante da introdução de uma junta elástica no interior de um painel é determinado aplicando o Método dos Elementos Fronteira. O modelo desenvolvido [11] faz uso de funções de Green para meio estratificado constituído por uma camada simples que divide um meio fluido infinito [12]. Neste modelo considera-se que a membrana é delimitada por quatro superfícies S_1 a S_4 , conforme se encontra representado na Figura 2. Nas superfícies S_1 e S_3 (interfaces elásticas/elásticas) define-se a continuidade de tensões e deslocamentos, segundo as três direcções, e nas superfícies S_2 e S_4 (interfaces acústicas/acústicas) estabelece-se a continuidade de pressões e gradientes segundo a normal à fronteira. Estas superfícies foram discretizadas utilizando elementos fronteira constantes. De forma a resolver o sistema de equações, é necessário efectuar o cálculo, nas fronteiras, das integrações das funções de Green para uma camada simples inserida no meio acústico. Refira-se ainda que a avaliação destas funções quando o nó carregado e o nó a integrar coincidem com as superfícies da camada é complexa e por isso torna-se necessário definir as superfícies S_2 e S_4 .

A obtenção da solução do sistema final de equações requer a avaliação em cada elemento de fronteira dos integrais das funções de Green seguintes:

$$\begin{aligned}
 & \int_{C_l} G_{kl}^{surf,i}(\underline{x}_p, \underline{x}_Q, \omega) dC_l; & \int_{C_l} H_{kl}^{surf,i}(\underline{x}_p, \underline{x}_Q, \nu, \omega) dC_l \\
 & \int_{C_l} G_{kf}^{surf,i}(\underline{x}_p, \underline{x}_Q, \nu, \omega) dC_l; & \int_{C_l} H_{kf}^{surf,i}(\underline{x}_p, \underline{x}_Q, \omega) dC_l \\
 & \int_{C_l} G_{fl}^{surf,i}(\underline{x}_p, \underline{x}_Q, \omega) dC_l; & \int_{C_l} H_{fl}^{surf,i}(\underline{x}_p, \underline{x}_Q, \nu, \omega) dC_l \\
 & \int_{C_l} G_f^{surf,i}(\underline{x}_p, \underline{x}_Q, \nu, \omega) dC_l; & \int_{C_l} H_f^{surf,i}(\underline{x}_p, \underline{x}_Q, \omega) dC_l, \quad (3)
 \end{aligned}$$

em que $G_{kl}^{surf,i}(\underline{x}_p, \underline{x}_Q, \omega)$ e $H_{kl}^{surf,i}(\underline{x}_p, \underline{x}_Q, \nu, \omega)$ são respectivamente as funções de Green referentes a deslocamentos e tensões no meio elástico no ponto \underline{x}_Q na direcção $l=1,2,3$, quando uma carga virtual actua no meio elástico num ponto \underline{x}_p , na direcção $k=1,2,3$; $G_{kf}^{surf,i}(\underline{x}_p, \underline{x}_Q, \nu, \omega)$ e $H_{kf}^{surf,i}(\underline{x}_p, \underline{x}_Q, \omega)$ são o gradiente de pressões e a pressão no ponto \underline{x}_Q no meio fluido, quando a carga virtual se encontra no ponto \underline{x}_p do meio elástico actuando na direcção $k=1,2,3$; $G_{fl}^{surf,i}(\underline{x}_p, \underline{x}_Q, \omega)$ e $H_{fl}^{surf,i}(\underline{x}_p, \underline{x}_Q, \nu, \omega)$ são respectivamente os deslocamentos e tensões no meio elástico na direcção $l=1,2,3$ num ponto \underline{x}_Q quando a carga virtual é aplicada no meio acústico em \underline{x}_p ; $G_f^{surf,i}(\underline{x}_p, \underline{x}_Q, \nu, \omega)$ e $H_f^{surf,i}(\underline{x}_p, \underline{x}_Q, \omega)$ são o respectivamente o gradiente e a pressão num ponto \underline{x}_Q do meio acústico quando a carga se encontra aplicada num ponto \underline{x}_p do meio fluido; ν é a normal ao elemento fronteira C_l ; os índices $k, l=1, 2, 3$ referem-se à normal, tangencial e direcção z , respectivamente; os índices $i=1, 2$ identificam o meio estratificado correspondente ao painel (meio 1) ou à junta elástica (meio 2).

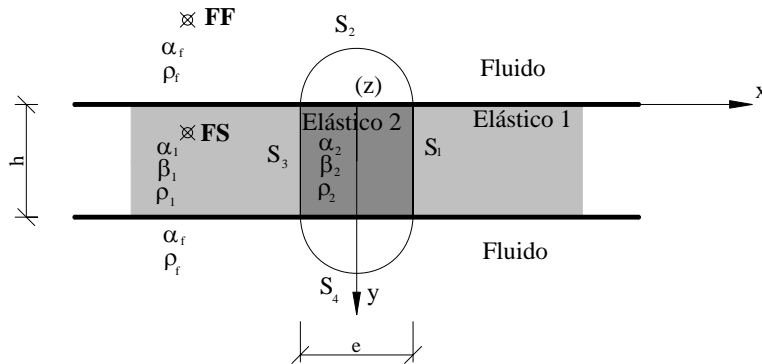


Figura 2 - Geometria do modelo de BEM constituída por uma junta elástica inserida numa camada simples, que divide um meio fluido infinito, sendo definidas as superfícies de discretização da junta.

3 Aplicações

Nas aplicações analisadas, o painel tem uma espessura de 0.20 m e divide um meio acústico com as propriedades do ar ($\rho_f = 1.22 \text{ kg/m}^3$; $\alpha_f = 340.00 \text{ m/s}$), conforme representado na Figura 3. O meio elástico é composto por betão ($\alpha_1 = 3498.60 \text{ m/s}$; $\beta_1 = 2245.00 \text{ m/s}$; $\rho_1 = 2500.00 \text{ kg/m}^3$; $\eta_1 = 6.00 \times 10^{-3}$).

No interior do painel é inserida uma junta elástica em $x_h = 1.0$ m, constituída por cortiça ($\alpha_2 = 431.3$ m/s; $\beta_2 = 282.9$ m/s; $\rho_2 = 140.0$ kg/m³; $\eta_2 = 0.15$) ou por material cerâmico ($\alpha_2 = 2182.2$ m/s; $\beta_2 = 1336.3$ m/s; $\rho_2 = 1400.0$ kg/m³; $\eta_2 = 1.50 \times 10^{-2}$). A importância da espessura da junta é analisada, sendo efectuadas simulações para espessuras $e = 0.05$ m e $e = 0.10$ m.

O modelo é excitado por cargas cilíndricas que actuam no meio acústico (F_f) em (0.0 m; -2.0 m) ou no meio elástico (F_s), segundo a direcção y (carga vertical) em (0.0 m; 0.0 m).

As respostas são calculadas para um intervalo de frequência [2.0; 8192.0 Hz] e um incremento de frequência 2.0 Hz, sendo utilizada uma grelha de receptores idêntica à que se encontra na Figura 3b.

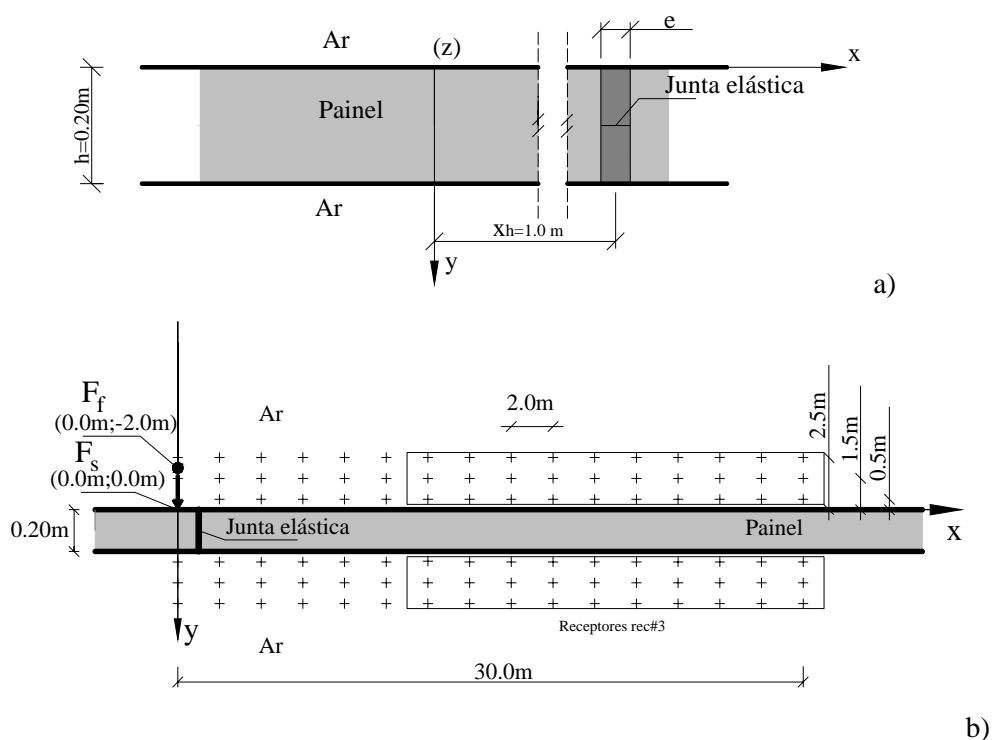


Figura 3 - Geometria das simulações: a) Representação da junta no interior de um painel; b) Posição das fontes e receptores.

A junta é modelada utilizando elementos fronteira constantes, cujo número varia com a frequência de excitação, garantindo-se que o comprimento do elemento fronteira seja sempre menor ou igual a seis vezes o comprimento da onda incidente. Além disso, sendo analisadas espessuras reduzidas apresentando elementos fronteira paralelos, impõe-se, também, que o comprimento de cada elemento seja inferior à espessura da junta, de forma a evitar a ocorrência de erros numéricos.

3.1 Camada simples contendo uma junta elástica

A Figura 4 apresenta o índice de redução sonora médio respeitante a uma camada simples, constituída por betão, na ausência e na presença de uma junta de cortiça, com espessura $e = 0.10$ m, localizada em $x_h = 1.0$ m. As respostas são obtidas calculando, primeiro, o nível sonoro médio no

espaço emissor e no espaço receptor. O índice de redução sonora é, então, determinado pela diferença entre o nível sonoro médio registado nestes espaços.

Na Figura 4 são apresentadas várias curvas que correspondem ao índice de redução sonora médio obtido utilizando todos os receptores (designados por rec#1) e os receptores localizados à direita da junta, designados por rec#3 na Figura 3b. São ainda representadas as respostas referentes ao painel simples na ausência da junta, para servirem como referênciã.

As respostas apresentadas na Figura 4a, referem-se à média para o conjunto de receptores rec#1. Estas respostas permitem verificar que, no domínio das baixas e médias frequências, o índice de redução sonora conferido pelo painel contendo uma junta é idêntico ao registado pelo painel simples. Nas altas frequências, a curva respeitante ao painel contendo a junta, apresenta uma quebra resultante da transmissão da energia do espaço emissor para o espaço receptor, através da heterogeneidade, que constitui, deste modo um ponto fraco no isolamento. A transmissão ocorre apenas nas altas frequências devido às dimensões da junta.

Na Figura 4b está representado o índice de redução sonora obtido considerando o conjunto de receptores rec#3. Observe-se que, nas altas frequências, ocorre, também, uma quebra no isolamento relacionada com a transmissão da energia para o espaço receptor através da junta. No entanto, no final da resposta o índice de redução sonora aumenta em relação ao obtido para o painel simples, pois a energia propagada por via sólida que atinge estes receptores é atenuada pela presença da junta.

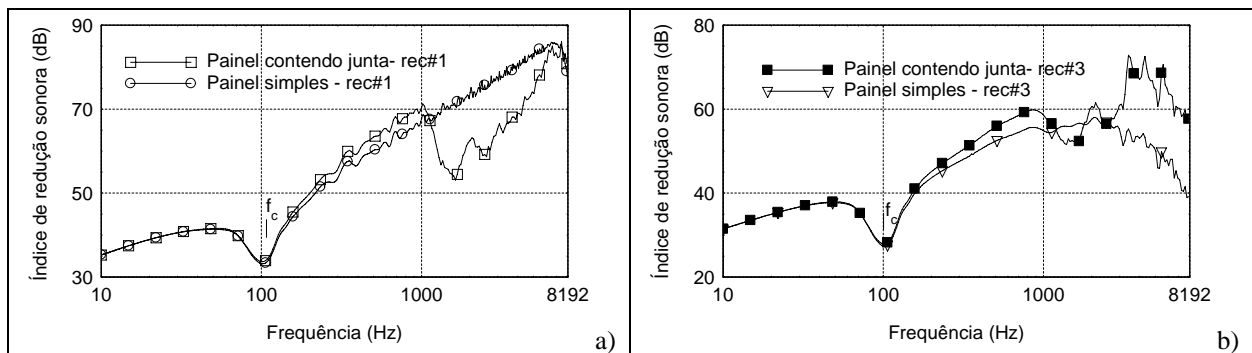


Figura 4 - Índice de redução sonora conferido por um painel simples na ausência e na presença de uma junta de cortiça com espessura $e = 0.10$ m, localizada em $x_h = 1.0$ m : a) rec#1; b) rec#3.

De forma a melhor ilustrar o exposto, apresentam-se na Figura 5 as pressões obtidas no espaço emissor e no espaço receptor, numa grelha de receptores localizada na proximidade da junta (referenciada na figura por grelha #1) e numa grelha de receptores distanciada desta (referenciada na figura por grelha #2), para a frequência $f = 2000$ Hz.

Da análise da figura observa-se que, na proximidade da junta (grelha #1), as pressões no espaço receptor aumentam, evidenciando claramente a ocorrência da transmissão de energia através desta heterogeneidade. Por outro lado, as amplitudes das pressões registadas na grelha #2, em ambos os espaços (emissor e receptor), são mais reduzidas do que as verificadas para o painel sem junta. Observa-se ainda que os gráficos conferidos pelo painel sem e com junta, para a grelha #2, exibem características de propagação idênticas (note-se que a aspecto dos gráficos é semelhante).

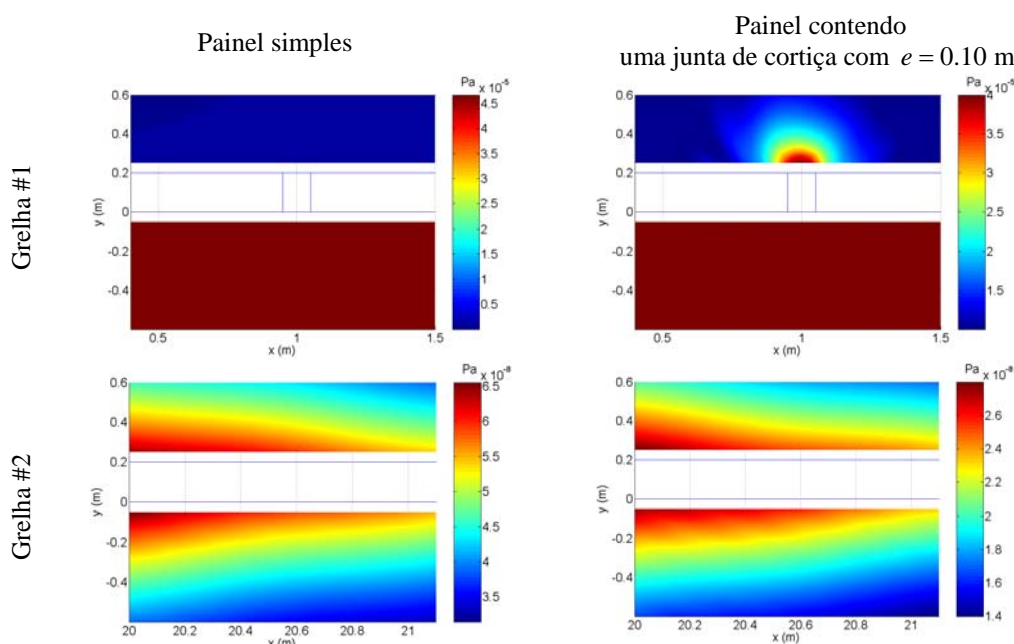


Figura 5 - Pressões no espaço emissor e no espaço receptor resultantes de uma fonte que actua no meio acústico, para a frequência $f = 2000$ Hz .

Na Figura 6 apresentam-se as respostas obtidas para os dois conjuntos de receptores (rec#1 e rec#3), quando uma carga unitária actua no meio elástico, segundo a direcção y . As curvas representam o nível sonoro médio no espaço receptor.

Os resultados referentes ao conjunto dos receptores rec#1 (ver Figura 6a) mostram que nas baixas frequências, os níveis sonoros registados para o painel, na ausência e na presença da junta, são semelhantes. No entanto, na proximidade da frequência crítica, a curva referente ao painel contendo a junta apresenta amplitudes mais baixas, em relação às obtidas para o painel simples. Este comportamento mantém-se no domínio das altas frequências.

Nos receptores rec#3 (ver Figura b), a redução do nível sonoro que ocorre para o painel na presença da junta é mais acentuada, evidenciando a capacidade desta heterogeneidade para atenuar de forma eficaz a energia que atinge receptores mais distantes.

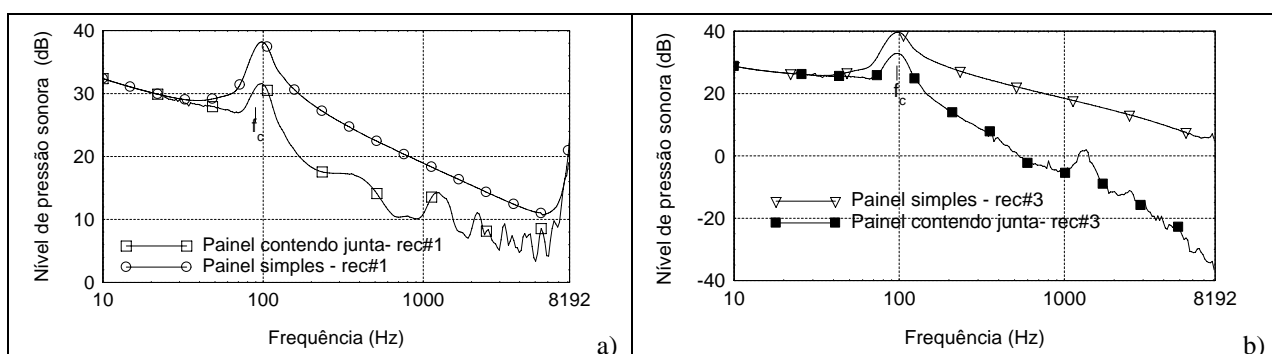


Figura 6 - Nível de pressão sonora no espaço receptor, quando uma carga actua no meio elástico de um painel simples, segundo a direcção y , na ausência e na presença de uma junta de cortiça com $e = 0.10$ m : a) rec#1; b) rec#3.

Na Figura 7 estão representadas as pressões obtidas no espaço emissor e no espaço receptor, quando a carga actua no meio sólido segundo a direcção y , numa grelha de receptores localizada na proximidade da junta (referenciada na figura por grelha #1) e numa grelha de receptores distanciada desta (referenciada na figura por grelha #2), para a frequência $f = 2000$ Hz .

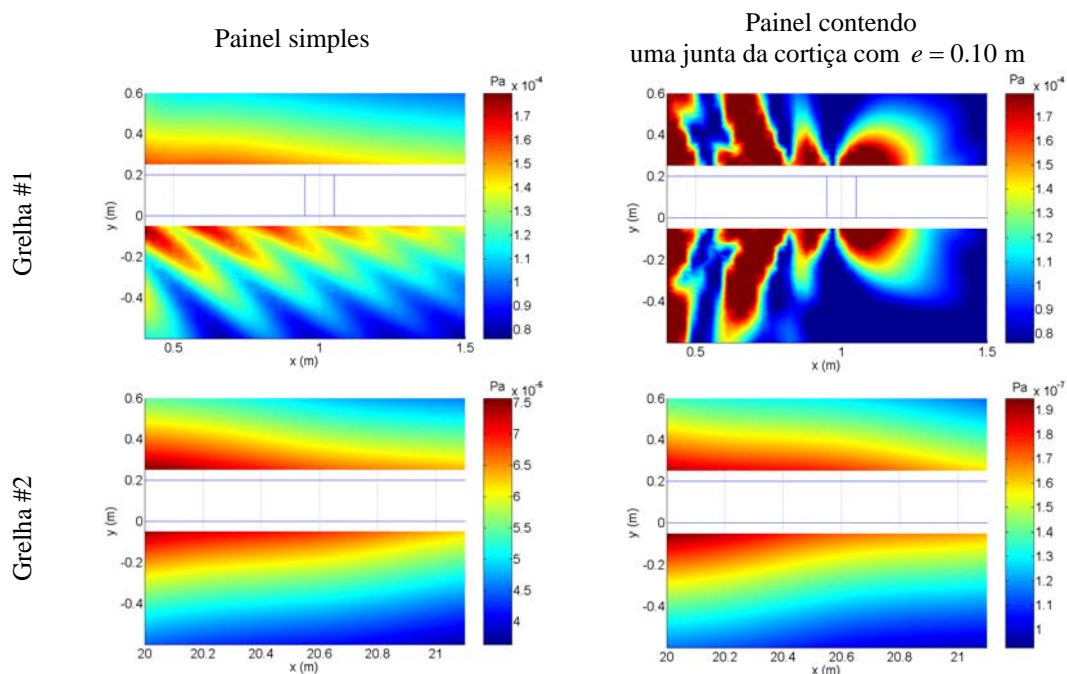


Figura 7 - Pressões sonoras no espaço emissor e no espaço receptor resultantes de uma fonte que actua no meio elástico segundo a direcção y , para a frequência $f = 2000$ Hz .

Nesta figura observa-se que, quando o painel contém a junta, na grelha #1 registam-se reflexões direccionadas, sobretudo, para a esquerda da junta (onde se localiza a fonte). Por outro lado, à direita da junta as pressões tendem a reduzir-se uma vez que esta impede a propagação da energia ao longo do painel. Nos receptores distanciados da junta (grelha #2), verifica-se que, quando esta se encontra inserida no painel, as pressões são mais reduzidas, sendo a propagação efectuada com características idênticas às do painel na ausência da heterogeneidade (note-se que a aparência dos gráficos é idêntica). A existência da junta permite a vibração diferenciada do painel à sua esquerda e à sua direita. Sendo a carga aplicada à esquerda da junta, esta parte do painel irradia com maiores amplitudes. A energia que se propaga através da junta assemelha-se a uma fonte com amplitude mais reduzida, conduzindo à vibração menos acentuada do painel à direita da junta.

3.2 Influência da espessura da junta

Nesta subsecção analisa-se a influência da espessura de uma junta de cortiça. Foram modeladas juntas com espessuras de $e = 0.05$ m e $e = 0.10$ m, encontrando-se o índice de redução sonora, obtido para o conjunto de receptores rec#1 e rec#3, representado na Figura 8.

Da análise da Figura 8a, onde se apresentam os resultados referentes ao conjunto de receptores rec#1, observa-se que, nas altas frequências, quando a espessura da junta é $e = 0.10$ m, ocorre uma quebra no isolamento num intervalo de frequências maior do que para $e = 0.05$ m. Verifica-se, assim, que ondas com comprimentos de onda mais baixos se

transmitem através desta heterogeneidade, para o espaço receptor, quando a sua espessura é maior. No final da resposta, ambas as curvas tendem novamente a aproximar-se da resposta obtida para o painel simples. Os resultados respeitantes à média considerando os receptores rec#3 (ver Figura 8b), evidenciam, nas altas frequências, a presença de quebras relacionadas com a transmissão da energia através da junta, para ambos as espessuras, no entanto, quando a espessura é $e = 0.05$ m, o índice de redução sonora é mais elevado.

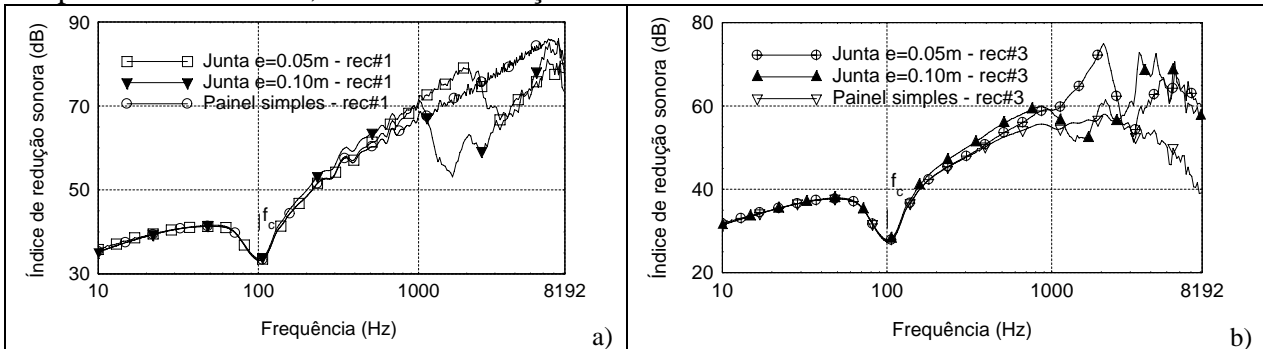


Figura 8 - Índice de redução sonora conferido por um painel simples na ausência e na presença de uma junta de cortiça com diferentes espessuras, localizada em $x_h = 1.0$ m : a) rec#1; b) rec#3.

Na Figura 9 apresentam-se as curvas referentes ao nível sonoro médio no espaço receptor, considerando o conjunto de receptores rec#1 e rec#3, para o painel contendo uma junta de cortiça com espessuras $e = 0.05$ m e $e = 0.10$ m, no caso em que a carga actua no meio sólido na direcção y .

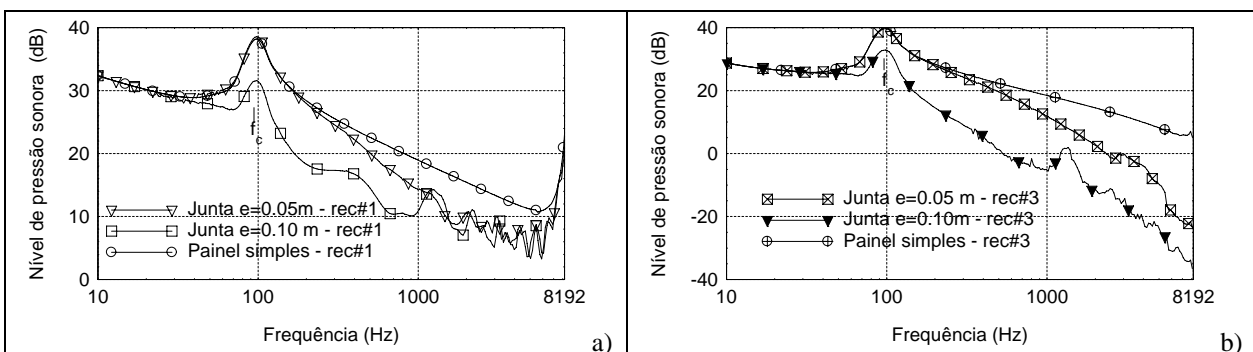


Figura 9 - Nível de pressão sonora no espaço receptor quando uma carga actua no meio elástico de um painel simples, segundo a direcção y , na ausência e na presença de uma junta de cortiça com diferentes espessuras, localizada em $x_h = 1.0$ m : a) rec#1; b) rec#3.

Nesta figura verifica-se que o nível sonoro no espaço receptor é mais baixo quando a espessura da junta é $e = 0.10$ m. No caso em que a espessura é $e = 0.05$ m, o nível sonoro tende a aproximar-se do conferido pelo painel simples. Tal como foi já referido anteriormente, a presença da junta permite que possa ocorrer a vibração diferenciada do painel à esquerda e à direita desta. No entanto, se a junta apresentar menor espessura, o movimento da parte direita e da parte esquerda do painel ocorre de forma mais solidária, devido à junta passar a ter menor capacidade para se deformar.

3.3 Influência do material que constitui a junta

A influência do material que constitui a junta, é analisada, para uma junta com espessura $e = 0.10$ m, constituída por cortiça e material cerâmico. Na Figura 10 apresenta-se o índice de redução sonora

correspondente a estes casos. Nos gráficos é possível observar que, sendo a junta composta por material cerâmico, o índice de redução sonora praticamente não se altera em relação ao conferido para uma camada simples sem junta. Nas altas frequências verifica-se um ligeiro aumento das amplitudes nos receptores distanciados da fonte, evidenciando que a energia atenuada pela junta é reduzida.

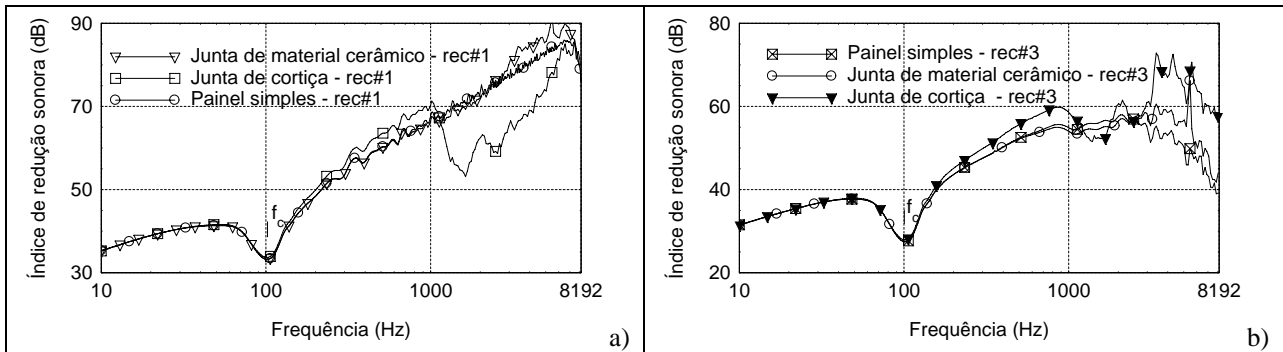


Figura 10 - Índice de redução sonora conferido por um painel simples na ausência e na presença de uma junta com espessura $e = 0.10$ m, constituída por material cerâmico ou cortiça, localizada em $x_h = 1.0$ m : a) rec#1; b) rec#3.

Na Figura 11 apresenta-se o nível sonoro médio no espaço receptor resultante da actuação da carga no meio elástico, segundo a direcção y , para um painel contendo uma junta de cortiça e de material cerâmico. Da análise dos resultados verifica-se que, na ausência e na presença da junta constituída por material cerâmico, as curvas são praticamente idênticas, concluindo-se que a junta permite a passagem da energia ao longo do painel.

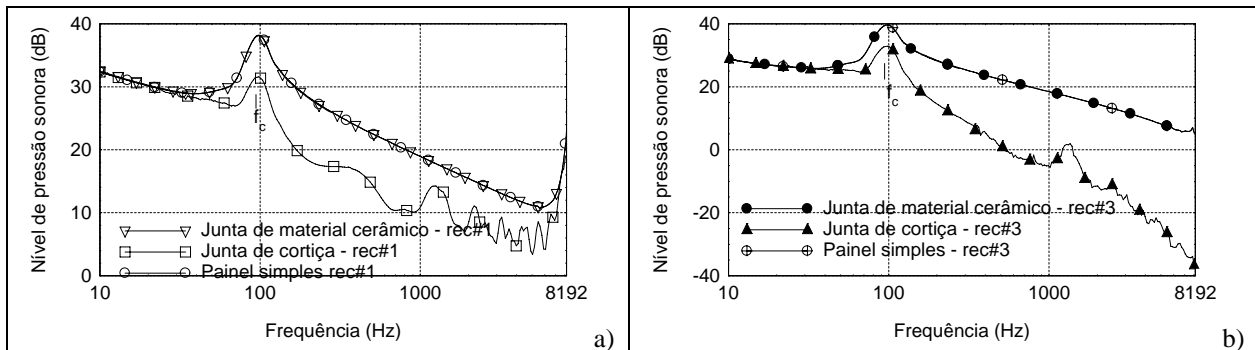


Figura 12 - Nível de pressão sonora no espaço receptor quando uma carga actua no meio elástico de um painel simples, segundo a direcção y , na ausência e na presença de uma junta com espessura $e = 0.10$ m, constituída por material cerâmico ou cortiça, localizada em $x_h = 1.0$ m : a) rec#1; b) rec#3.

4 Conclusões

Neste trabalho foi implementado um modelo numérico desenvolvido utilizando o Método dos Elementos Fronteira para analisar o isolamento aos sons aéreos e de percussão de um painel simples contendo uma junta elástica. Da análise efectuada observou-se que, o índice de redução sonora é condicionado pela presença, no interior do painel simples, de uma junta constituída por um material elástico resiliente, no domínio das altas frequências. Nesta gama de frequências, registou-se uma quebra no isolamento resultante da energia transmitida para o espaço receptor através da

heterogeneidade, que se revelou ser tanto maior quanto maior a espessura da junta. Concluiu-se, ainda, que a heterogeneidade permite reduzir a energia propagada através do meio sólido, em receptores distanciados da fonte e da junta. Quando se aumenta a espessura da junta, obtém-se uma maior atenuação da energia que se propaga através deste meio. Se o material constituinte da junta apresentar maior rigidez, a sua influência no índice de redução sonora é muito reduzida. Quando a carga actua no meio elástico, segundo a vertical (perpendicular ao painel), as respostas revelaram ser fortemente condicionadas pela presença de uma junta resiliente, nas médias e altas frequências, apresentando níveis sonoros médios mais reduzidos em relação ao caso do painel na ausência de junta. Este comportamento deve-se ao facto da junta permitir que o painel à sua esquerda e à direita se possa movimentar de forma diferenciada. A junta reduz a transmissão através do meio sólido, sendo a radiação do painel à direita mais reduzida. Com o aumento da espessura desta heterogeneidade, ocorreu uma diminuição do nível sonoro e, para frequências mais baixas, das amplitudes das respostas. Observou-se também que, parte da energia que incide na junta é reflectida para a sua esquerda, resultando, nesta zona, níveis sonoros mais elevados. Se o material que constitui a junta for rígido, o nível sonoro resultante aproximou-se do obtido para um painel simples.

Referências

- [1] Cremer L, Heckl M, Ungar E, *Structure-Borne Sound*, Berlin, Springer-Verlag, 1988.
- [2] Kihlman T, Transmission of structure borne - sound through buildings, National Swedish Institute for Building Research, Relatório 9, 1967.
- [3] Wöhle W, Beckmann T, Schreckenbach H, Coupling loss factors for statistical energy analysis of sound transmission at rectangular structural slab joints, part I, *Journal of Sound and Vibration*, 1981, 77(3): 323-334.
- [4] Wöhle W, Beckmann T, Schreckenbach H, Coupling loss factors for statistical energy analysis of sound transmission at rectangular structural slab joints, part II, *Journal of Sound and Vibration*, 1981, 77(3): 335-344.
- [5] Craven P G, Gibbs B M, Sound transmission and modal coupling at junctions of thin plates, part I: representation of the problem. *Journal of Sound and Vibration*, 1981, 77(3): 417-427.
- [6] Gibbs B M, Craven P G, Sound transmission and modal coupling at junctions of thin plates, part II: parametric survey. *Journal of Sound and Vibration*, 1981, 77(3): 429-435.
- [7] Gibbs B M, Mode coupling and energy partition of sound in a system of plate junctions, *Journal of Sound and Vibration*, 1986, 104(4): 127-136.
- [8] Mees P, Vermeir G, Structure-borne sound transmission at elastically connected plates, *Journal of Sound and Vibration*, 1993, 166(1): 55-76.
- [9] Craik R J M, Osipov A O, Structural isolation of walls using elastic interlayers, *Applied Acoustics*, 1995, 46: 233-249.
- [10] Tadeu A, Kausel E, Green's functions for two-and-a half dimensional elastodynamic problems, *Journal of Engineering Mechanics ASCE*, Vol. 126 (10), 2000, pp.1093-1097.
- [11] Pereira A, Análise do isolamento aos sons aéreos e de percussão de elementos de separação – modelos analíticos e numéricos, Tese de doutoramento, DEC-FCTUC, Coimbra, 2007.
- [12] Tadeu A, António J, 2.5D Green functions for elastodynamic problems in layered acoustic and elastic formations, *Journal of Computer Modelling in Engineering and Sciences*, (CMES) 2002, 2: 477 - 495.