



FCTUC DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

Validação de um Modelo Analítico para Previsão de Isolamento a Sons Aéreos.

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil
na Especialidade de Construções

Autor

André Massano Lucas Simão

Orientadores

Professor Doutor António José Barreto Tadeu

Professora Doutora Julieta Maria Pires António

Esta dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor, não tendo sofrido correções após a defesa em provas públicas. O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC declina qualquer responsabilidade pelo uso da informação apresentada

Colaboração Institucional



Coimbra, Março, 2014

AGRADECIMENTOS

A todos os meus colegas de curso, que ao longo destes anos participaram no meu trajeto académico e que ao partilhar comigo as suas opiniões, experiências e ideias, enriqueceram o meu desenvolvimento pessoal e intelectual.

A todos os professores que, ao longo da minha formação, contribuíram com todo o seu conhecimento e sabedoria. Em particular aos meus orientadores, o Professor Doutor António José Barreto Tadeu e a Professora Doutora Julieta Maria Pires António pela sua particular disponibilidade, vontade, orientação e partilha de conhecimentos em todo o decorrer desta dissertação.

Deixo também, um especial agradecimento ao Engenheiro Igor Castro por toda a ajuda que me deu durante a elaboração desta dissertação.

A todos os meus amigos por estarem sempre presentes, nos bons e maus momentos e por todo o espírito de entreaajuda e disponibilidade demonstrada.

Aos meus pais, irmã e restante família por todo o apoio, carinho, preocupação e por fazerem com que fosse possível atingir este nível de formação.

RESUMO

O conforto acústico dos edifícios depende das características dos elementos construtivos dos mesmos. Os elementos de compartimentação vertical (paredes) devem ser estudados no que respeita à transmissão de sons aéreos e os elementos de compartimentação horizontal (pavimentos) devem ser estudados no que respeita à transmissão de sons de percussão e de sons aéreos.

O estudo do comportamento destes elementos e a sua caracterização permitem obter resultados que facilitam a decisão das escolhas de materiais e componentes na fase de projeto. Nesta fase, pode recorrer-se a modelos de previsão que permitam caracterizar as soluções a aplicar sem ter necessidade de recorrer a ensaios prévios. No entanto, muitos destes modelos assumem simplificações que originam resultados muito diferentes dos reais. Muitas vezes quando são efetuadas medições de isolamento sonoro, após a construção do edifício, verifica-se o não cumprimento dos requisitos acústicos devido às deficiências dos modelos de previsão utilizados.

Para evitar este tipo de situações, considera-se que os modelos de previsão devem ser sempre devidamente validados com resultados experimentais, de maneira a que se conheçam as suas limitações.

Neste trabalho, foi usado um modelo analítico de previsão de isolamentos a sons aéreos já existente, ao qual foram efetuadas algumas alterações, que será validado com resultados experimentais. O modelo será validado com paredes de diferentes constituições. Será usada uma base de dados com resultados de medições em câmaras acústicas com os quais será validado o modelo. Com estes resultados será possível aferir quais as limitações do modelo e, conseqüentemente, fazer variar os diferentes parâmetros na modelação, de maneira a aproximar os resultados analíticos dos experimentais.

ABSTRACT

Acoustic comfort in buildings depends on the characteristics of the construction elements. Vertical elements (walls) should be studied for airborne sound transmission and the horizontal elements (floor) should be studied both regarding airborne sound transmission and impact noise transmission.

The study of these elements and their characterization allows provides results that help in choosing the materials and the components during the project stage. At this phase it is possible to make use of models that allow the characterization of solutions without the need for previous experimental tests. However, some of these models include simplifications that may produce results very different from reality. Often, the experimental measurements, obtained after the construction of the building, do not comply with acoustic requirements due to faults in the behavior prediction models.

To avoid this type of situation, it is important that the prediction models are always duly validated with experimental results, and that their limitations are known.

In the present work an existing analytical model to predict airborne sound isolation, to which some changes have been introduced, is validated with experimental results. The model is validated using different walls. A set of results obtained from experimental measurements made in acoustic chambers is used to validate the model. A comparison of the results is made to assess the model limitations and, consequently make necessary adjustments to the model, in order to bring together the analytical and experimental results.

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS	v
ÍNDICE DE QUADROS	vii
SIMBOLOGIA	viii
1 INTRODUÇÃO	9
1.1 Considerações Gerais e Enquadramento	9
1.2 Objetivos.....	10
1.3 Relevância da Investigação	10
1.4 Organização da Dissertação.....	11
2 ESTADO DO CONHECIMENTO	12
2.1 Isolamento a Sons Aéreos.....	12
2.1.1 O Som.....	12
2.1.2 Fonte sonora	12
2.1.3 Caracterização do som.....	13
2.1.4 Acústica em edifícios.....	14
2.2 Modelos de Previsão.....	16
2.2.1 Modelos de Previsão Analíticos	16
2.2.2 Modelos de Previsão Numéricos	18
2.3 Determinação Experimental do Isolamento Sonoro (in-situ e em câmaras acústicas).....	20
3 MODELO ANALÍTICO.....	23
3.1 Introdução	23
3.2 Formulação Numérica	23
4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS VERSUS ANALÍTICOS	29
4.1 Introdução	29
4.2 Provetes Testados e Modelados.....	29
4.2.1 Características dos Materiais	31
4.2.2 Espessura	32
4.2.3 Massa Volúmica (ρ).....	32
4.2.4 Coeficiente de Poisson (ν)	32
4.2.5 Módulo de rigidez ou módulo de elasticidade transversal (G).....	33
4.2.6 Resistividade ao fluxo de ar para camadas porosas.....	33
4.2.7 Resumo das características dos materiais.....	34
4.3 Modelo Computacional	35
4.3.1 Introdução	35
4.3.2 Explicação do modelo computacional.....	35

4.3.3	Cálculos	37
4.4	Resultados Obtidos e sua Discussão.....	38
4.4.1	Introdução	38
4.4.2	Amostra 1	38
4.4.3	Amostra 2	39
4.4.4	Amostra 3	41
4.4.5	Amostra 4	42
4.4.6	Amostra 5	43
4.4.7	Amostra 6	44
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	47
	BIBLIOGRAFIA	49

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Excerto de um som puro de período T: evolução temporal (Tadeu et al., 2010).	13
Figura 2.2 – Transmissão sonora entre dois locais contíguos (Tadeu et al., 2010).....	15
Figura 2.3 – Efeito do contato de ondas sonoras com um elemento (Tecniwood, 2010).....	15
Figura 2.4 – Índice de Redução Sonora de um elemento de separação simples (Tadeu et al., 2010).....	17
Figura 2.5 – Comparação das curvas do Índice de Redução Sonora para uma parede simples e outra dupla com a mesma massa (Tadeu et al., 2010).....	18
Figura 2.6 – Câmaras Horizontais do ITeCons (Tadeu et al., 2008).....	21
Figura 3.1 – Geometria do problema (Tadeu et al., 2013).....	24
Figura 3.2 – Definição dos potenciais: a) camada sólida; b) camada fluida (Tadeu et al. 2013).....	25
Figura 4.1. – Fotografia do equipamento Pundit Lab.....	32
Figura 4.2. – Fotografia dos transdutores aquando da medição de um provete de gesso cartonado.....	33
Figura 4.3 – Malha de recetores usada nas simulações.....	36
Figura 4.4 – Gráfico exemplificativo das curvas de isolamento sonoro em todas as frequências comparativamente às curvas em bandas de frequências de 1/3 de oitava (neste caso relativos à Amostra 1).....	37
Figura 4.5 – Gráfico comparativo da curva de isolamento sonoro experimental, relativamente às curvas de isolamento provenientes do modelo numérico para a Amostra 1.....	39

Figura 4.6 – Gráfico comparativo da curva de isolamento sonoro experimental, relativamente às curvas de isolamento provenientes do modelo numérico para a Amostra 2.....40

Figura 4.7 – Gráfico comparativo da curva de isolamento sonoro experimental, relativamente às curvas de isolamento provenientes do modelo numérico para a Amostra 3.....41

Figura 4.8 – Gráfico comparativo da curva de isolamento sonoro experimental, relativamente às curvas de isolamento provenientes do modelo numérico para a Amostra 4.....42

Figura 4.9 – Gráfico comparativo da curva de isolamento sonoro experimental, relativamente às curvas de isolamento provenientes do modelo numérico para a Amostra 5.....44

Figura 4.10 – Gráfico comparativo da curva de isolamento sonoro experimental, relativamente às curvas de isolamento provenientes do modelo numérico para a Amostra 6.....45

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 4.1 – Caracterização das paredes testadas	29,30,31
Quadro 4.2 – Quadro resumo com as características dos materiais usados.....	34
Quadro 4.3 – Quadro resumo com as características do material poroso usado.....	34
Quadro 4.4 – Quadro resumo com as características do ar.....	34
Quadro 4.5 – Índices de isolamento sonoro (R_w) de cada curva relativos à Amostra 1.....	39
Quadro 4.6 – Índices de isolamento sonoro (R_w) de cada curva relativos à Amostra 2.....	40
Quadro 4.7 – Índices de isolamento sonoro (R_w) de cada curva relativos à Amostra 3.....	42
Quadro 4.8 – Índices de isolamento sonoro (R_w) de cada curva relativos à Amostra 4.....	43
Quadro 4.9 – Índices de isolamento sonoro (R_w) de cada curva relativos à Amostra 5.....	44
Quadro 4.10 – Índices de isolamento sonoro (R_w) de cada curva relativos à Amostra 6.....	46

SIMBOLOGIA

BEM – Método dos Elementos de Fronteira (Boundary Element Method).

cm³ – Centímetro cúbico.

dB – Decibel.

DEC – Departamento de Engenharia Civil.

EN – “*European Norm*”.

f – Frequência.

FEM – Método dos Elementos Finitos (Finite Element Method).

Hz – Hertz.

ISO – International Organization for Standardization.

ITeCons – Instituto de Investigação e Desenvolvimento Tecnológico em Ciências da Construção.

kg – Quilograma.

L₁ – Níveis médios de pressão sonora medido na câmara emissora.

L₂ – Níveis médios de pressão sonora medido na câmara receptora.

m – Metro.

m² – Metro quadrado.

m³ – Metro cúbico.

MFS – Método das Soluções Fundamentais (Method of Fundamental Solutions).

mm – Milímetro.

NP – Norma Portuguesa.

s – Segundos.

SEA – Statistical Energy Analysis.

R_w – Índice de Isolamento Sonoro.

T_r – Tempo de Reverberação.

V – Volume.

λ – Comprimento de Onda.

ρ – Massa Volúmica .

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Gerais e Enquadramento

Desde sempre, e ao longo da evolução das sociedades nas mais variadas vertentes, a componente habitacional tem sido uma das áreas mais importantes e determinantes para a qualidade de vida das pessoas, influenciando mesmo a sua maneira de viver.

Nos primórdios, as habitações serviam, somente, para proteção dos fatores do meio exterior, essencialmente climatéricos. Desde aí, houve uma constante evolução na área da construção, tanto a nível estrutural, como no desenvolvimento e aperfeiçoamento de novos materiais, ou ainda nas técnicas e meios ao dispor da construção civil.

Hoje em dia, as populações têm ao seu dispor edifícios com níveis de conforto elevadíssimos, dotados de alta tecnologia (tendo surgido os designados “edifícios inteligentes”). Começa a haver, por parte dos intervenientes, uma preocupação cada vez maior em termos de sustentabilidade e questões ambientais, tanto na fase de construção, como na sua posterior utilização.

A maior parte da população mundial vive em zonas de grande densidade populacional. Para além de todos os fatores positivos que isto pode trazer à vida das pessoas, advêm também destes fatos, fatores que se não forem devidamente levados em conta, podem criar desconforto, como problemas de saúde e sociais – deseconomias de aglomeração. Um destes fatores, cada vez mais tido em conta, é a poluição sonora.

Com cidades cada vez maiores, com a vivência em comunidade e com a existência de uma panóplia de fontes produtoras de ruído, tornou-se determinante o estudo aprofundado de meios para proporcionar as condições ideais, tentando reduzir ou mitigar condições de desconforto acústico na vida em comunidade.

Com a crescente preocupação em implementar um planeamento mais inteligente do território, essencialmente dentro das cidades, afastando as zonas habitacionais das zonas de maior ruído (zonas comerciais e zonas industriais), e com o desenvolvimento do estudo da acústica, tem-se tentado criar melhores condições ao nível do conforto acústico destes meios urbanos.

O estudo da acústica aplicado à prática tem permitido o desenvolvimento de novos materiais e novas técnicas de construção com preocupação em termos de condicionamento acústico e de isolamento sonoro. Para tal, foi necessário, desde os primórdios do estudo da acústica, a implementação de ensaios experimentais, e o desenvolvimento de modelos matemáticos.

Os ensaios experimentais, por norma, requerem o uso de uma grande quantidade de equipamento, geralmente caro, são demorados e têm que ser efetuados nos próprios locais ou em locais em que se simulem as condições o mais próximas possível da realidade.

Com o desenvolvimento da tecnologia, temos hoje computadores com melhor “hardware” ao alcance de todos e mais programadores com aptidão e formação para que se desenvolva software nas mais variadas áreas. A implementação deste tipo de recurso também na área da acústica, tem permitido simular a propagação do som através das soluções construtivas de forma mais rápida, sem uso de equipamento extra, e custos acrescidos.

1.2 Objetivos

Através da realização deste trabalho, pretendeu-se apresentar um estudo comparativo entre resultados experimentais de isolamento em paredes, obtidos em laboratório, e resultados de um modelo analítico que permite fazer uma simulação do isolamento a sons aéreos.

Efetuiu-se, para tal, uma seleção de diferentes tipos de paredes constituídas por um ou vários materiais, e com uma ou mais camadas. Os resultados experimentais são provenientes de ensaios realizados nas câmaras acústicas do ITeCons. Inseriram-se as propriedades de cada parede no modelo analítico introduzindo a espessura de cada camada e as várias propriedades específicas de cada material, como será descrito pormenorizadamente mais à frente.

O objetivo principal foi averiguar a viabilidade do modelo analítico para simular a propagação do som através dos diferentes tipos de parede, verificando-se, então, se os resultados obtidos seriam próximos.

1.3 Relevância da Investigação

Com uma crescente preocupação, em relação ao conforto acústico e com uma legislação que limita o ruído dentro das habitações, torna se evidente que os estudos nesta área tenham tido

um grande crescimento. Verifica-se, cada vez mais, a utilização do computador para substituir as mais variadas tarefas. A possibilidade de ensaios de isolamento sonoro serem simulados tendo por base um modelo analítico que consiga obter resultados semelhantes aos obtidos experimentalmente, resultará uma menor utilização de meios, equipamento apropriado, tempo e com isto custos menos dispendiosos.

1.4 Organização da Dissertação

No Capítulo 1 faz-se a introdução à dissertação onde, é feito o enquadramento do trabalho científico e tecem-se algumas considerações gerais. São definidos os objetivos e é apresentada a dissertação estruturada.

No Capítulo 2, descreve-se o estado do conhecimento. Neste capítulo é feita uma revisão bibliográfica e documental de artigos, teses e casos de estudo relativos a modelos de previsão de isolamento sonoro já existentes.

No Capítulo 3 descreve-se o modelo analítico usado no decurso do trabalho.

No Capítulo 4 descreve-se todo o trabalho desenvolvido, apresentam-se os resultados obtidos e é feita a sua análise.

No Capítulo 5 são apresentadas as principais conclusões retiradas do trabalho, bem como propostas a desenvolver em trabalhos futuros.

2 ESTADO DO CONHECIMENTO

2.1 Isolamento a Sons Aéreos

2.1.1 O Som

“O som resulta da libertação de energia emitida por uma fonte, a qual se propaga sob a forma de ondas mecânicas capazes de produzir flutuações de pressão percepcionáveis pelo ouvido humano. A aptidão do ouvido para a captação das ondas sonoras com a mesma energia mas com distintas frequências é diferente. Em frequências muito baixas (infra-sons) e em frequências muito elevadas do espectro (ultra-sons), a sensibilidade auditiva diminui consideravelmente” (Tadeu et al., 2010).

O som, à sua passagem, provoca perturbações no ar. Estas manifestam-se por contrações e dilatações de volumes de ar elementares que só são perceptíveis pelo ouvido humano, quando estão dentro de certos limites. Estas percepções dependem da amplitude e da taxa de variação com que ocorrem na unidade de tempo (frequência).

A diferenciação entre som e ruído torna-se difícil de estabelecer, sendo muitas vezes subjetiva. Considera-se que o som provoca uma sensação agradável, e o ruído é equivalente a sons que provocam sensações indesejáveis.

2.1.2 Fonte sonora

As fontes sonoras podem ser de vários tipos. A fonte sonora provoca a excitação do meio fluido envolvente, que inicialmente estaria em equilíbrio, devido à emissão de energia sonora, provocando a variação do estado da pressão, temperatura e massa específica ao propagar-se através do meio. Em acústica as fontes mais fáceis de modelar são a fonte pontual, a fonte linear e a fonte plana.

2.1.3 Caracterização do som

No caso do som a frequência (f) está relacionada com a vibração das partículas, isto é, a frequência da onda sonora é função do número de vezes que a partícula se move para a frente e para trás por unidade tempo. Corresponde ao número de oscilações completas (ciclos) por segundo. A gama de frequências audíveis pelo ser humano, estende-se entre os 20 Hz e os 20 kHz. No entanto, o ouvido humano não responde de forma linear ao som ao longo das variações em frequência. Uma frequência alta caracteriza-se perante o ouvido humano como sendo um som agudo, e uma frequências baixa tida em conta como um som grave.

A frequência pode ainda ser definida como o inverso do período (T , tempo de duração de cada ciclo), ver Figura 2.1

$$f = \frac{1}{T} \text{ (Hz)} \quad (2.1)$$

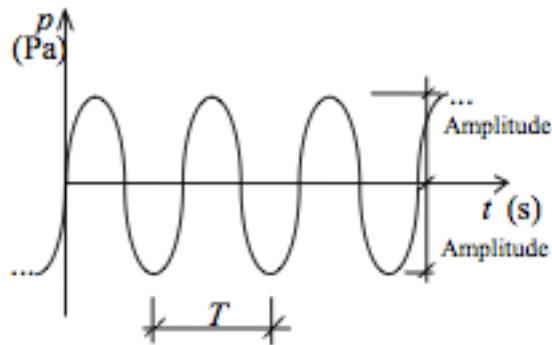


Figura 2.1 – Excerto de um som puro de período T : evolução temporal.

O período pode ainda relacionar-se com o comprimento de onda, λ

$$T = \frac{\lambda}{c} \quad (2.2)$$

O comprimento de onda refere-se à distância entre dois pontos consecutivos com a mesma pressão (máxima ou mínima), onde c é a velocidade de propagação do som.

A escala frequentemente usada para a resposta do ouvido em relação à energia sonora provocada pelo som é denominada em unidades SI por bel ou por decibel (dB, quando resulta da multiplicação desses por 10). Esta escala provem do logaritmo da relação entre os quadrados da pressão sonora medida e da de referência, definindo-se pressão sonora como a variação da pressão relativamente ao valor da pressão estática do ar, por norma $10^5 Pa$. A gama comum de pressões audíveis pelo ser humano, em geral começa em $20\mu Pa$ (limiar de audição) e vai até $20 Pa$ (limiar de desconforto). Calculando-se estes valores numa escala de decibel, obtem-se 0dB e 120dB. A partir de 140 dB corresponde ao limiar da dor, podendo ocorrer mesmo lesões permanentes na audição a partir dos 160 dB.

2.1.4 Acústica em edifícios

O estudo da acústica aplicada ao isolamento em edifícios consiste no dimensionamento adequado de uma separação física entre dois espaços, com o objetivo de obter o ambiente acústico ideal para o qual se destina. Este tipo de estudos tanto podem ser usados para isolar do ruído proveniente do exterior do edifício, como de divisões na mesma habitação ou de habitações vizinhas. Entende-se por isolamento sonoro a diferença de nível sonoro verificado entre o espaço da fonte sonora e o espaço onde se encontra o recetor. As separações físicas, paredes, tetos, pavimentos, além da função de isolamento acústico, têm ainda a componente de isolamento térmico, podendo ser constituídas por vários tipos de materiais e camadas com as mais variadas espessuras.

Quando o som incide numa parede só parte da energia sonora será transmitida através desta, sendo a restante dissipada e refletida. A energia transmitida para outro local poderá ocorrer de forma direta caso seja pela parede que separa os dois espaços, ou de forma secundária, que ocorre através dos elementos adjacentes (ver Figura 2.2).

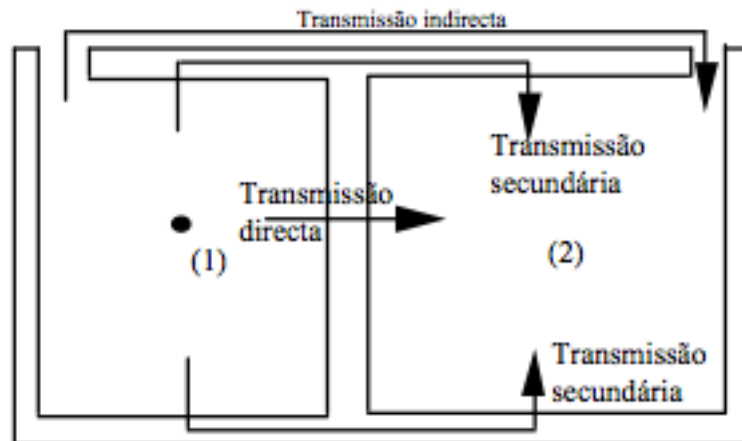


Figura 2.2 – Transmissão sonora entre dois locais contíguos (Tadeu et al., 2010).

A transmissão sonora entre dois espaços é um fenómeno de uma enorme complexidade. Esta processa-se por vibração do elemento, sendo a massa por unidade de área do elemento e a frequência do som variáveis relevantes, envolvendo no entanto um maior número de variáveis, como o tipo de materiais constituintes dos elementos separadores, tendo em conta a sua heterogeneidade, respetivas ligações, características elastodinâmicas, e ainda as características dos campos sonoros emissor e receptor. A energia sonora ao incidir nestas barreiras, devido a existência de diversos materiais, provoca velocidades de propagação do som diferentes, ocorrendo fenómenos de transmissão, reflexão e difração (Figura 2.3).

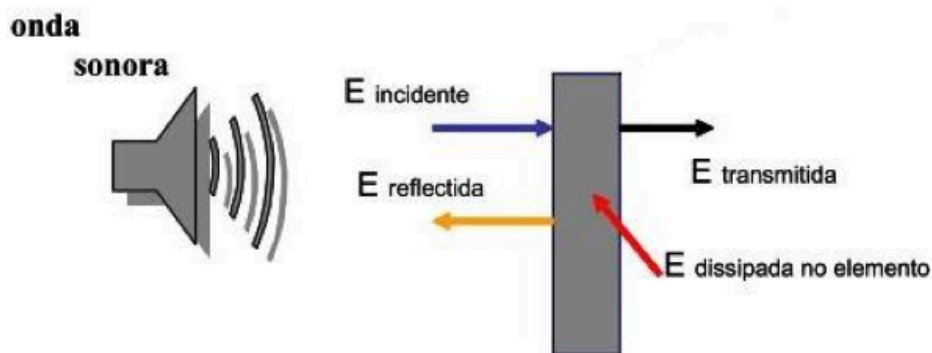


Figura 2.3 – Efeito do contato de ondas sonoras com um elemento (Tecnwood, 2010).

O tempo de reverberação (T_r) define-se como o tempo em segundos necessários para se registrar um decaimento do nível sonoro em um milhão de vezes, isto corresponde a um decaimento de 60 dB após se desligar a fonte sonora. O valor de T_r varia consoante o espaço envolvente, depende da geometria/volume, tipo de revestimento(s) do compartimento e ainda entre outros do recheio existente no seu interior. Exemplificando-se, num espaço fechado em que o seu interior seja muito refletor haverá uma maior permanência do som após desligada a fonte sonora. Caso o interior tenha propriedades mais absorventes o som tenderá a dissipar-se de forma mais rápida. Na prática, nem sempre é fácil obter uma medição correta do tempo de reverberação. Se o ruído de fundo for originalmente alto não se consegue medir um decaimento de 60 dB. Assim sendo, o que é feito habitualmente é medir o valor do tempo para um decaimento de 20 dB ou 30 dB e seguidamente extrapolar para 60 dB. Esta é uma metodologia válida, embora se use a simplificação de extrapolar linearmente o decaimento. O tempo de reverberação mede-se quando se pretende caracterizar a qualidade acústica de um determinado espaço fechado. É também um parâmetro necessário quando se pretende calcular o isolamento sonoro a partir de ensaios experimentais.

2.2 Modelos de Previsão

2.2.1 Modelos de Previsão Analíticos

A formulação de um algoritmo matemático, capaz de prever o isolamento sonoro em paredes divisórias, torna-se complicada devido à diversidade e complexidade dos vários fenómenos envolvidos. Muitos modelos existentes modelam somente um número limitado de variáveis.

Um método simplificado comum usado para estimar a redução sonora, é a Lei da Massa. Este modelo assume que um elemento se comporta como um grupo infinito de massas justapostas que se movem de forma independente, não tendo em conta as forças de amortecimento e a rigidez, que condicionam fenómenos tais como a vibração transversal por flexão pura e o efeito de coincidência.

A vibração transversal por flexão pura ou influência de ressonâncias de baixa ordem ocorre na maior parte dos elementos. Esta provoca uma variação na curva de isolamento, por norma nas frequências baixas (na casa dos 100 Hz), estando dependente das características elásticas (rigidez e amortecimento), das ligações a outros elementos e das dimensões do mesmo. O efeito de coincidência dá-se quando o comprimento da onda sonora incidente na parede é igual ao comprimento das ondas de flexão dessa parede. Este fenómeno por norma acontece nas frequências mais altas e em materiais de fraco amortecimento (ver Figura 2.4).

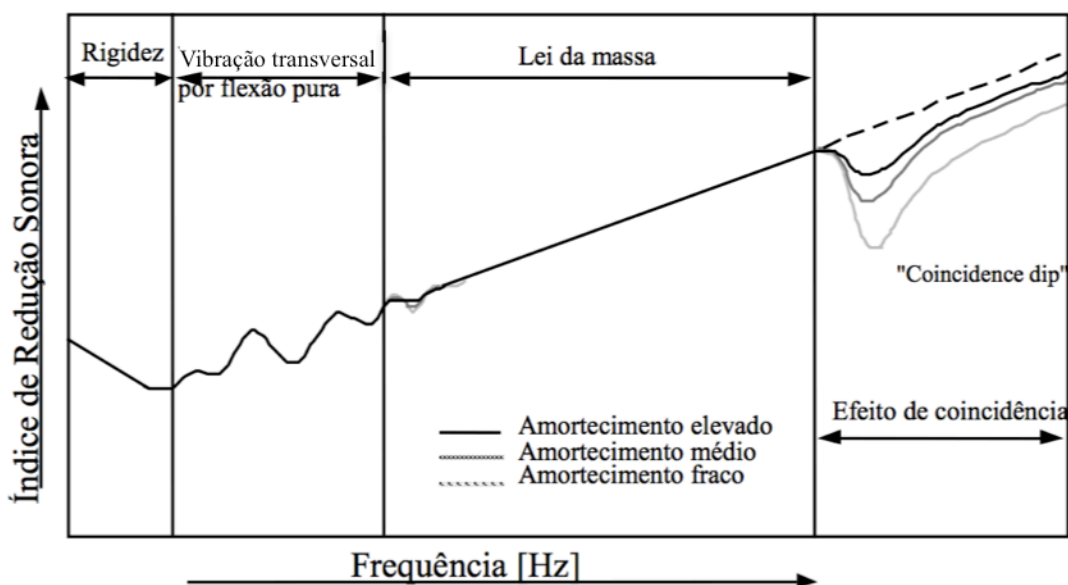


Figura 2.4 – Índice de Redução Sonora de um elemento de separação simples (Tadeu et al., 2010).

Devido às limitações deste modelo, vários investigadores propuseram modelos alternativos de maneira a obterem-se resultados mais próximos da realidade. Como a Lei da Massa não prevê a existência de depressões na curva de isolamento provocadas pelos fenómenos dinâmicos, Novikov (1998, citado por Tadeu et al, 2013) adicionou neste modelo um coeficiente de correção aproximado de isolamento de som para placas finitas. Em paredes constituídas por dois painéis diferentes separadas por uma caixa de ar, a complexidade do problema aumenta. Tem que se ter em conta as várias frequências de ressonâncias e o comportamento dinâmico global do sistema de painéis e camada de ar (ver Figura 2.5). Para estes casos, London (1950, citado por Godinho et al., 2006) propôs um modelo para um sistema de painéis de igual massa separados por uma caixa de ar para um conjunto de ondas incidentes abaixo da frequência crítica dos painéis. Este modelo sofre à posteriori alterações matemáticas por Beranek (1960, citado por Tadeu et al., 2013), tendo estas em conta a quebra da frequência de ressonância conjunto massa-ar-massa. Fahy (2001, citado por Godinho et al., 2006) desenvolveu um modelo simplificado para paredes em que o seu interior é preenchido por uma camada de material absorvente em vez do ar. Este método simula a massa volúmica do ar existente na cavidade como uma grandeza, que depende da resistividade do fluxo e da porosidade do material absorvente. Xin e Lu (2011, citado por Tadeu et al., 2013) determinaram o som transmitido através de paredes triplas propondo uma aproximação analítica quando estes painéis são separados por caixas de ar.

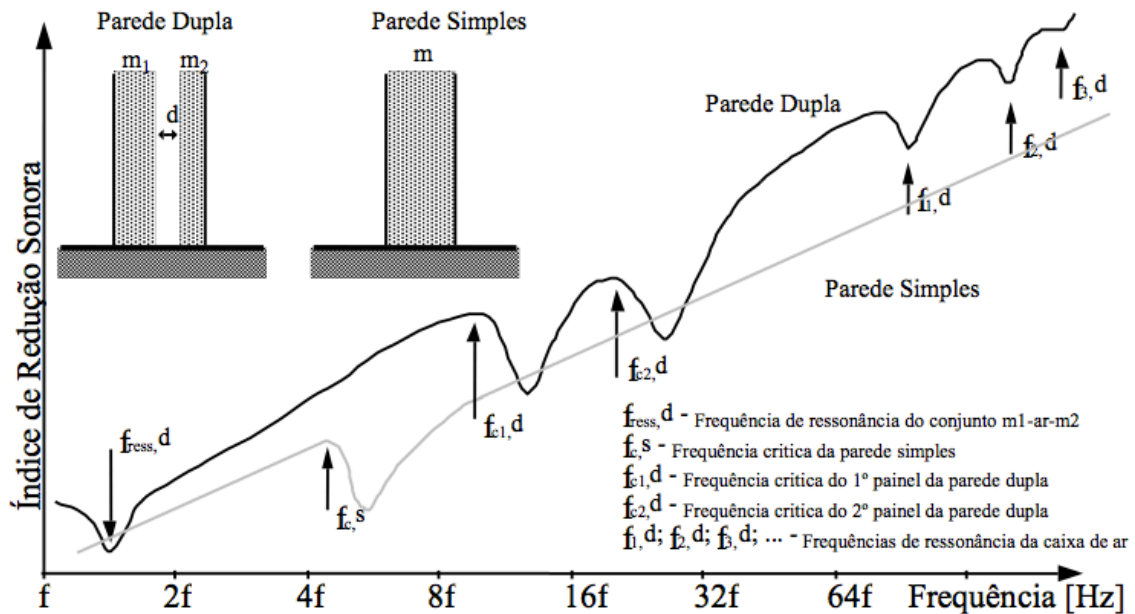


Figura 2.5 – Comparação das curvas do Índice de Redução Sonora para uma parede simples e outra dupla com a mesma massa (Tadeu et al., 2010).

2.2.2 Modelos de Previsão Numéricos

Os métodos de previsão analíticos, na maior parte dos casos, não conseguem modelar todas as variáveis envolvidas nos fenómenos de propagação do som. Com o desenvolvimento computacional, nos últimos anos foi possível criar modelos numéricos mais complexos, em relação à propagação sonora, que permitiu a inclusão de um maior número de variáveis e cálculos de maior complexidade. Os métodos utilizados além de serem relevantes na área da acústica, são usados também para simulação da prospecção geofísica, a análise sísmica, psicoacústica, acústica fisiológica, inspeção ultra-sónica, mecânica da fratura ou a detecção e/ou localização de defeitos através de técnicas não destrutivas, entre outras.

Para a previsão do isolamento sonoro de paredes, podem-se aplicar métodos numéricos bem conhecidos, tais como o Método dos Elementos de Fronteira (Boundary Element Method – BEM), o Método dos Elementos Finitos (Finite Element Method – FEM), o Método das Diferenças Finitas, o Método das Soluções Fundamentais (Method of Fundamental Solutions - MFS), e o SEA (Statistical Energy Analysis).

Panneton e Atalla (1996, citado por Tadeu et al., 2013), propôs um modelo numérico com base no Método dos Elementos Finitos capaz de simular a transmissão do som através de uma parede constituída por várias camadas, podendo estas terem características elásticas, poro-elásticas ou somente ar. Usando o Método dos Elementos Finitos, acoplado com o Método dos Elementos de Fronteira, Sgard et al. (2000, citado por Tadeu et al., 2013), programaram o isolamento sonoro nas baixas frequências em campo difuso de paredes duplas preenchidas com materiais porosos. Coz Díaz et al. (2010, citado por Tadeu et al., 2013) aplicaram o Método dos Elementos Finitos e criaram um modelo a duas dimensões tendo em conta a interação sólido-fluido para prever o isolamento em estruturas multi-camada de tijolo perfurado de betão leve. Os resultados provenientes deste modelo, em comparação com os obtidos experimentalmente mostraram-se precisos na gama de frequências entre 100Hz-5000Hz.

O SEA (Statistical Energy Analysis) foi um de outros métodos usados por outros autores para o cálculo de som transmitido através de painéis sólidos, tais como, Steel e Craik (1994, citado por Tadeu et al., 2004), que demonstraram que combinando o SEA com o Método dos Elementos Finitos, o FEM seria indicado para estimar o acoplamento entre os sub-sistemas, requerido pelo SEA. Mais tarde, Craik et al Craik (1997, citado por Tadeu et al., 2004), com recurso ao SEA calcularam a perda do som transmitido através das ligações estruturais de paredes duplas leves. E mais recentemente Craik e Smith (2000, citado por Tadeu et al., 2004) usaram-no para modelar uma parede dupla leve como um sub-sistema simples para baixas frequências e um conjunto de sub-sistemas interligados para altas frequências.

Vários outros autores usaram outros modelos para o estudo da transmissão sonora através de paredes multicamada baseados nas mais variadas teorias. Kropp e Rebillard (1999, citado por Tadeu et al., 2004) para o cálculo do isolamento sonoro em paredes duplas, usaram uma matriz que evita as limitações impostas pela espessura das camadas impostas pelas teorias de Kirchoff ou Mindlin, sendo as propriedades das vibrações de um dos lados do painel descritas em função das definidas no outro lado do painel. Também o trabalho realizado por Fringuelino e Guglielmone (2000, citado por Tadeu et al., 2004) usa uma abordagem baseada no conhecimento prévio das características da impedância do material de cada camada para o cálculo de transmissão do som em paredes de várias camadas. Bolton et al. (1996, citado por Tadeu et al., 2004), através da teoria de propagação multi-dimensional de ondas para materiais elástico-porosos baseado na teoria de Biot, obteve resultados aproximados em relação aos obtidos laboratorialmente para paredes duplas com caixa de ar preenchida por espuma de poliuterano (Tadeu et al., 2004).

Outros métodos existentes para o cálculo do isolamento sonoro são abordados no livro de autoria de Mechel (Mechel, 2002).

2.3 Determinação Experimental do Isolamento Sonoro (in-situ e em câmaras acústicas)

Para a medição do isolamento sonoro a sons aéreos por via experimental, tanto in-situ como em laboratório, pode recorrer-se a três tipos de métodos distintos: o método da caracterização experimental, baseado nas normas ISO ou EN (método ISO/CEN); o método da holografia acústica; e o método de intensimetria sonora.

No método da caracterização experimental para a determinação do isolamento sonoro, as normas frequentemente usadas em Portugal para ensaios de acústica em laboratório são a ISO 10140-1, ISO 10140-2 e a ISO 10140-4. Para a determinação do isolamento sonoro in-situ usa-se a NP EN ISO 140-4 e para o tempo de reverberação a NP EN 3382-2.

Neste trabalho utilizaram-se resultados obtidos a partir de ensaios laboratoriais provenientes do Instituto de Investigação e Desenvolvimento Tecnológico e Ciências da Construção – ITeCons, onde a medição do isolamento sonoro a sons de condução aérea se faz de acordo com as normas ISO 10140-1, ISO 10140-2 e a ISO 10140-4. O ensaio realiza-se num conjunto de duas câmaras acústicas móveis, sendo uma delas a câmara emissora (contém uma fonte sonora omnidireccional) e outra receptora. Ambas contêm diversos microfones rotativos que fazem medições da pressão sonora. O elemento a testar (parede) fica inserido entre as duas câmaras aquando da realização do ensaio.

As normas estabelecem ainda as seguintes especificações:

- As dimensões das câmaras acústicas;
- Os níveis de ruído de fundo na câmara receptora, que devem ser suficientemente baixos, para permitir medir o som proveniente da câmara emissora sem influenciar os resultados do ensaio de isolamento;
- O volume deverá ser superior a 50 m³;
- O limite máximo e mínimo dos tempos de reverberação que estas devem apresentar nas baixas frequências;
- A abertura de ensaio para a colocação do provete;
- Relativamente às dimensões das câmaras acústicas de ensaio, recomenda-se que o volume da câmara adjacente não seja igual, sugerindo-se que a diferença entre os respetivos volumes e/ou dimensões lineares seja de, pelo menos, 10%;
- Indica uma área aproximada de 10 m², para a abertura de ensaio, no caso de paredes;

- O lado menor da câmara deve ter um comprimento superior a 2,3 m;

No caso do ITeCons os provetes (paredes) a serem ensaiados apresentam dimensões de 3,16 m por 3,16 m, isto é, com área aproximada de 10 m². O provete é inserido entre as duas câmaras acústicas, sendo de seguida comprimido como se pode observar na Figura 2.6. O cálculo do isolamento de um determinado elemento divisório não se limita à diferença entre os níveis de pressão entre as duas câmaras (isolamento acústico puro), mas deve ter em conta também os tempos de reverberação existentes na câmara receptora (isolamento acústico corrigido) (Tadeu et al. 2008), (Tadeu et al. 2010).

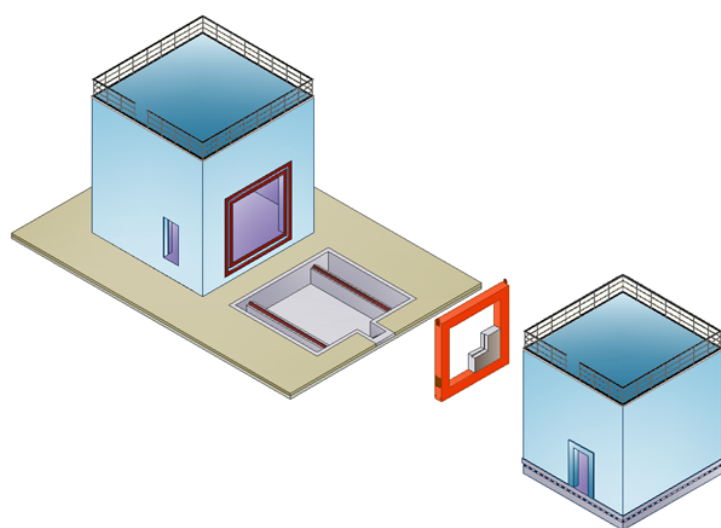


Figura 2.6 – Câmaras Horizontais do ITeCons (Tadeu et al., 2008).

Para ensaios efetuados em laboratório, a determinação do isolamento corrigido, para cada banda de frequências, é dado por:

$$R=L_1-L_2+10\log\frac{S T_r}{0,16 V} \quad (2.1)$$

L_1 – níveis médios de pressão sonora medido na câmara emissora (dB);

L_2 - níveis médios de pressão sonora medido na câmara receptora (dB);

T_r – média dos tempos de reverberação medidos na câmara receptora (s);

S – área do provete de ensaio (m²);

V – volume da câmara receptora (m³).

Após o ensaio ao elemento construtivo, com os dados obtidos determina-se a curva do isolamento sonoro, em terços de oitava, numa gama alargada de frequências entre 100 Hz e 5000 Hz. De seguida, efetua-se o cálculo correspondente ao índice de redução sonora ponderado (R_w).

3 MODELO ANALÍTICO

3.1 Introdução

Utilizou-se para a ferramenta de cálculo um modelo que permite a simulação da propagação sonora tridimensional (3D), modelada no domínio da frequência, em painéis multicamada (Tadeu et al., 2013).

Neste modelo introduz-se, ainda, o efeito de campo difuso, que o modelo original não continha, podendo assim calcular reflexões adicionais que podem acontecer com a presença de obstáculos laterais.

3.2 Formulação Numérica

O modelo efetua a simulação da propagação tridimensional (3D) de ondas em meios sólidos e/ou fluidos, geradas por fontes sonoras pontuais (3D).

As ondas de pressão sonora, geradas por uma fonte pontual harmónica localizada em (x_0, y_0, z_0) , no lado esquerdo da parede (o fluido exterior), num meio fluido uniforme (Figura 3.1), num receptor (x, y, z) , podem ser expressas como um integral de Bessel

$$\hat{p}_{inc}(x, y, z, \omega) = \frac{e^{-i\frac{\omega}{\alpha f_{outer}}r_{000}}}{r_{000}} = -i \int_0^\infty J_0(k_y r) \frac{k_y E_f^{f_{outer},0}}{v_{f-0}^{f_{outer}}} dk_y \quad (3.1)$$

sendo $v_{f-0}^{f_{outer}} = \sqrt{\left(\frac{\omega}{\alpha f_{outer}}\right)^2 - k_y^2}$, $E_f^{f_{outer},0} = e^{-i v_{f-0}^{f_{outer}} |y-y_0|}$, $J_0(\cdot)$ são funções de Bessel de ordem 0, k_y é o número de onda na direção y e $r = \sqrt{(x-x_0)^2 + (z-z_0)^2}$. Nesta equação, e nas seguintes, o termo $e^{i\omega t}$ está implícito e não é apresentado.

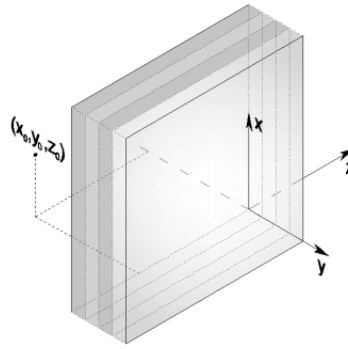


Figura 3.1 – Geometria do problema (Tadeu et al., 2013)

Este integral pode ser expresso como uma soma discreta se assumirmos a existência de fontes virtuais, igualmente espaçadas de L_y , na direção y ,

Usando a teoria da distribuição definida por Schwartz (Schwartz, 1966), a equação pode ser expressa como

$$\hat{p}_{inc}(x, y, z, \omega) = \frac{-2\pi i}{L_y} \sum_{n=1}^N J_0(k_n r) k_n \frac{E_{nf}^{f_{outer_0}}}{v_{nf}^{f_{outer}}} \quad (3.2)$$

com $v_{nf}^{f_{outer}} = \sqrt{\left(\frac{\omega}{\alpha_{f_{outer}}}\right)^2 - k_n^2}$, $E_{nf}^{f_{outer_0}} = e^{-iv_{nf}^{f_{outer}}|y-y_0|}$, $k_n = \frac{2\pi}{L_y}n$. A distância L_y é definida de maneira a prevenir a contaminação da resposta devido às fontes virtuais, isto é, não pode ser demasiado pequena. A utilização de frequências complexas com uma parte imaginária pequena $\omega_c = \omega - i\eta$ permite atenuar a contribuição das fontes virtuais para a resposta.

As ondas de pressão incidente propagam-se e atingem a parede multicamada e são reflectidas e refractadas, gerando um campo sonoro complexo que se propaga através das diferentes camadas da parede, sofrendo fenómenos sucessivos de reflexão e refacção. Algumas destas ondas atingem o outro lado da parede multicamada.

A solução deste fenómeno complexo pode ser obtida adicionando a contribuição de um conjunto de termos de superfície, definidos para a interface de cada material. Estes termos podem ser expressos como a soma de um potencial dilatacional (φ) e um potencial de corte (ψ) no caso de uma camada sólida e um potencial dilatacional no caso de uma camada fluida (Figura 3.2).

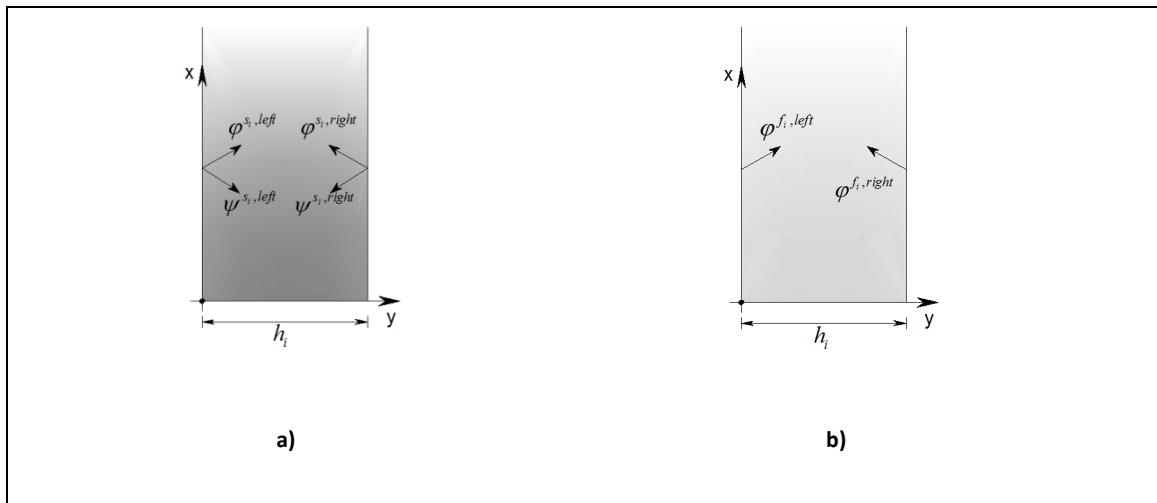


Figura 3.2 - Definição dos potenciais: a) camada sólida; b) camada fluida (Fonte: Tadeu et al. 2013).

Todas as interfaces sólido-fluido e sólido-sólido geram termos de superfície expressos por potenciais com amplitudes desconhecidas à partida. A amplitude desses potenciais é definida de forma a satisfazer a continuidade de deslocamentos e tensões normais e tensões tangenciais nulas nas interfaces fluido-sólido e continuidade de deslocamentos e tensões ao longo das interfaces sólido-sólido.

Constrói-se de seguida um sistema global de equações para a parede multicamada, a partir de um conjunto de sub-matrizes associadas a cada camada individual, e impondo as condições fronteira. De seguida, descreve-se o procedimento para obter cada sub-matriz.

Camada sólida

Para a camada sólida i , os potenciais de deslocamento nas fronteiras esquerda e direita podem ser escritos como:

Potenciais de deslocamento no lado esquerdo para painéis sólidos.

$$\varphi^{s_i, left} = E_a^{s_i} \sum_{n=1}^{n=+N} [-J_0(k_n r) k_n E_{b0}^{s_i} \text{sign}(y - y^{i, left}) A_n^{1, s_i}] \quad (3.3)$$

$$\psi^{s_i, left} = E_a^{s_i} \sum_{n=1}^{n=+N} [J_0(k_n r) k_n \frac{E_{c0}^{s_i}}{-i\gamma_n^{s_i}} A_n^{2, s_i}] \quad (3.4)$$

Potenciais de deslocamento no lado direito para painéis sólidos.

$$\varphi^{s_i, right} = E_a^{s_i} \sum_{n=1}^{n=+N} [-J_0(k_n r) k_n E_{b1}^{s_i} \text{sign}(y - y^{i, right}) A_n^{3, s_i}] \quad (3.5)$$

$$\psi^{s_i, right} = E_a^{s_i} \sum_{n=1}^{n=+N} [J_0(k_n r) k_n \frac{E_{c1}^{s_i}}{-i\gamma_n^{s_i}} A_n^{4, s_i}] \quad (3.6)$$

com $E_a^{s_i} = \frac{\pi}{\rho^{s_i} \omega^2 L_y}$, ρ^{s_i} é a massa volúmica da camada sólida i , $E_{c0}^{s_i} = e^{-i\gamma_n^{s_i} |y - y^{i, left}|}$, $E_{c1}^{s_i} = e^{-i\gamma_n^{s_i} |y - y^{i, right}|}$, $y^{i, left}$ e $y^{i, right}$ são as coordenadas das fronteiras esquerda e direita da camada i , respectivamente, $E_{b0}^{s_i} = e^{-i\nu_n^{s_i} |y - y^{i, left}|}$, $E_{b1}^{s_i} = e^{-i\nu_n^{s_i} |y - y^{i, right}|}$, $\nu_n^{s_i} = \sqrt{(k_p^{s_i})^2 - k_n^2}$ ($\text{Im}(\nu_n^{s_i}) \leq 0$), $\gamma_n^{s_i} = \sqrt{(k_s^{s_i})^2 - k_n^2}$ ($\text{Im}(\gamma_n^{s_i}) \leq 0$), $k_p^{s_i} = \frac{\omega}{\alpha^{s_i}}$ e $k_s^{s_i} = \frac{\omega}{\beta^{s_i}}$. α^{s_i} e β^{s_i} são as velocidades de propagação das ondas dilatacionais e de corte no meio sólido. A_n^{k, s_i} ($k = 1, 4$) são as amplitudes dos potenciais de deslocamento no sólido.

Camada fluida

No caso de uma camada fluida, apenas um potencial dilatacional necessita de ser definido uma vez que o fluido não tem resistência ao corte. Para a camada fluida, i , com uma constante de Lamé λ^{f_i} e uma velocidade das ondas de α^{f_i} , os potenciais dilatacionais do lado esquerdo e direito podem ser escritos como:

Potencial de pressão ou dilatacional do lado esquerdo:

$$\psi^{f_i, left} = \frac{-2\pi i}{L_y} \sum_{n=1}^{n=+N} [J_0(k_n r) k_n \frac{-(\alpha^{f_i})^2}{\omega^2 \lambda^{f_i}} \frac{E_{f0}^{f_i}}{\nu_{nf}^{f_i}} A_n^{1, f_i}] \quad (3.7)$$

Potencial de pressão ou dilatacional do lado direito:

$$\psi^{f_i, right} = \frac{-2\pi i}{L_y} \sum_{n=1}^{n=+N} [J_0(k_n r) k_n \frac{-(\alpha^{f_i})^2}{\omega^2 \lambda^{f_i}} \frac{E_{f1}^{f_i}}{\nu_{nf}^{f_i}} A_n^{2, f_i}] \quad (3.8)$$

Com $E_{f0}^{f_i} = e^{-i\nu_n^{f_i} |y - y^{i, left}|}$, $E_{f1}^{f_i} = e^{-i\nu_n^{f_i} |y - y^{i, right}|}$, $y^{i, left}$ e $y^{i, right}$ sendo as coordenadas dos lados esquerdo e direito da camada fluida i , respectivamente, $\nu_{nf}^{f_i} = \sqrt{k_{fi}^2 - k_n^2}$, com $\text{Im}(\nu_{nf}^{f_i}) \leq 0$ e $k_{fi} = \frac{\omega}{\alpha^{f_i}}$. A_n^{1, f_i} , A_n^{2, f_i} são as amplitudes dos potenciais dilatacionais.

Fluidos que ladeiam a parede multicamada

Assumindo que o fluido exterior tem uma constante de Lamé $\lambda^{f_{outer}}$ e permite uma velocidade de propagação do som $\alpha^{f_{outer}}$, e o fluido interior tem uma constante de Lamé $\lambda^{f_{inner}}$ e permite uma velocidade de propagação do som $\alpha^{f_{inner}}$, os potenciais dilatacionais serão:

$$\text{Fluido exterior: } \varphi^{f_{outer}} = \frac{-2\pi i}{L_y} \sum_{n=1}^{n=+N} [J_0(k_n r) k_n \frac{-(\alpha^{f_{outer}})^2}{\omega^2 \lambda^{f_{outer}}} \frac{E_f^{f_{outer}}}{v_{nf}^{f_{outer}}} A_n^{f_{outer}}] \quad (3.9)$$

$$\text{Fluido interior: } \varphi^{f_{inner}} = \frac{-2\pi i}{L_y} \sum_{n=1}^{n=+N} [J_0(k_n r) k_n \frac{-(\alpha^{f_{inner}})^2}{\omega^2 \lambda^{f_{inner}}} \frac{E_f^{f_{inner}}}{v_{nf}^{f_{inner}}} A_n^{f_{inner}}]$$

com $E_f^{f_{outer}} = e^{-iv_{nf}^{f_{outer}}|y|}$, $E_f^{f_{inner}} = e^{-iv_{nf}^{f_{inner}}|y-h|}$, $v_{nf}^{f_{outer}} = \sqrt{k_{f_{outer}}^2 - k_n^2}$, $v_{nf}^{f_{inner}} = \sqrt{k_{f_{inner}}^2 - k_n^2}$, onde $\text{Im}(v_{nf}^{f_{outer}}) \leq 0$, $\text{Im}(v_{nf}^{f_{inner}}) \leq 0$, $k_{f_{outer}} = \frac{\omega}{\alpha^{f_{outer}}}$, $k_{f_{inner}} = \frac{\omega}{\alpha^{f_{inner}}}$, e h é a espessura total da parede. $A_n^{f_{outer}}$ e $A_n^{f_{inner}}$ são as amplitudes dos potenciais dilatacionais associados com os fluidos externos à parede.

A pressão e o deslocamento normal nos fluidos localizados em ambos os lados da parede multicamada podem ser definidos de forma análoga aos da camada fluida.

As amplitudes desconhecidas dos potenciais são obtidas através da resolução de um sistema de m equações, com $m = 2 + 2n_f + 4n_s$ (n_s e n_f são respectivamente o número de camadas sólidas e fluidas obtido pela imposição das condições fronteira necessárias). A pressão nos fluidos externos à parede pode ser determinada fazendo uso da formulação anterior, após se terem determinado as amplitudes desconhecidas.

No lado esquerdo da parede multicamada

$$\hat{p}_{inc}(x, y, z, \omega) = \frac{e^{\frac{i\omega}{\alpha^{f_{outer}}(\alpha^{f_{outer}}t - r_{000})}}}{r_{000}} + \frac{-2\pi i}{L_y} \sum_{n=1}^{n=+N} [J_0(k_n r) k_n \frac{E_f^{f_{outer}}}{v_{nf}^{f_{outer}}} A_n^{f_{outer}}] \quad (3.10)$$

No lado direito da parede multicamada

$$\hat{p}_{inc}(x, y, z, \omega) = \frac{-2\pi i}{L_y} \sum_{n=1}^{n=N} [J_0(k_n r) k_n \frac{E_f^{f_{inner}}}{v_{nf}^{f_{inner}}} A_n^{f_{inner}}] \quad (3.11)$$

O modelo atrás descrito simula sistemas multicamada de dimensões (comprimento e largura) infinitas, introduziu-se uma alteração no calculo para poder incluir o efeito de um campo difuso, no meio fluido onde se encontra a fonte sonora, e assim poder incluir reflexões adicionais devido à presença de obstáculos laterais.

Do lado do emissor o modelo permite simular a existência de paredes laterais nas direções x e z . Esta simulação é realizada posicionando fontes sonoras virtuais de modo a simular a existência daquelas superfícies laterais consideradas rígidas, através da técnica conhecida como imagem de fontes.

4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS VERSUS ANALÍTICOS

4.1 Introdução

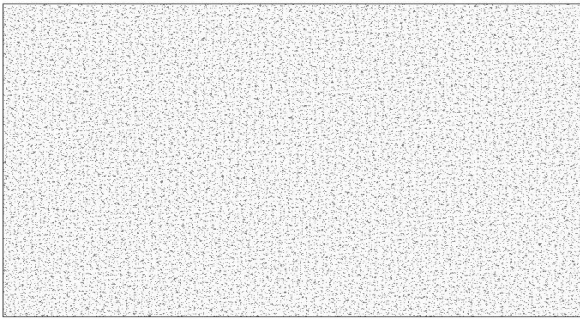
Neste capítulo descreve-se a metodologia utilizada. São apresentados os tipos de parede usados, as suas especificações, e os tipos de materiais que as constituem. São também descritos os processos utilizados para determinação das características destes materiais, necessárias para a sua inserção no modelo computacional.

Apresenta-se, ainda, de forma descritiva, ao nível do utilizador o modelo computacional utilizado, descrevendo-se o seu funcionamento, tipo de dados inseridos e a caracterização de dados obtidos.

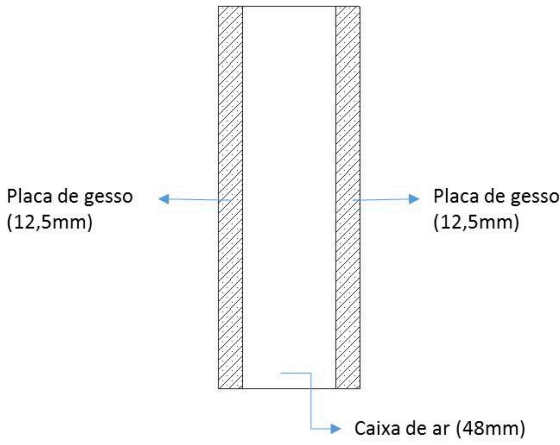
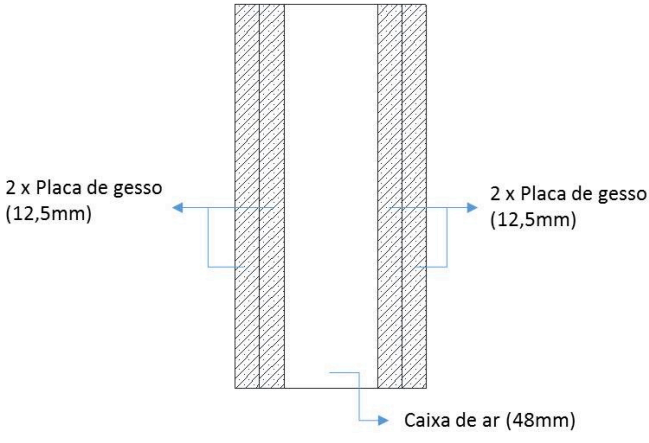
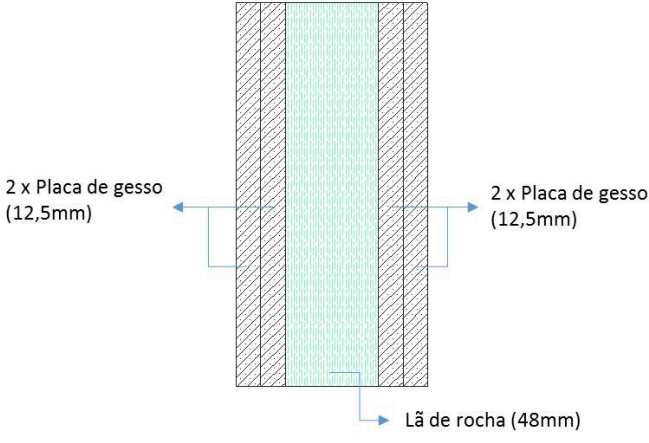
4.2 Provetes Testados e Modelados

Todos os tipos de parede usados para serem testados pelo modelo computacional foram usados em ensaios laboratoriais efetuados pelo ITeCons. Tentou-se garantir alguma variação do tipo de paredes. (Quadro 4.1).

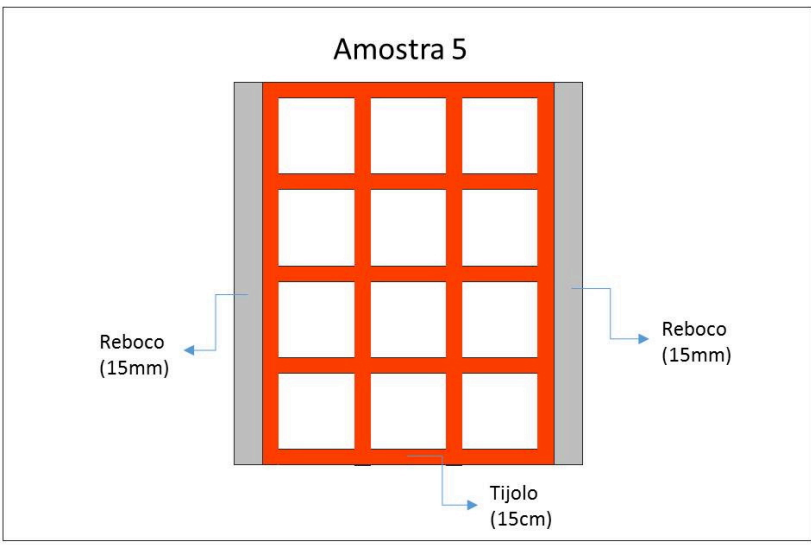
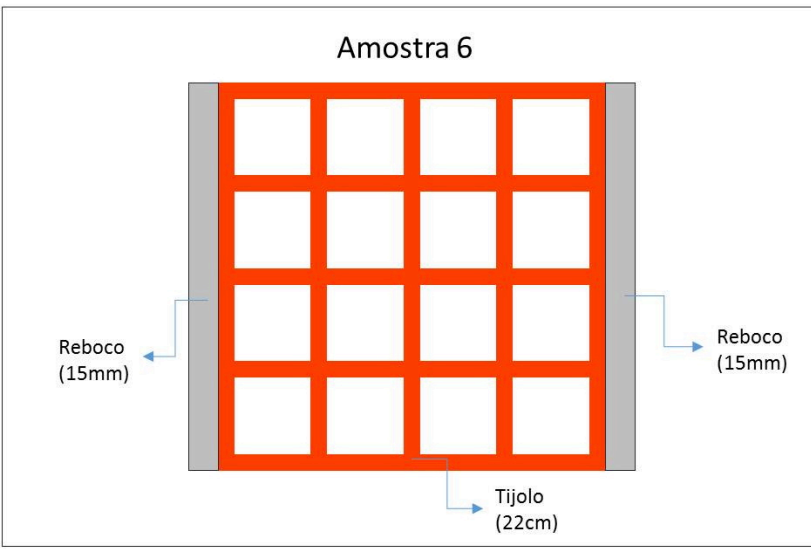
Quadro 4.1 - Definição das paredes testadas.

<p style="text-align: center;">Amostra 1</p>  <p style="text-align: center;">Parede de betão armado (30cm)</p>	<p style="text-align: center;">Parede de betão armado com 30 cm de espessura.</p>
---	---

Quadro 4.1 (continuação) - Definição das paredes testadas

<p style="text-align: center;">Amostra 2</p>  <p>Placa de gesso (12,5mm) ← → Placa de gesso (12,5mm)</p> <p style="text-align: center;">Caixa de ar (48mm)</p>	<p>Parede constituída por uma placa de gesso cartonado de 12,5 mm, com caixa-de-ar de 48 mm, e uma placa de gesso cartonado com 12,5 mm.</p>
<p style="text-align: center;">Amostra 3</p>  <p>2 x Placa de gesso (12,5mm) ← → 2 x Placa de gesso (12,5mm)</p> <p style="text-align: center;">Caixa de ar (48mm)</p>	<p>Parede constituída por uma placa dupla de gesso cartonado de 12,5 mm (cada), com caixa-de-ar de 48 mm, e placa dupla de gesso cartonado com 12,5 mm (cada).</p>
<p style="text-align: center;">Amostra 4</p>  <p>2 x Placa de gesso (12,5mm) ← → 2 x Placa de gesso (12,5mm)</p> <p style="text-align: center;">Lã de rocha (48mm)</p>	<p>Parede constituída por uma placa dupla de gesso cartonado de 12,5 mm (cada), com caixa-de-ar de 48 mm totalmente preenchida por lã de rocha de 70 kg/m^3, e placa dupla de gesso cartonado com 12,5 mm (cada).</p>

Quadro 4.1 (continuação) - Definição das paredes testadas

<p style="text-align: center;">Amostra 5</p>  <p>Reboco (15mm)</p> <p>Tijolo (15cm)</p> <p>Reboco (15mm)</p>	<p>Parede de alvenaria de tijolo cerâmico de dimensões $30 \times 20 \times 15 \text{ cm}^3$ rebocada de cada lado com argamassa tradicional ao traço 1:3 com espessura de 15 mm (cada).</p>
<p style="text-align: center;">Amostra 6</p>  <p>Reboco (15mm)</p> <p>Tijolo (22cm)</p> <p>Reboco (15mm)</p>	<p>Parede de alvenaria de tijolo cerâmico de dimensões $30 \times 20 \times 22 \text{ cm}^3$ rebocada de cada lado com argamassa tradicional ao traço 1:3 com espessura de 15 mm (cada).</p>

4.2.1 Características dos Materiais

O modelo computacional usado exige a inserção das seguintes características de cada parede:

- Espessura de cada camada.
- Massa volúmica do material de cada camada (ρ).
- Coeficiente de Poisson do material de cada camada (ν).
- Módulo de elasticidade transversal (G) do material de cada camada.
- Resistividade ao fluxo de ar para a camada porosa.

4.2.2 Espessura

Para este parâmetro usou-se a medida proveniente dos dados do ITeCons.

4.2.3 Massa Volúmica (ρ)

Para alguns materiais foram consultados os catálogos comerciais dos fabricantes. Quando estavam indisponíveis, para o cálculo deste parâmetro, efetuaram-se recolhas de amostras de cada material e calculou-se através do quociente entre o seu volume e a sua massa.

$$\rho = \frac{m(kg)}{V(m^3)} \quad (4.1)$$

4.2.4 Coeficiente de Poisson (ν)

Para a determinação do coeficiente de Poisson, em cada material, usou-se um Pundit Lab (Figura 4.1), colocando-se em cada um dos lados do provete um transdutor (Figura 4.2). Estes ao emitir impulsos de um para o outro, atravessando o material a testar, permitem obter os valores da velocidade das ondas P (Vp) e das ondas S (Vs). A partir dos valores destas velocidade aplicou-se a seguinte fórmula:

$$\nu = \frac{Vp^2 - 2Vs^2}{2(Vp^2 - Vs^2)} \quad (4.2)$$



Figura 4.1. – Fotografia do equipamento Pundit Lab.



Figura 4.2. – Fotografia dos transdutores aquando da medição de um provete de gesso cartonado.

4.2.5 Módulo de rigidez ou módulo de elasticidade transversal (G)

Calculou-se através do produto da massa volúmica (ρ) pela velocidade das ondas S (V_s) ao quadrado.

$$G = \rho \cdot V_s^2 \quad (4.3)$$

4.2.6 Resistividade ao fluxo de ar para camadas porosas

O valor deste parâmetro foi obtido através da bibliografia (Beranek e Vér, 1992).

4.2.7 Resumo das características dos materiais

Quadro 4.2 – Quadro resumo com as características dos materiais usados

Materiais	Coefficiente de Poisson	Massa Volúmica (kg/m ³)	Módulo Transversal (GPa)
Betão pré-doseado com incorporação de armadura em varão nervurado	0,15	2400	9,26
Gesso cartonado em placas, aparafusadas a estrutura leve de metal galvanizada.	0,13	625	1,639
Reboco tradicional de argamassa traço 1:3	0,37	1820	5,186
Tijolo cerâmico alvenaria, de dimensões 30x20x15 cm ³	0,08	633	0,5
Tijolo cerâmico alvenaria, de dimensões 30x20x22 cm ³	0,08	633	0,5

Quadro 4.3 – Quadro resumo com as características do material poroso usado

Material Poroso	Resistividade ao fluxo de ar (kg. m ⁻³ . s ⁻¹)	Massa Volúmica (kg/m ³)
Lã de Rocha	2000	70

Quadro 4.4 – Quadro resumo com as características do ar

	Constante de Lamé (kPa)	Massa Volúmica (kg/m ³)
Propriedades do ar	141,032	1,22

4.3 Modelo Computacional

4.3.1 Introdução

Na execução e aplicação do modelo computacional, o autor desta tese realizou os testes como utilizador, inserindo os dados necessários consoante as características de cada parede.

4.3.2 Explicação do modelo computacional

O modelo computacional usado nos testes tem como base o modelo analítico descrito no capítulo anterior. É um programa em Fortran onde o utilizador insere os dados num ficheiro Data.

Os dados inseridos são a descrição das propriedades físicas da parede a testar. Em primeiro lugar, insere-se o número de camadas ou painéis constituintes da parede (uma camada de ar no seu interior é também tida em conta).

Após ser inserido o número de camadas, efetua-se a caracterização de cada camada, pela seguinte ordem:

- Módulo de Rigidez (MPa)
- Coeficiente de Poisson ou Resistividade (no caso de lã de rocha, em $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$)
- Massa volúmica (kg/m^3)
- Espessura da camada (m)

Este processo repete-se de igual modo para todas as camadas, tendo em conta a mesma ordem em que estas camadas estão implementadas na parede.

Também a primeira frequência, a última frequência e o número de frequências intermédias que se pretende calcular podem ser alterados. Ao longo do trabalho realizado, para todos os casos, estes dados foram mantidos constantes. Efetuou-se para cada parede um cálculo de duzentas e cinquenta e seis frequências compreendidas no intervalo de [10;6000] Hz, igualmente espaçadas numa escala logarítmica.

A distância da fonte sonora à parede é outra das variáveis que foram sendo alteradas ao longo dos testes, sendo efectuado para cada parede testes a distâncias diferentes.

O modelo analítico simula um conjunto de recetores que registam a pressão sonora. A este conjunto deu-se o nome de Malha. Observe-se que existe uma Malha do lado da fonte sonora e outra do lado oposto da parede. A redução sonora é calculada através da diferença do nível de pressão sonora entre estas duas malhas.

Representando-se num esquema de eixos a três dimensões (x,y,z), considerou-se que o eixo x e z são paralelos à disposição da parede, e o eixo y perpendicular a esta. A fonte sonora encontra-se sempre na coordenada $x=1$ e $z=1$, sendo a única coordenada variável no eixo y, que assume a distancia desta à parede.

A Malha de recetores é constituída por 108 recetores, dispostos de igual modo no eixo x e z (6 por 6 recetores) dispostos por 3 camadas com diferentes alturas em y (Figura 4.3). Considera-se que a sala é quadrada com 24 m de cada lado.

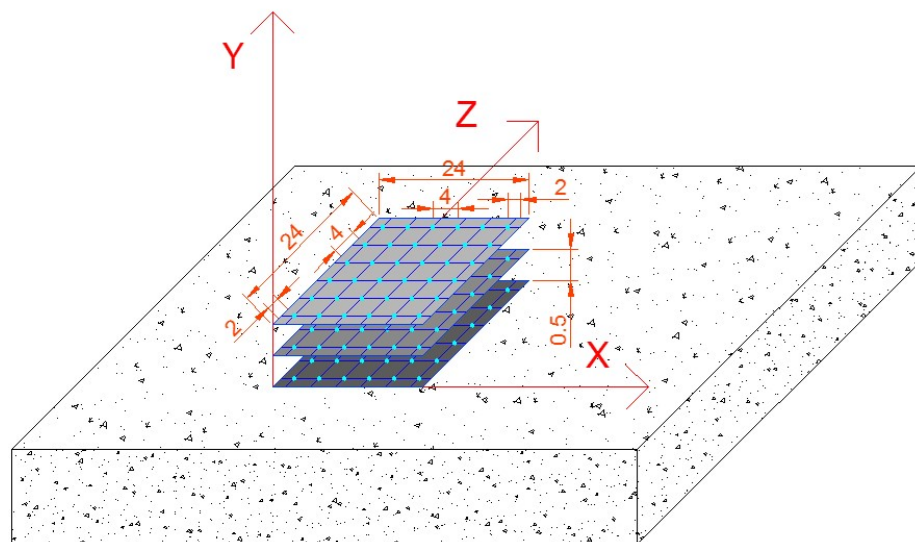


Figura 4.3 – Malha de recetores usada nas simulações.

4.3.3 Cálculos

Inseridas as especificações da parede e a distância da fonte sonora pretendida, no ficheiro de dados, executa-se o programa. O tempo de execução mostrou-se algo longo devido ao elevado número de variáveis a calcular. Neste caso é de ter em conta a influência do desempenho do computador e a complexidade da parede. O cálculo depende do número de frequências a calcular e também do número de camadas que constituem a parede.

Finalizada a execução do modelo numérico, obtêm-se os resultados em formato de dois ficheiros de dados, sendo um deles um ficheiro que contém o isolamento sonoro em todas as frequências calculadas e outro os resultados em bandas de frequências de 1/3 de oitava (Figura 4.4).

Como os resultados provenientes dos ensaios laboratoriais do ITeCons se encontram em bandas de 1/3 de oitava, as comparações destes resultados com os obtidos a partir do modelo analítico foram comparados com esta representação em frequência.

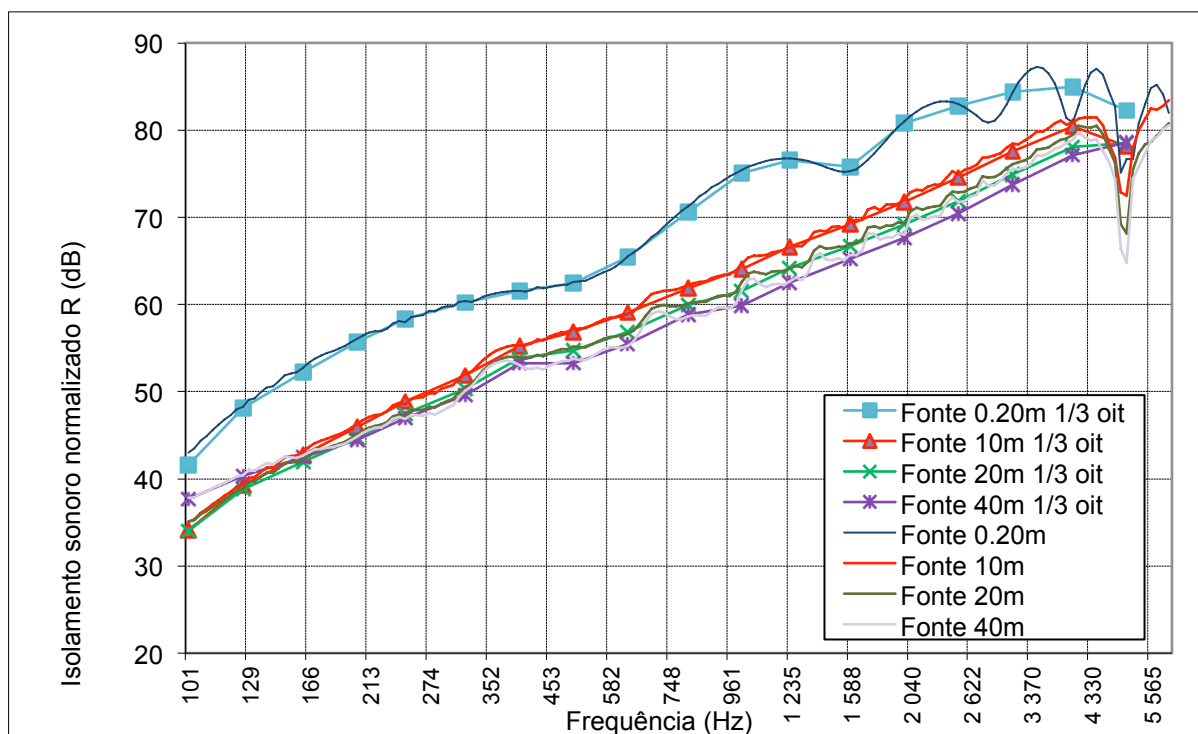


Figura 4.4 – Gráfico exemplificativo das curvas de isolamento sonoro em todas as frequências comparativamente às curvas em bandas de frequências de 1/3 de oitava (neste caso relativos à Amostra 1).

4.4 Resultados Obtidos e sua Discussão

4.4.1 Introdução

Neste capítulo apresentam-se os resultados obtidos através do modelo computacional comparados com os resultados provenientes dos ensaios laboratoriais, efectuados nas câmaras acústicas do IteCons. Neste trabalho, para cada amostra (parede) foram efectuados inúmeras variações relativas à distancia da fonte sonora, estando representadas somente as curvas em que se obtiveram melhores resultados. A apresentação dos resultados é feita em forma de gráficos onde se representa a redução sonora (dB) em bandas de frequência (Hz) de 1/3 oitava.

4.4.2 Amostra 1

Para a Amostra 1 (parede de betão armado com 30 cm de espessura) representa-se na Figura 4.5, o gráfico relativo às curvas de isolamento sonoro (em dB) referentes aos dados provenientes do ensaio laboratorial e aos dados provenientes do modelo analítico. Para este tipo de parede, verificou-se que os resultados analíticos se aproximam mais do resultado experimental quando a fonte se encontra afastada da parede. Neste caso, foram usadas as distâncias 0,20 m, 10 m, 20 m e 40 m para a posição da fonte.

Comparando o índice de isolamento sonoro (R_w) da curva experimental ($R_w=63$ dB) relativamente aos exemplos calculados, o resultado que mais se aproximou foi o obtido para a posição da fonte a uma distância de 10 m ($R_w=59$ dB) (Quadro 4.5). No entanto, particularizando, na gama de frequências entre os [100 Hz; 160 Hz] a curva que mais se aproxima à curva experimental é a obtida para um afastamento da fonte sonora de 0,20 m. Já na gama de frequências entre os [2500 Hz; 5000 Hz] a curva com valores mais aproximados é a relativa ao afastamento de 40 m. Para frequências intermedias a curva relativa ao afastamento da fonte de 10 m apresenta bons resultados. De uma forma geral, as curvas relativas às posições das fontes mais afastadas (10 m a 40 m) apresentam boas aproximações à curva experimental.

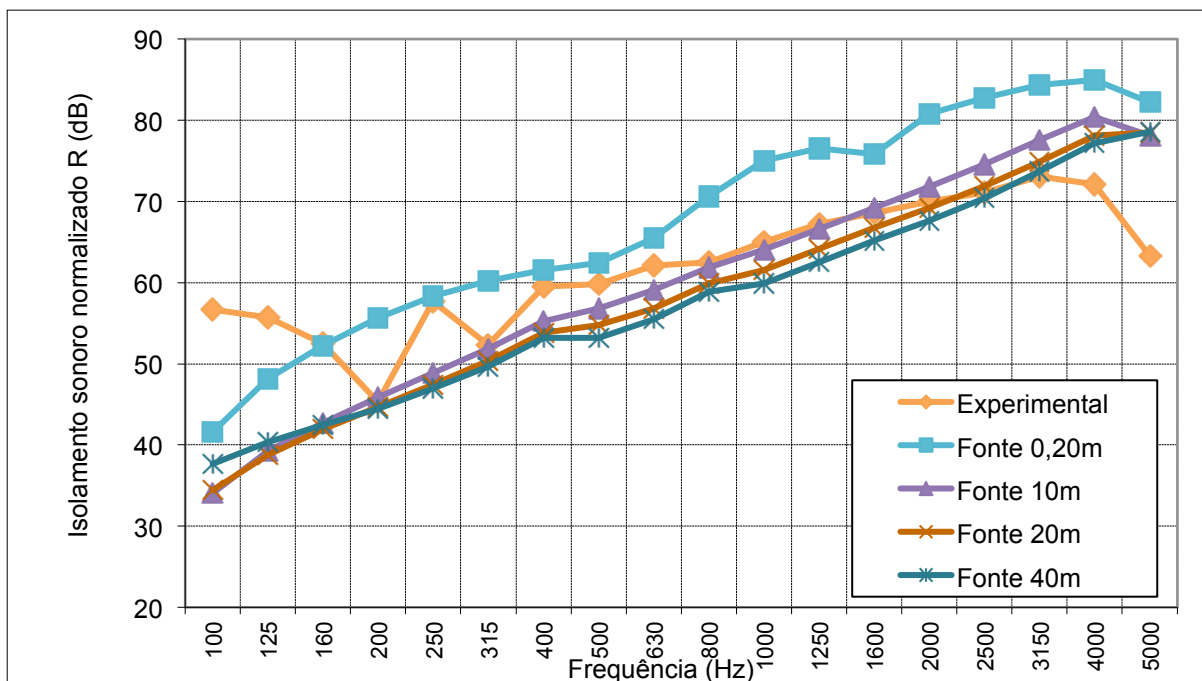


Figura 4.5 – Gráfico comparativo da curva de isolamento sonoro experimental, relativamente às curvas de isolamento provenientes do modelo numérico para a Amostra 1.

Quadro 4.5 – Índices de isolamento sonoro (R_w) de cada curva relativos à Amostra 1.

	Experimental	Distância fonte 0,20m	Distância fonte 10m	Distância fonte 20m	Distância fonte 40m
R_w	63 dB	67 dB	59 dB	58 dB	58 dB

4.4.3 Amostra 2

Para a Amostra 2 (parede constituída por uma placa de gesso cartonado de 12,5 mm, com caixa-de-ar de 48 mm, e uma placa de gesso cartonado com 12,5 mm) representa-se na Figura 4.6, o gráfico relativo às curvas de isolamento sonoro (em dB) referentes aos dados provenientes do ensaio laboratorial e os dados provenientes do modelo analítico. Para este tipo de parede, verificou-se que os resultados aproximam-se mais quando a colocação da fonte se encontra mais próxima da parede, com a exceção nas baixas frequências. Neste caso, foram usadas as distâncias 0,20 m, 0,30 m, 0,40 m e 0,50 m para a posição da fonte sonora em relação à parede. Para grandes afastamentos da fonte à parede o isolamento previsto é muito exagerado. No entanto, na gama das baixas frequências o isolamento previsto

aproxima-se bastante dos experimentais. Para ilustrar este fenómeno, na Figura 4.6 sobrepõem-se também a curva de isolamento previsto para um afastamento da fonte de 20 m.

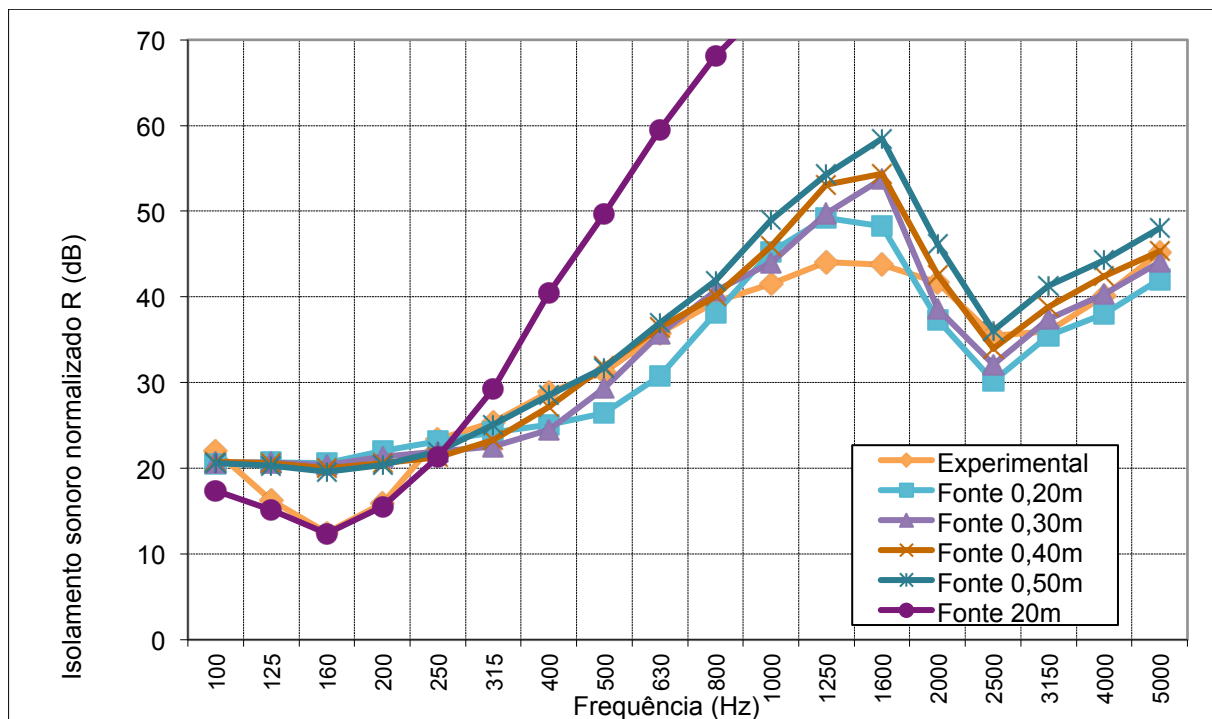


Figura 4.6 – Gráfico comparativo da curva de isolamento sonoro experimental, relativamente às curvas de isolamento provenientes do modelo numérico para a Amostra 2.

Comparando o índice de isolamento sonoro (R_w) da curva experimental ($R_w=33$ dB) relativamente ao obtido para os calculados, o resultado que mais se aproximou foi o obtido para uma posição da fonte a uma distância de 0,30m ($R_w=33$ dB) (Quadro 4.6). Particularizando, na gama de frequências entre os [250 Hz; 600 Hz] a curva que mais se aproxima à curva experimental é a obtida para um afastamento da fonte sonora de 0,50 m. Já na gama de frequências entre os [800 Hz; 1800 Hz] a curva com valores mais aproximados é a relativa ao afastamento de 0,20 m. Na gama de frequências entre os [125 Hz; 250 Hz] a curva com valores mais aproximados dos experimentais é a relativa ao afastamento da fonte de 20 m.

Quadro 4.6 – Índices de isolamento sonoro (R_w) de cada curva relativos à Amostra 2.

	Experimental	Distância fonte 0,20m	Distância fonte 0,30m	Distância fonte 0,40m	Distância fonte 0,50m	Distância fonte 20m
R_w	33 dB	32 dB	33 dB	34 dB	35 dB	35 dB

4.4.4 Amostra 3

Para a Amostra 3 (parede constituída por uma placa dupla de gesso cartonado de 12,5 mm (cada), com caixa-de-ar de 48 mm, e placa dupla de gesso cartonado com 12,5 mm (cada)) representa-se na Figura 4.7, o gráfico relativo às curvas de isolamento sonoro (em dB) referentes aos dados provenientes do ensaio laboratorial e aos dados provenientes do modelo analítico. Para este tipo de parede, verificou-se que os resultados analíticos se aproximam mais do resultado experimental quando a fonte se encontra afastada da parede. Neste caso, foram usadas as distâncias 0,20 m, 0,30 m, 0,40 m e 0,50 m para a posição da fonte sonora em relação à parede.

Comparando o índice de isolamento sonoro (R_w) da curva experimental ($R_w=40$ dB) relativamente ao obtido para os calculados, o resultado que mais se aproximou foi o obtido para uma posição da fonte a uma distância de 0,50m ($R_w=39$ dB) (Quadro 4.7). No entanto, particularizando, na gama de frequências entre os [1000 Hz; 1600 Hz] a curva que mais se aproxima à curva experimental é a obtida para um afastamento da fonte sonora de 0,20 m.

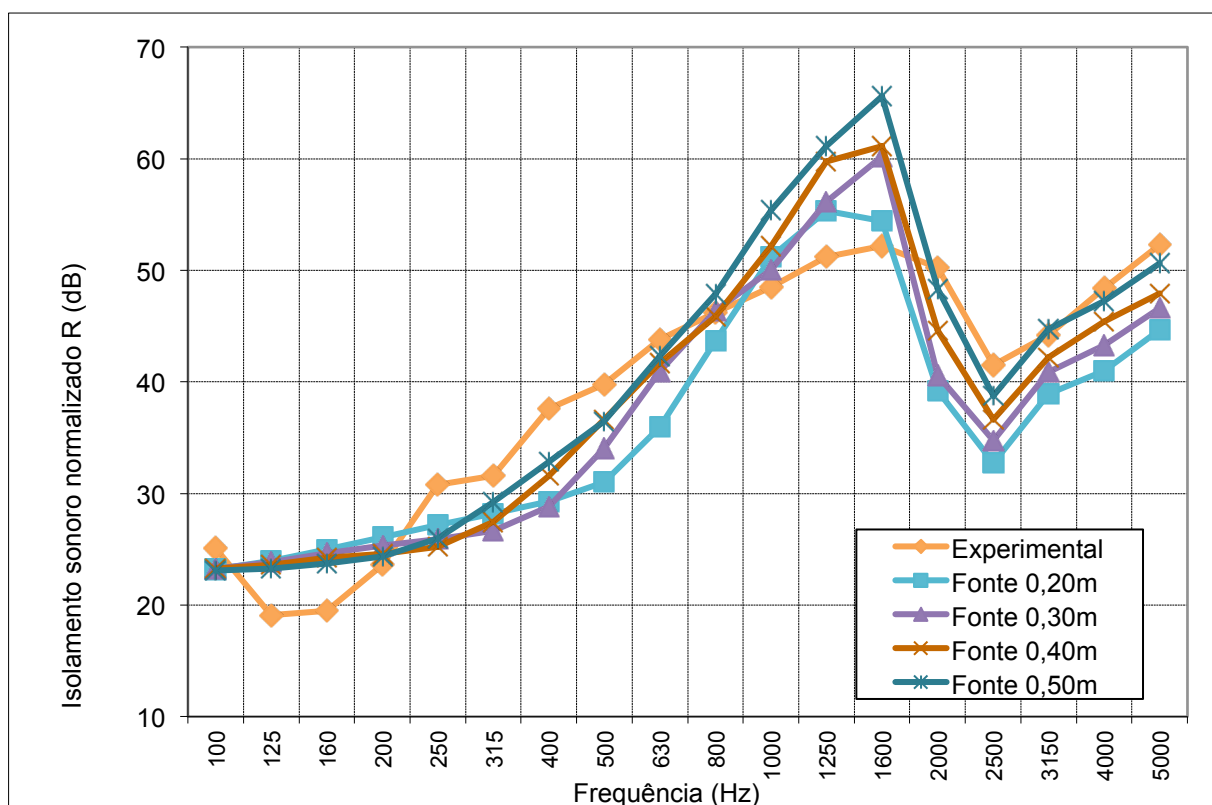


Figura 4.7 – Gráfico comparativo da curva de isolamento sonoro experimental, relativamente às curvas de isolamento provenientes do modelo numérico para a Amostra 3.

Quadro 4.7 – Índices de isolamento sonoro (R_w) de cada curva relativos à Amostra 3.

	Experimental	Distância fonte 0,20m	Distância fonte 0,30m	Distância fonte 0,40m	Distância fonte 0,50m
R_w	40 dB	36 dB	37 dB	38 dB	39 dB

4.4.5 Amostra 4

Para a Amostra 4 (parede constituída por uma placa dupla de gesso cartonado de 12,5 mm (cada), com caixa-de-ar de 48 mm totalmente preenchida por lã de rocha de 70 kg/m³, e placa dupla de gesso cartonado com 12,5 mm (cada)) representa-se na Figura 4.8, o gráfico relativo às curvas de isolamento sonoro (em dB) referentes aos dados provenientes do ensaio laboratorial e aos dados provenientes do modelo analítico. Para este tipo de parede, verificou-se que os resultados analíticos aproximam-se mais dos experimentais quando a colocação da fonte se encontra mais próxima da parede. Neste caso, foram usadas as distâncias 0,20 m, 0,30 m, 0,40 m e 0,50 m para a posição da fonte sonora em relação à parede.

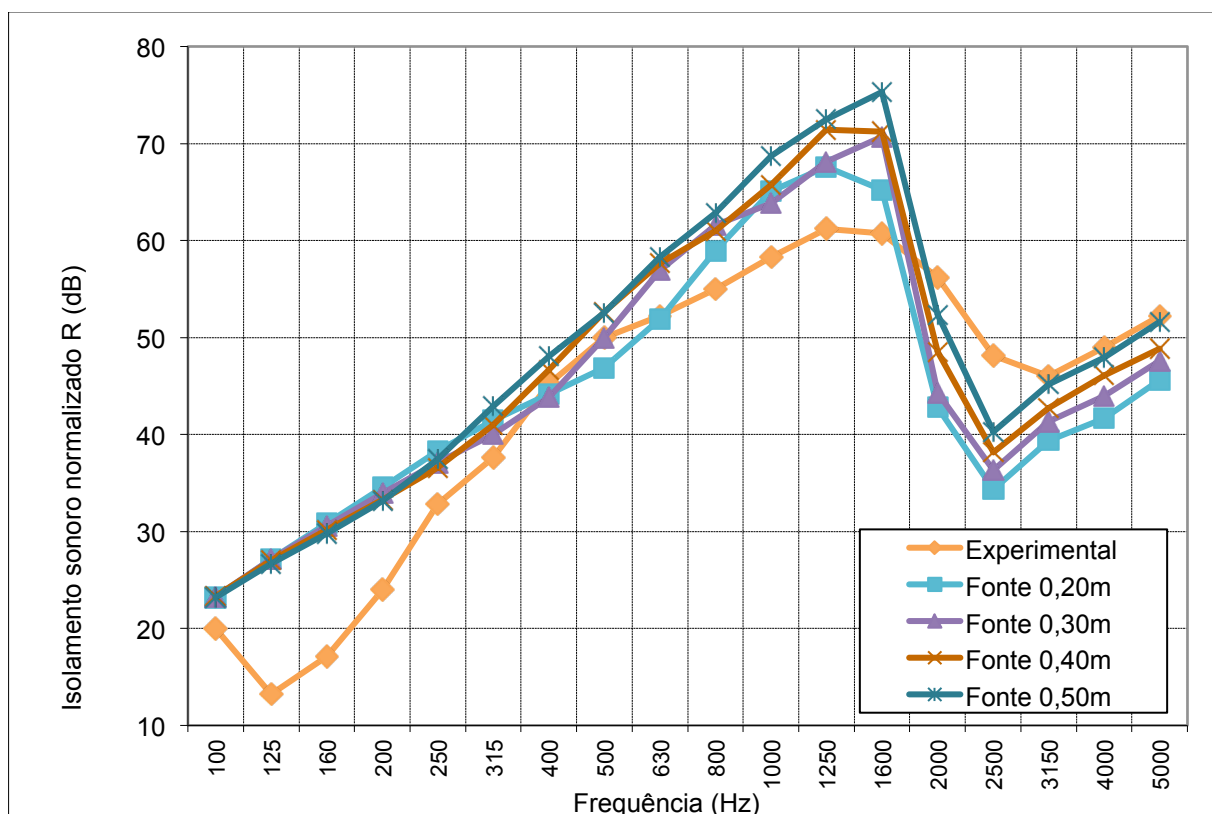


Figura 4.8 – Gráfico comparativo da curva de isolamento sonoro experimental, relativamente às curvas de isolamento provenientes do modelo numérico para a Amostra 4.

Comparando o índice de isolamento sonoro (R_w) da curva experimental ($R_w=40$ dB) relativamente ao obtido para os calculados, o resultado que mais se aproximou foi o obtido para uma posição da fonte a uma distância de 0,20m ($R_w=44$ dB) e de 0,30m ($R_w=44$ dB) (Quadro 4.8). Particularizando, na gama de frequências entre os [100 Hz; 200 Hz] e [2000 Hz; 5000 Hz] a curva que mais se aproxima à curva experimental é a obtida para um afastamento da fonte sonora de 0,50 m.

Quadro 4.8 – Índices de isolamento sonoro (R_w) de cada curva relativos à Amostra 4.

	Experimental	Distância fonte 0,20m	Distância fonte 0,30m	Distância fonte 0,40m	Distância fonte 0,50m
R_w	40 dB	44 dB	44 dB	45 dB	46 dB

4.4.6 Amostra 5

Para a Amostra 5 (parede de alvenaria de tijolo cerâmico de dimensões $30 \times 20 \times 15$ cm³ rebocada de cada lado com argamassa tradicional ao traço 1:3 com espessura de 15 mm (cada)) representa-se na Figura 4.9, o gráfico relativo às curvas de isolamento sonoro (em dB) referentes aos dados provenientes do ensaio laboratorial e aos dados provenientes do modelo analítico. Neste caso, foram usadas as distâncias 0,20 m, 10 m, 20 m, 40 m e 60 m para a posição da fonte sonora em relação à parede.

Comparando o índice de isolamento sonoro (R_w) da curva experimental ($R_w=43$ dB) relativamente ao obtido analiticamente, o resultado que mais se aproximou foi o obtido para uma posição da fonte a uma distância de 0,20m ($R_w=44$ dB) e de 60m ($R_w=44$ dB) (Quadro 4.9). No entanto, particularizando, na gama de frequências entre os [1000 Hz; 1600 Hz] a curva que mais se aproxima à curva experimental é a obtida para um afastamento da fonte sonora de 0,20 m. No entanto, na gama de frequências entre os [125 Hz; 400 Hz] e [1600 Hz; 2500 Hz] a curva que mais se aproxima à curva experimental é a obtida para um afastamento da fonte sonora de 40 m. Na gama de frequências entre os [500 Hz; 1250 Hz] a curva com valores mais aproximados é a relativa ao afastamento de 60 m.

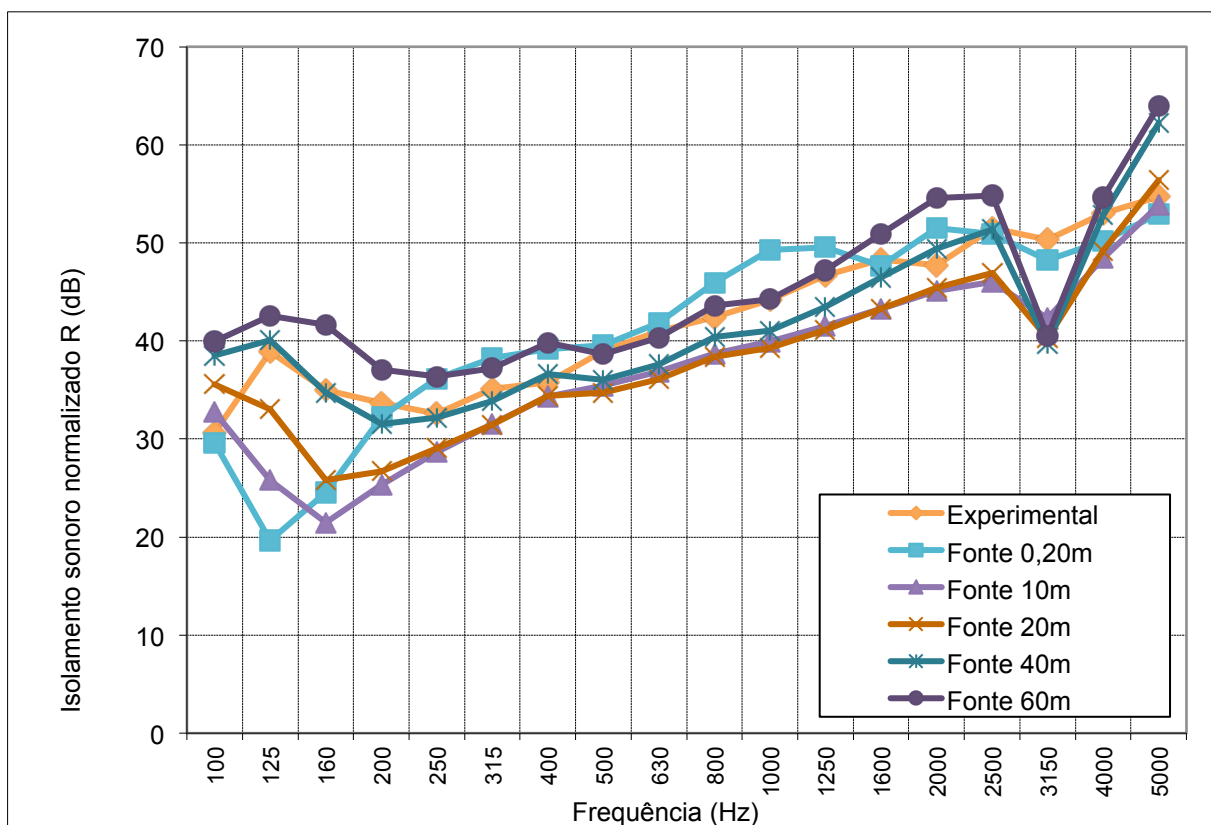


Figura 4.9 – Gráfico comparativo da curva de isolamento sonoro experimental, relativamente às curvas de isolamento provenientes do modelo numérico para a Amostra 5.

Quadro 4.9 – Índices de isolamento sonoro (R_w) de cada curva relativos à Amostra 5.

	Experimental	Distância fonte 0,20m	Distância fonte 10m	Distância fonte 20m	Distância fonte 40m	Distância fonte 60m
R_w	43 dB	44 dB	39 dB	39 dB	41 dB	44 dB

4.4.7 Amostra 6

Para a Amostra 6 (parede de alvenaria de tijolo cerâmico de dimensões $30 \times 20 \times 22 \text{ cm}^3$ rebocada de cada lado com argamassa tradicional ao traço 1:3 com espessura de 15 mm (cada)) representa-se na Figura 4.10, o gráfico relativo às curvas de isolamento sonoro (em dB) referentes aos dados provenientes do ensaio laboratorial e aos dados provenientes do modelo analítico. Neste caso, foram usadas as distâncias 0,20 m, 10 m, 20 m, 40 m e 60 m para a posição da fonte sonora em relação à parede.

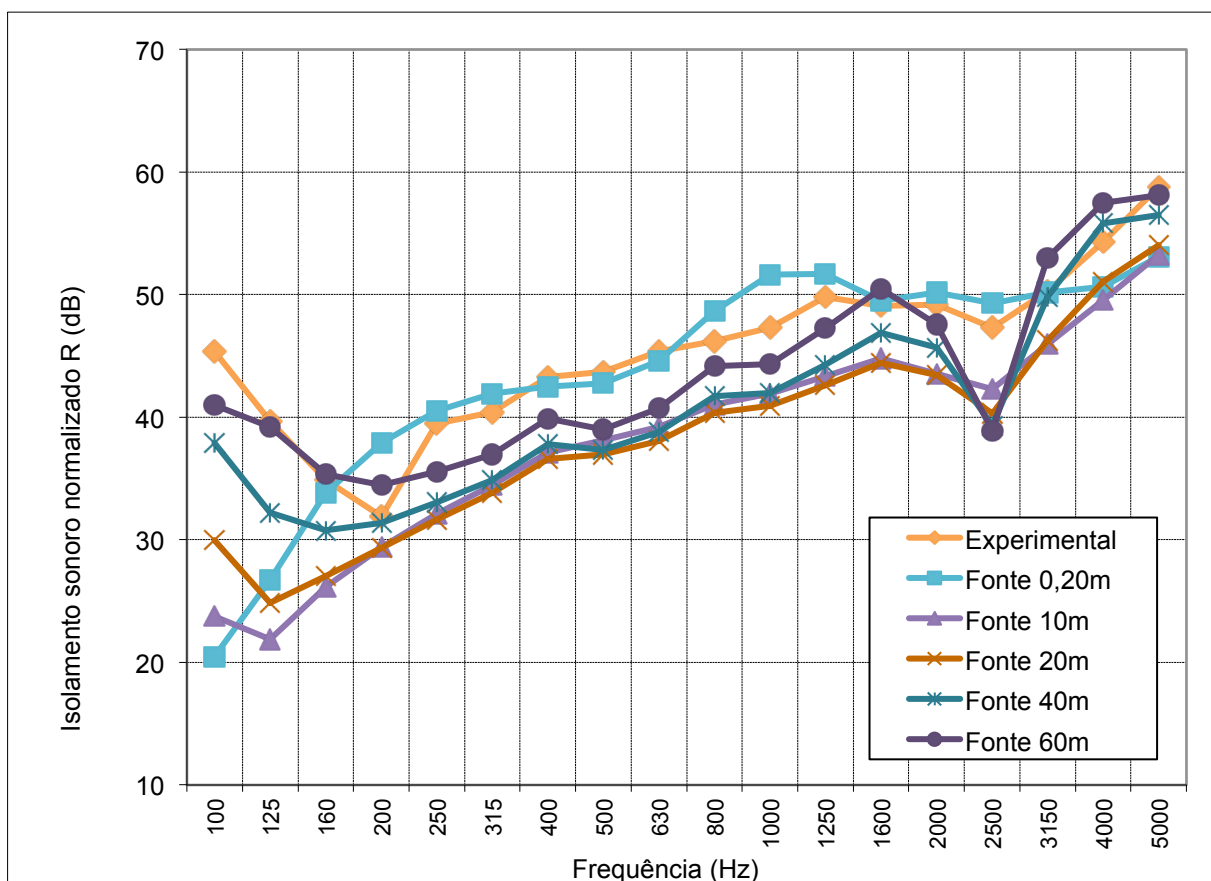


Figura 4.10 – Gráfico comparativo da curva de isolamento sonoro experimental, relativamente às curvas de isolamento provenientes do modelo numérico para a Amostra 6.

Comparando o índice de isolamento sonoro (R_w) da curva experimental ($R_w=43$ dB) relativamente aos exemplos apreciados, o resultado que mais se aproximou em relação a posição da fonte é o referente às curvas para uma distância a 0,20m ($R_w=44$ dB) e a 60m ($R_w=44$ dB) (Quadro 4.10). No entanto, particularizando, na gama de frequências entre os [1000 Hz; 1600 Hz] a curva que mais se aproxima à curva experimental é a obtida para um afastamento da fonte sonora de 0,20 m. Na gama de frequências entre os [100 Hz; 225 Hz], [800 Hz; 1000 Hz] e [4500 Hz; 5000 Hz] a curva que mais se aproxima à curva experimental é a obtida para um afastamento da fonte sonora de 60 m, sendo que na gama de frequências entre os [3150 Hz; 4500 Hz] a curva com valores mais aproximados é a relativa ao afastamento de 40 m.

Quadro 4.10 – Índices de isolamento sonoro (R_w) de cada curva relativos à Amostra 6.

	Experimental	Distância fonte 0,20m	Distância fonte 10m	Distância fonte 20m	Distância fonte 40m	Distância fonte 60m
R_w	47 dB	47 dB	41 dB	40 dB	42 dB	44 dB

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Através de uma ferramenta de cálculo que foi desenvolvida a partir de um modelo analítico, efetuou-se a simulação do isolamento sonoro a sons aéreos em paredes constituídas por vários painéis, com diferentes materiais e espessuras. Esta ferramenta permitiu simular a propagação do som através das várias camadas, que constituíam as paredes.

O modelo analítico apresenta algumas limitações relativamente à representação da realidade. Simula placas de dimensão infinita (comprimento e largura). O modelo original também não permitia simular as reflexões que se geram no interior de um espaço fechado. Este foi alterado para poder incluir o efeito de um campo difuso no meio fluido onde se encontra a fonte sonora, podendo incluir reflexões devido à presença de obstáculos laterais. Esta simulação foi efetuada posicionando fontes sonoras virtuais de modo a simular a existência de superfícies rígidas através da técnica de imagem de fontes.

Tentou-se validar os resultados provenientes da aplicação do modelo, comparando-os com resultados experimentais obtidos em ensaios realizados no ITeCons, para analisar a aplicabilidade e limitações deste modelo.

Os cálculos foram efetuados considerando várias distâncias da fonte sonora à parede.

Para as paredes de maior massa volúmica (caso da parede de betão) os resultados mais próximos dos experimentais foram obtidos para distâncias da fonte mais afastadas da parede. No entanto, quando o modelo simula o comportamento de paredes mais leves (de menor massa volúmica, caso do gesso cartonado) os resultados que mais se aproximam dos experimentais são os obtidos para distâncias da fonte muito próximas da parede.

Este modelo tem em conta a perfeita interação do material sólido com o material fluido. No entanto tem algumas limitações da representação da realidade simulando placas de dimensão infinita e simulando um campo difuso apenas do lado da fonte. Apesar destas limitações, pode-se concluir que o modelo aplicado as amostras de paredes testadas permitiu obter resultados bastante próximos dos valores experimentais.

Considera-se que com uma boa caracterização das paredes, o uso deste modelo pode auxiliar quando o procura estabelecer uma escolha entre várias soluções, ou quando o projetista não ao dispõe de resultados laboratoriais. O modelo pode ser de extrema utilidade numa fase de desenvolvimento de soluções construtivas.

Para complementar o trabalho realizado seria interessante testar um maior número de paredes, nomeadamente de constituição mais complexa. A simulação de soluções mistas (contendo elementos leves e pesados) por exemplo compostas por paredes de alvenaria reforçadas com placas de gesso cartonado, constitui um dos tópicos a desenvolver no futuro.

Uma vez que se verificou que a distância da fonte à parede influencia os resultados obtidos, e que esta influência varia em função da frequência, seria vantajoso efetuar simulações em que a distância da fonte à parede variasse com a frequência.

BIBLIOGRAFIA

Beranek, L., (1960). *Noise Reduction*. Ed., McGraw-Hill Book Company, NY.

Beranek, L., Vér, I. L., (1992). *Noise and vibration control engineering*. Wiley & Sons, New York.

Bolton J. S. , Shiau N. M., Kang Y.J., (1996). “Sound Transmission through multi-panel structures lined with elastic porous materials”. *J Sound and Vibration* 1996;191(3):317-47.

Carvalho, B. A., (1967). *Acústica aplicada à arquitectura*. Rio de Janeiro : Livraria Freitas de Bastos.

Castro, I. A. S., (2013). *Caracterização acústica de paredes de alvenaria com blocos de betão, fabricados com incorporação de cortiça: uma abordagem numérica e experimental*. Dissertação para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil. FCTUC, Coimbra.

Coz-Díaz, J., Álvarez-Rabanal, F., García-Nieto, P., and Serrano-López, M., (2010). “Sound Transmission Loss Analysis Through a Multilayer Lightweight Concrete Hollow Brick Wall by FEM and Experimental Validation”. *Building and Environment*, 45(11), pp. 2373–2386.

Craik, R., and Smith, R., (2000), “Sound Transmission through Double Leaf Lightweight Partitions—Part I: Airborne Sound”. *Appl. Acoust.*, 61, pp. 223–245.

Craik, R., Nightingale, T., and Steel, J., (1997), “Sound Transmission Through a Double Leaf Partition With Edge Flanking”. *J. Acoust. Soc. Am.*, 101(2), pp. 964–969.

Fahy, F., (2001). *Foundations of Engineering Acoustics*. Ed., Academic Press, NY.

Fringuelino M., Guglielmone C., (2000). “Progressive impedance method for the classical analysis of acoustic transmission loss in multilayered walls”. *Applied Acoustics* 2000;59:275-285.

Godinho L., Tadeu A., Santos A. B., (2006). “Sound Insulation of Layered Panels: Comparison of Experimental and Theoretical Results”. *ICSV13 – Vienna, The Thirteenth International Congress on sound and Vibration*. Vienna, Austria, July 2-6, 2006.

Kropp W., Rebillard E., (1999). “On the air-borne sound insulation of double wall constructions”. *Acustica – Acta Acustica* 1999;85:707-20.

London, A., (1950), “Transmission of Reverberant Sound Through Double Walls”. *J. Acoust. Soc. Am.*, 22, pp. 270–279.

Mateus, D., (2004). *Isolamento Acústico de Elementos de Compartimentação Leves de Edifícios*. Dissertação para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil. DEC-FCTUC, Coimbra.

Mateus, D., (2008). *Acústica de Edifícios e Controlo de Ruído*. DEC-FCTUC, Coimbra.

Mechel F., (2002). *Formulas of Acoustics*. Ed., Springer Verlag, Berlin.

Nepomuceno, L. X., (1977). *Acústica*. São Paulo: Ed. Edgard Blucher.

Novikov, I., (1998), “Low-Frequency Sound Insulation of Thin Plates”, *Appl. Acoust.*, 54, pp. 83–90.

NP EN 20140-3, (1998). *Medição do isolamento sonoro de edifícios e de elementos de construção. Parte 3: Medição em laboratório do isolamento sonoro a sons aéreos de elementos de construção (ISO 140-3:1995)*. IPQ, 1998.

NP EN ISO 140-1, (2001). *Medição do isolamento sonoro de edifícios e de elementos de construção, Parte 1: Especificações para laboratórios sem transmissão marginal (ISO 140-1:1997)*. IPQ, 2002.

Patricio, J., (2010). *Acústica nos Edifícios*. Lisboa : Verlag Dashofer

Panneton, R., and Atalla, N., (1996). “Numerical Prediction of Sound Transmission Through Finite Multiplayer Systems With Poroelastic Materials”. *J. Acoust. Soc. Am.*, 100(1), pp. 346–354.

Sgard, F., Atalla, N., and Nicolas, J., (2000). “A Numerical Model for the Low Frequency Diffuse Field Sound Transmission Loss of Double-Wall Sound Barriers With Elastic Porous Linings”. *J. Acoust. Soc. Am.*, 108(6), pp. 2865–2872.

Steel, J., and Craik, R., (1994), “Statistical Energy Analysis of Structure-Borne Sound Transmission by Finite Element Methods”. *J. Sound Vib.*, 178(4), pp. 553–561.

Schwartz, L., 1966, *Theorie des Distributions*. Hermann, Paris.

Tadeu, A., António, J., Godinho, L., (2013). “Analytical Evaluation of the Acoustic Behaviour of Multilayer Walls When Subjected to Three-Dimensional and Moving 2.5-Dimensional Loads”. *Journal of Vibration and Acoustics*, 135, pp. 061001-1 – 061001-15.

Tadeu, A., António, J., Mateus, D., (2004). “Sound insulation provide by single and double panel walls – a comparison of analytical solutions versus experimental results”. *Applied Acoustics* 65, pp. 15-29.

Tadeu, A., Godinho L., Bandeira, F., António, J., Amado Mendes, P., Castro, I. (2008). “Câmaras Móveis ITECons para a Realização de Ensaios Acústicos: Parte I – Descrição e Projecto das Câmaras”, Actas Acústica 2008, V Congreso Ibérico de Acústica, XXXIX Congreso Español de Acústica Tecniacústica 2008, Acoustics European Symposium de Acústica.

Tadeu, A., Mateus, D., António, J., Godinho, L., Amado Mendes, P. (2010). *Acústica aplicada*. Laboratório de Construções Departamento de Engenharia Civil Da F.C.T Da Universidade de Coimbra.

Tecniwood, (2010). *Algumas noções de acústica* – Catálogo. pp. 1–11.

Xin, F., and Lu, T., (2011). “Analytical Modeling of Sound Transmission Through Clamped Triple-Panel Partition Separated by Enclosed Air Cavities”. *Eur. J. Mech. A/Solids*, 30(6), pp. 770–782.