

ANÁLISE NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DOS PARÂMETROS ACÚSTICOS DE UMA SALA DE AULA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ

Leopoldo Pacheco Bastos, leopan23@gmail.com¹
Helder Fábio Santos Cardoso, helderfabio2003@yahoo.com.br¹
Gustavo da Silva Vieira de Melo, gmelo@ufpa.br¹

¹Universidade Federal do Pará, Rua Augusto Corrêa, nº 1

Resumo: A necessidade de previsão do comportamento acústico de ambientes de trabalho implica na construção de modelos de simulação, assim, para que os parâmetros acústicos de um determinado ambiente possam estar de acordo com os padrões previstos para sua finalidade, é recomendável que neste se faça uma predição de ruído, através de simulações numéricas, para que sejam obtidos resultados com boa precisão e em um tempo relativamente curto, reduzindo custos e aumentando a eficiência quando da execução de tratamentos acústicos neste ambiente. Este trabalho analisa uma sala de aula do Campus Profissional da Universidade Federal do Pará (UFPA), sendo, portanto, um ambiente em que a fala deve ser privilegiada, de modo que a difusão sonora seja controlada e as reflexões não prejudiquem sua inteligibilidade. De acordo com a finalidade da sala e baseando-se na norma ISO 3382, foram analisados os seguintes parâmetros para avaliar sua qualidade acústica: Tempo de Reverberação (TR) baseado no termo T_{30} , Tempo de Decaimento Inicial (EDT), Definição (D_{50}) e Índice Rápido de Transmissão da Fala (RaSTI), para cada banda de oitava entre 125 Hz e 8 kHz. O *software* utilizado para a determinação dos parâmetros acústicos, anteriormente mencionados, de forma experimental, foi o *software* comercial DIRAC 4.0 utilizando-se Técnica Impulsiva. As simulações do ambiente foram realizadas através do *software* comercial ODEON 9.2 *Combined*. A partir da boa concordância entre os resultados obtidos experimental e numericamente, comprovada pela curva de calibração do parâmetro Tempo de Reverberação, os modelos numéricos passam a representar o ambiente real, estando aptos para que neles sejam feitas simulações com materiais de revestimento diversos e audiências variadas, objetivando melhorar a qualidade acústica da sala, e se esperar resultados semelhantes aos que seriam obtidos *in loco*.

Palavras-chave: Modelos de Simulação, Simulações Numéricas, Parâmetros Acústicos e Técnica Impulsiva

1. INTRODUÇÃO

A necessidade de previsão do comportamento acústico de ambientes de trabalho implica na construção de modelos de simulação (Souza, 1997). Em outras palavras, para que os parâmetros acústicos de um ambiente possam estar de acordo com os padrões previstos para sua finalidade, é recomendável que se faça uma predição do seu comportamento acústico, através de modelos de simulação, para que sejam obtidos resultados com boa precisão em um tempo de processamento relativamente curto, reduzindo custos e aumentando a eficiência de projetos, quando da seleção correta e quantidade certa de material a ser utilizada para se efetuar tratamentos acústicos neste ambiente.

Algumas equações clássicas da acústica de salas não são suficientes para oferecer bons resultados quando as salas assumem geometria complexa ou quando idealizações não podem ser feitas (Melo et al., 2007). Para transpor essas dificuldades, técnicas numéricas são utilizadas, proporcionando bons resultados para salas com geometria altamente complexa e materiais de revestimento diversos (Camilo; Tenebaum; Coelho, 2002). Os métodos numéricos utilizados com grande êxito reconhecido são o de traçado de pirâmides (ver Figura 1a) e cones (ver Figura 1b), o das imagens ou fontes virtuais (ver Figura 2), o de traçado de raios (ver Figura 3) e o da transição da energia. No entanto, o uso de apenas um método para simular todos os fenômenos da propagação do som (reflexão, absorção, difusão, difração, transmissão e interferência) não produz resultados satisfatórios, fazendo-se necessária, portanto, a utilização de modelos híbridos (Tenebaum; Camilo, 2004).

Além disso, para que o modelo represente satisfatoriamente o ambiente real e assim se obter resultados com maior precisão, deve-se também modelar outros elementos tais como fontes, receptores e contornos da sala.

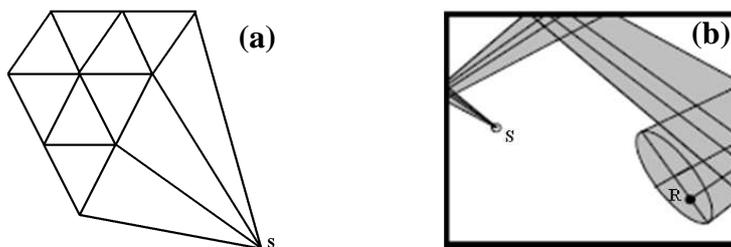


Figura 1 - (a) Métodos de traçado de pirâmides e (b) de traçado de cones.
Fonte: (Raynoise, 1993).

O *software* utilizado para realizar as simulações neste trabalho, foi o ODEON 9.2 *Combined*, por ser de êxito reconhecido e ser o *software* disponível na infraestrutura do Grupo de Vibrações e Acústica (GVA), grupo de pesquisa do qual fazem parte os autores, da Universidade Federal do Pará (UFPA) à época da realização do trabalho. O referido *software* reproduz o fenômeno de propagação acústica em ambientes internos, incluindo reflexão e difusão sonora, absorção das paredes e do ar, difusão e transmissão através de paredes. Sua metodologia é baseada nos métodos, da fonte imagem especular, de raios acústicos e um método híbrido (*Reflection Based Scattering method*) combinando esses dois métodos (Vieira, 2008), associando assim, a natureza determinística, proveniente do método da fonte imagem, com algumas características estatísticas do método de raios acústicos (Souza, 1997). Os métodos da fonte imagem especular e de raios acústicos serão melhor explicados a seguir.

2. MÉTODOS NUMÉRICOS

2.1. Método das imagens ou fontes virtuais

No método das imagens ou fontes virtuais, utiliza-se fonte imagem especular virtual para traçar os caminhos das reflexões sonoras da fonte ao receptor, considerando-se a distância percorrida e as atenuações ocorridas em cada reflexão para contabilizar a parcela de energia das fontes imagem de primeira ordem e ordens superiores.

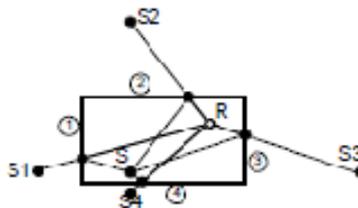


Figura 2 - Trajetórias de reflexões de primeira ordem em salas retangulares.
Fonte: (Raynoise, 1993).

Em resumo, a utilização deste método facilita a determinação da direção de um raio refletido que deve atingir um ouvinte em uma determinada posição da audiência, simplificando, portanto, o posicionamento de painéis refletores no teto e/ou paredes de uma sala.

2.2. Método dos raios acústicos ou traçado de raios

Neste método a modelagem da onda sonora é feita por analogia a raios luminosos, baseando-se na acústica geométrica. Assume-se que a energia emitida pela fonte sonora é distribuída igualmente entre um número discreto de raios sonoros, dessa forma, ao colidirem com as superfícies da sala, o nível de energia de cada raio decresce com as reflexões devido à absorção das superfícies e progressivamente com a absorção do ar. Quando a energia de um raio não for mais representativa, a propagação é interrompida.

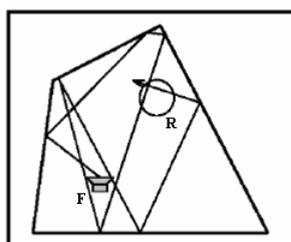


Figura 3 - Traçado de um raio acústico da fonte sonora (F) ao receptor (R).
Fonte: (Raynoise, 1993).

O método de traçado de raios oferece uma série de vantagens em termos de simplificação e facilidade de visualização de um problema. Entretanto, sua aplicabilidade fica limitada a problemas onde o comprimento de onda é significativamente pequeno em relação às dimensões geométricas do caso estudado (Medeiros, 2002).

2.3. Métodos híbridos

Os métodos híbridos são métodos que procuram simular os fenômenos mais importantes em acústica de salas (absorção do ar e fronteiras, reflexão especular e reflexão difusa) através de combinações de métodos numéricos (ver Figura 4).

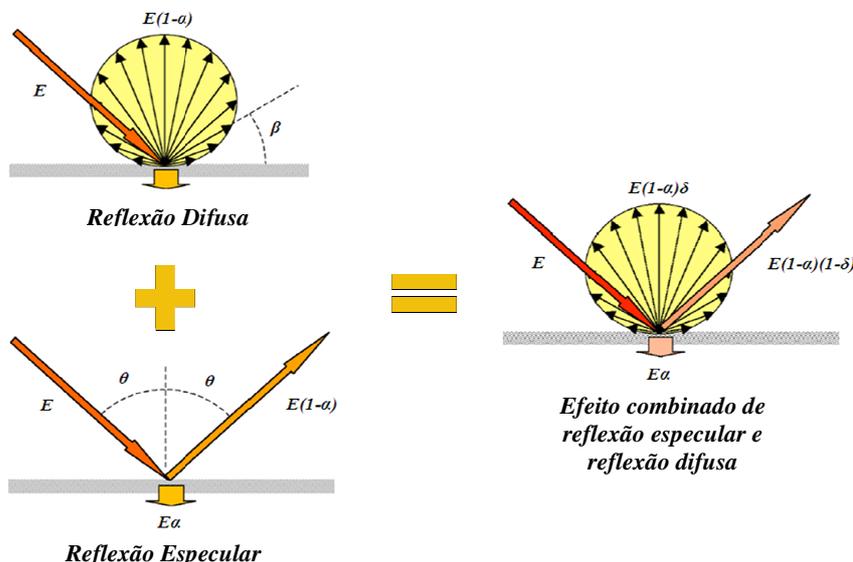


Figura 4 - Distribuição de energia do raio incidente pela absorção, reflexão difusa e reflexão especular em um método híbrido.

Fonte: (Tenebaum; Camilo, 2004).

Embora utilize métodos que fornecem resultados com boa precisão e eficiência, o *software* utilizado para realizar as simulações neste trabalho (ODEON 9.2 Combined), assim como outros, possui limitações. Como é um modelo com maior confiabilidade para altas frequências, suas superfícies devem ser (quase) planas e tão grandes quanto possível, minimizando assim o efeito da difração sonora para baixas frequências. Adicionalmente, superfícies muito pequenas, modeladas na tentativa de atingir alta fidelidade geométrica, resultam em piores ao invés de melhores resultados e, provavelmente, levam um tempo maior para o processamento dos cálculos. A aproximação de uma superfície curva através de uma superfície com seções planas depende da superfície curva em si e do quão importante essa superfície é. Curvas convexas, por exemplo, dispersam naturalmente energia sonora, portanto, se essa superfície está exposta, deve-se evitá-la, por exemplo, substituindo um quarto de círculo, que poderia agir como um refletor, por um plano único de 45° . Por outro lado, curvas côncavas naturalmente concentram energia sonora e, uma vez que a focalização é um efeito que se deseja inserir no modelo, esta deve ser preservada. No entanto, isso não significa que muitas subdivisões são a solução. A utilização de muitas superfícies pode tornar o modelo visualmente complexo, aumentando o tempo de cálculo além de aumentar a probabilidade de erros (Odeon, 2008). Em relação à faixa de frequência, os resultados são fornecidos somente em bandas de oitava, impedindo um estudo mais detalhado de ambientes, entre outras limitações.

3. ANÁLISE EXPERIMENTAL

O ambiente analisado foi uma sala de aula do Campus Profissional da Universidade Federal do Pará (UFPA). A sala conta com carteiras (para alunos e professor), mesa e porta de madeira, janelas de vidro, quadro magnético, aparelhos de ar condicionado e um armário para retro-projetor. Este ambiente é utilizado para ministrar aulas, apresentar trabalhos, etc., sendo, portanto, um ambiente em que a fala deve ser privilegiada, isto é, em que o campo direto deve ser priorizado, de modo que a difusão sonora seja controlada e as reflexões não prejudiquem sua inteligibilidade. Inteligibilidade esta, influenciada pelas dimensões, forma, orientação e natureza das superfícies e objetos presentes na sala, bem como pelo nível de ruído de fundo. De acordo com a finalidade da sala e baseando-se na norma ISO 3382/1997, foram analisados os seguintes parâmetros para avaliar sua qualidade acústica: Tempo de Reverberação baseado no termo T_{30} , Tempo de Decaimento Inicial (*EDT*), Definição (D_{50}) e Índice Rápido de Transmissão da Fala (*RaSTI*), para cada banda de oitava entre 125 Hz e 8 kHz. Devido ao tamanho reduzido da sala não foi analisada a distribuição do nível de pressão sonora do ambiente, considerando que esta distribuição ocorre de forma satisfatória.

3.1. Parâmetros Acústicos

3.1.1. Tempo de Reverberação (TR)

O tempo de reverberação é o tempo necessário para que o nível de pressão sonora, em um ambiente, diminua 60 dB. No caso deste trabalho, o tempo de reverberação é baseado no termo T_{30} , utilizado por questões normativas haja vista que em alguns ambientes, a diferença entre o nível gerado pela fonte e o nível de ruído de fundo, não chegam a apresentar uma diferença de 60 dB. No Brasil não existe norma que estabeleça valores ideais para o tempo de reverberação em salas de aula (Bertoli, 2001). Porém, segundo a norma ANSI S 12.60 / 2002 – *Acoustical Performance Criteria, Design Requirements and Guidelines for Schools*, a primeira a especificar parâmetros sobre a acústica de escolas, o tempo de reverberação ótimo para uma sala de aula varia entre 0,4 e 0,6 segundos.

3.1.2. Tempo de Decaimento Inicial (*EDT* – *Early Decay Time*)

O parâmetro *EDT* (*Early Decay Time* – Tempo de Decaimento Inicial) é o tempo necessário para que a curva de decaimento energético caia os primeiros 10 dB. A taxa de decaimento inicial de sons é tão importante quanto o tempo de reverberação (TR). Pois, um decaimento inicial rápido, é interpretado pelo ouvido humano como se o tempo de reverberação de um ambiente fosse curto. Para ambientes em que a fala deve ser privilegiada, deseja-se que esta tenha *Intimidade* – parâmetro subjetivo relacionado ao *EDT* que promove a sensação de que a sala possui um volume menor do que seu volume real. Recomenda-se que os valores obtidos para este parâmetro, para a finalidade do ambiente estudado, sejam menores do que 1,0 s.

3.1.3. Definição (D_{50})

Definição baseia-se na característica da audição na qual reflexões que atinjam o ouvinte em um intervalo de tempo de até 50 ms após a chegada do som direto, são consideradas “reflexões úteis”, no sentido de que se somam ao som direto, contribuindo para a audibilidade do som sem efeitos colaterais negativos. Por outro lado, reflexões mais tardias são percebidas subjetivamente como efeitos prejudiciais introduzidos pela sala, que se manifestam como reverberação e, no caso de reflexões isoladas, como ecos. Para garantir uma boa inteligibilidade da fala, o valor recomendado para o parâmetro *Definição* (D_{50}) deve ser o maior possível e não inferior a 0,5.

3.1.4. *RaSTI* (Índice Rápido de Transmissão da Fala)

O parâmetro *RaSTI* é uma versão simplificada do parâmetro *STI* (*Speech Transmission Index* - Índice de Transmissão da Fala) e tem por objetivo quantificar a inteligibilidade da palavra em ambientes fechados. Seus valores variam entre 0 (inteligibilidade nula) e 1 (inteligibilidade perfeita), portanto, resumidamente, pode-se dizer que este índice indica a porcentagem de sílabas realmente compreendidas em uma determinada palavra falada (Mateus et al., 2008). O valor recomendado para este parâmetro, tendo-se como referência o ambiente analisado, deve ser o maior possível e não inferior a 0,65.

Muitos outros parâmetros não foram mencionados anteriormente, mas nem por isso deixam de ser tão importantes quanto os aqui abordados, como é o caso da relação sinal/ruído (S/N), que é a diferença entre os níveis sonoros da fonte e do ruído de fundo. Em uma sala de aula, quando a relação sinal/ruído é positiva, a voz do professor se sobrepõe aos demais ruídos; já quando apresenta valores negativos, indica que o ruído de fundo está mais elevado que a voz do professor. Para relações de sinal/ruído entre 0 e +10 dB a inteligibilidade é inaceitável, entre +20 e +30 dB, é boa e, entre +30 e +40 dB é excelente, considerando que os valores de outros parâmetros, como o Tempo de Reverberação, por exemplo, estejam de acordo com os padrões estabelecidos para a finalidade da sala. Outro parâmetro importante é o Percentual de Perda de Articulação de Consoantes (%ALCons), pois, se em um ambiente a porcentagem média de sílabas detectadas corretamente é de 85%, considera-se que a perda de informação é de 15%; esta perda é associada a uma percepção incorreta das consoantes (responsáveis pela inteligibilidade da fala humana) e essa perda é indicada pelo referido parâmetro. Dessa forma, quanto maior for a perda de informação, pior será a inteligibilidade neste ambiente (Toro, 2005). Enfim, existem vários outros parâmetros que indicam determinadas características a respeito da qualidade acústica de um ambiente, seja qual for sua finalidade.

4. DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS ACÚSTICOS

O *software* utilizado para a determinação dos parâmetros acústicos anteriormente mencionados, de forma experimental, foi o *software* DIRAC 4.0, o qual se baseia na obtenção da Resposta Impulsiva (*Impulsive Response*) do sistema sob investigação. A Resposta Impulsiva Acústica é uma função temporal da pressão sonora de um ambiente, que resulta da excitação desse espaço por uma função que se aproxima da função delta de Dirac (Vorländer; Bietz, 1994). Esta técnica permite que, através de uma única medição, se tenha todas as informações a respeito do sistema, ou seja, a resposta impulsiva (*IR*) de um espaço acústico fornece uma descrição precisa desse sistema, a partir da qual todos os parâmetros acústicos definidos pela norma ISO 3382 são obtidos diretamente. As respostas impulsivas são medidas e salvas e os parâmetros acústicos calculados a partir dessas respostas.

O sinal utilizado para determinar os parâmetros da sala foi o sinal *MLS* (*Maximum Length Sequence*). A utilização deste sinal requer algumas precauções como, por exemplo, o sistema sob teste tem de ser invariante no tempo, o tempo de duração (comprimento) do sinal *MLS* tem de ser mais longo do que o da resposta impulsiva do sistema ou, pelo menos, ter a mesma duração, caso contrário, algumas partes da resposta computada serão perdidas, entre outras. Para realizar as medições foram utilizados os seguintes equipamentos: placa de aquisição de áudio da fabricante *M AUDIO* (ver Figura 5a), um microfone omnidirecional tipo TC25 (ver Figura 5b) com faixa de frequência de atuação de 9 Hz a 25 kHz da fabricante *Earthworks* e uma fonte sonora omnidirecional da fabricante B&K tipo 4296 (ver Figura 5c), de número de série 2448557.

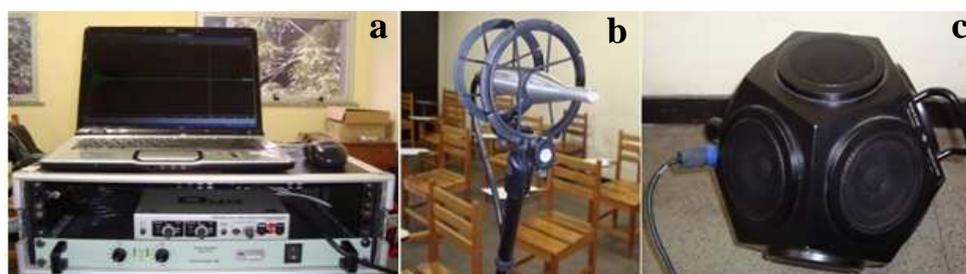


Figura 5 - Equipamentos utilizados para realizar as medições de tempo de reverberação: (a) sistema de aquisição de dados, (b) microfone omnidirecional e (c) fonte sonora.

As configurações da sala durante as medições com e sem audiência são mostradas na Figura 6a e 6b, respectivamente.



Figura 6 - Sala analisada durante medição de tempo de reverberação (a) sem audiência e (b) com audiência.

Foram utilizadas duas posições diferentes de fonte e seis posições aleatórias de microfone para cada posição de fonte, totalizando 24 medições para cada configuração de ensaio do ambiente, respeitando o número mínimo de medições sugerido pela norma ISO 3382, que é de 12 medições.

É importante que a audiência que ocupe a sala seja significativa, de modo que sejam obtidas diferenças consideráveis no parâmetro utilizado como referência quando feitas comparações entre os valores numéricos e experimentais, uma vez que a ocupação de um dos lugares da sala não tem a mesma representatividade quando mais da metade dos lugares da sala estão ocupados. Recomenda-se, portanto, que pelo menos 50% dos lugares sejam ocupados quando da medição dita com audiência, pois dessa forma, a inserção da platéia promove diferenças perceptíveis em qualquer parâmetro analisado. Os resultados obtidos para as configurações descritas nas Figuras 6a e 6b são mostrados a seguir (ver Tabela 1).

Tabela 1 - Valores experimentais dos parâmetros acústicos da sala com e sem audiência.

Frequência (Hz)	SEM AUDIÊNCIA				COM AUDIÊNCIA			
	TR (s)	EDT (s)	D ₅₀	RaSTI	TR (s)	EDT (s)	D ₅₀	RaSTI
125	1,70	1,94	0,37	0,44 a 0,48	1,73	1,61	0,35	0,54 a 0,58
250	1,60	1,87	0,35		1,40	1,47	0,42	
500	1,69	2,06	0,27		1,07	1,34	0,40	
1000	1,58	1,99	0,28		0,94	1,17	0,43	
2000	1,36	1,69	0,37		0,80	0,97	0,50	
4000	1,14	1,34	0,44		0,71	0,85	0,57	
8000	0,78	0,85	0,59		0,62	0,60	0,69	

5. ANÁLISE NUMÉRICA

A referida sala foi representada por modelos geométricos, criados na plataforma CAD, e convertidos para o formato (.dxf) para possibilitar a importação para o *software* ODEON. Para cada superfície é atribuído um valor de coeficiente de absorção sonora e , opcionalmente, um valor de coeficiente de espalhamento, condizente com suas características reais. A potência sonora e o tipo de fonte também são inseridos no modelo, para que a representação do ambiente real, através do modelo numérico, seja a mais semelhante possível. Por se tratar de um ambiente de volume relativamente pequeno ($135,97 \text{ m}^3$), todo objeto a ser inserido no modelo tinha de possuir geometria representativa à sua geometria real, para se obter maior precisão nos resultados. Por outro lado, os objetos não podiam ser muito detalhados para que isso não refletisse em elevado tempo de processamento ou mesmo a não execução de uma simulação, sendo necessário simplificar o modelo, tal como sugerido na metodologia do *software* utilizado.

Devido às limitações, tanto dos métodos de cálculo de um modelo numérico quanto da determinação de alguns dados de entrada, a validação desses modelos, geralmente, é feita através de ensaios experimentais, levando-se em consideração, primeiramente, o ambiente sem audiência, pois dessa forma, o número de elementos é menor, e os elementos de maior complexidade (audiência) ainda não estão presentes, o que facilita a validação. O processo de validação de um modelo consiste em comparar os resultados obtidos experimentalmente com os dados fornecidos, através de simulações, em seu respectivo modelo numérico. No caso aqui trabalhado, foram realizadas simulações com e sem audiência na sala em estudo, no intuito de se obter seu tempo de reverberação, de tal forma que estes resultados pudessem ser comparados com resultados experimentais, obtidos sob as mesmas condições e assim validassem o modelo numérico.

A representação da sala, através de seu respectivo modelo geométrico, é mostrada a seguir (ver Figura 7a) em vista superior, em ambiente computacional, na qual os detalhes em vermelho representam as posições da fonte sonora durante as medições. Este mesmo modelo é apresentado na Figura 7b, com as características de cada superfície associadas a um coeficiente de absorção condizente com as características do ambiente real (ver Figura 7c).



Figura 7 - (a) Vista superior do modelo geométrico da sala, apresentado em ambiente computacional, (b) modelo geométrico da sala em vista isométrica e (c) ambiente real.

Um esquema dos modelos numéricos é apresentado na Figura 8, no qual cada superfície representa um elemento, e este corresponde a um objeto (material) do ambiente real.

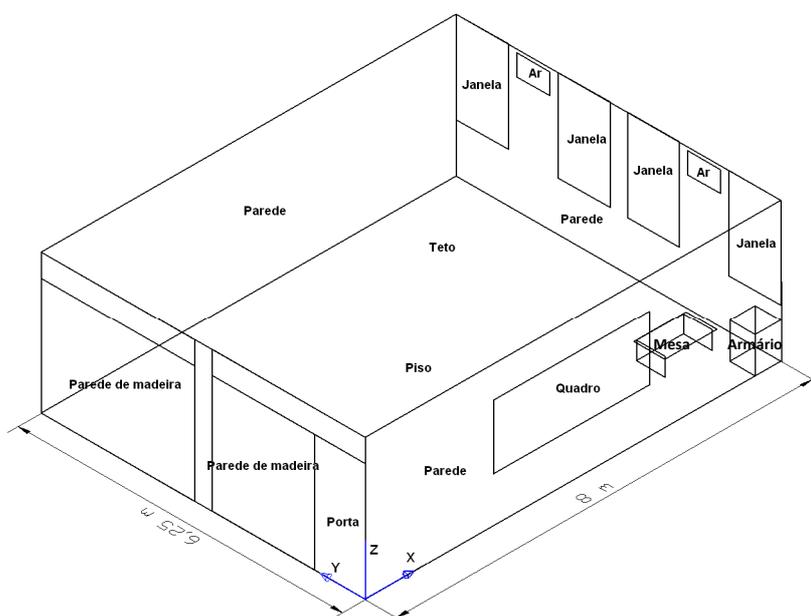


Figura 8 - Correspondência das superfícies do modelo geométrico aos objetos reais presentes na sala.

Os elementos utilizados nos modelos numéricos foram os seguintes: 102 – Smooth concrete, painted or glazed; 603 – Solid wooden door; 703 – Plasterboard on frame; 903 – Audience on wooden chairs (1 person per square meter); 2010 – Concrete block; 2313 – Floors linoleum directly on concrete; 2379 – Windows glass; 2389 – Wood walls (8 mm); 2465 – Plywood ; 2466 – Painéis de sisal; 2467 – Painéis de açaí; 2468 – Flexonic (75 mm). A Tabela 2 apresenta as características de absorção dos elementos utilizados e suas respectivas áreas.

Tabela 2 - Características de absorção das superfícies dos modelos numéricos da sala e suas respectivas áreas.

Objeto	Área total (m ²)	Código do Material	Coeficiente de absorção sonora por bandas de oitavas							
			63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
Armário	0,93	603	0,14	0,14	0,10	0,06	0,08	0,10	0,10	0,10
Porta	2,25									
Janelas	9,68	2379	0,35	0,35	0,25	0,18	0,12	0,07	0,04	0,04
Carteiras	11,49	2465	0,015	0,03	0,03	0,04	0,04	0,04	0,05	0,05
Mesa	1,30									
Paredes	28,35	2010	0,10	0,10	0,05	0,06	0,07	0,09	0,08	0,08
Quadro	3,70	703	0,30	0,30	0,12	0,08	0,06	0,06	0,05	0,05
Piso	50,00	2313	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03	0,04	0,04	0,04
Teto	30,32	102	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02
Aluno	1,27	903	0,16	0,16	0,24	0,56	0,69	0,81	0,78	0,78
Audiência máxima	39,25									
Paredes de madeira	11,25	2389	0,28	0,28	0,22	0,17	0,09	0,10	0,11	0,11
Painéis de sisal (20 mm)	32,30	2466	0,07	0,07	0,17	0,29	0,48	0,68	0,77	0,28
Painéis de açaí (30 mm)	32,30	2467	0,13	0,54	0,37	0,48	0,81	0,79	0,87	0,89
Flexonic (75 mm)	32,30	2468	0,23	0,23	0,68	0,98	1,04	0,97	0,99	0,99

Os valores de coeficiente de absorção sonora da maioria dos materiais foram extraídos de um catálogo que o programa de simulação fornece, enquanto que para outros materiais esses valores foram obtidos através de ensaios em câmara reverberante em escala reduzida.

A curva de calibração do modelo numérico a partir dos resultados experimentais, levando-se em consideração o tempo de reverberação da sala sem audiência, é apresentada na na Figura 9, na qual se nota que as maiores divergências entre as medições e os valores obtidos pelas simulações, estão nas mais baixas frequências do espectro (abaixo de 500 Hz), pois o método de cálculo utilizado pelo *software* de simulação é uma combinação de métodos que fazem analogia do som a raios luminosos, ou seja, parte-se do princípio que os raios acústicos utilizados possuem comprimentos de onda muito pequenos, passando a não reproduzir de forma satisfatória o fenômeno de difração sonora destes em baixas frequências, apresentando assim, maior confiabilidade para médias e altas frequências. Adicionalmente o método experimental de determinação do Tempo de Reverberação também possui limitações, uma vez que se parte do princípio do qual o campo sonoro do ambiente sob teste é difuso, e para as mais baixas frequências é mais complicado haver difusão sonora, haja vista que para um ambiente relativamente pequeno (135,67 m³), a resposta em baixa frequência é fortemente modal, como no caso da sala aqui analisada, uma vez que sua frequência de corte – em acústica é a frequência a partir da qual a difusão sonora de um ambiente se dá satisfatoriamente – é de 198,04 Hz. Dessa forma, as comparações apresentadas a seguir são analisadas para a faixa de frequência de 500 Hz a 8 kHz, que neste caso, corresponde à faixa de médias e altas frequências, e para esta faixa a confiabilidade é garantida.

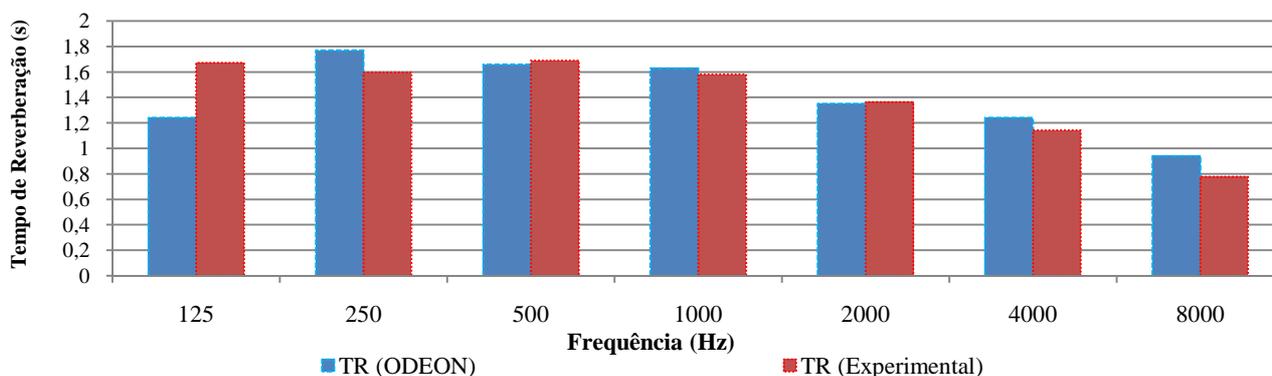


Figura 9 - Comparação dos resultados experimental e numérico obtidos para o Tempo de Reverberação da sala sem audiência.

A partir das comparações apresentadas na Figura 9, nas quais o modelo numérico foi capaz de produzir resultados que apresentaram boa concordância com as medições experimentais, considerou-se validado o referido modelo numérico. Em outras palavras, o mesmo está apto para a realização de simulações mais complexas (com audiências variadas e materiais de revestimento diversos). Dessa forma, serão executados a seguir, tratamentos acústicos hipotéticos no intuito de melhorar a qualidade da sala, utilizando-se materiais de revestimento diversos.

Anteriormente à execução de um tratamento acústico, determina-se o material de revestimento interno a ser utilizado e sua quantidade certa, de acordo com suas características de absorção sonora. O posicionamento do material é definido levando-se em consideração as reflexões que devem ser minimizadas (ou eliminadas) sem que a audiência na parte mais extrema da sala (última fila de cadeiras) fique prejudicada, quando de um som vindo da parte frontal (oposta) da sala (proveniente de um orador).

Assumindo-se que o orador fica a maior parte do tempo de duração das aulas, afastado de um metro do quadro, determinou-se o caminho das ondas sonoras na sala em estudo, através do Método da Fonte Imagem Especular (ver Figura 10), visando-se obter uma configuração simples e eficiente para nela se executar os tratamentos acústicos hipotéticos. De acordo com a Figura 10, através de um tratamento hipotético, em que a parede do fundo da sala e uma parte do teto podem ser preenchidas com material de revestimento, faz com que os ouvintes mais afastados não fiquem prejudicados, uma vez que o restante das superfícies da sala promove um reforço do som direto através de reflexões, sem privilegiar ou prejudicar um ouvinte específico. A distribuição sonora da sala após a execução do tratamento acústico hipotético é mostrada na Figura 11.

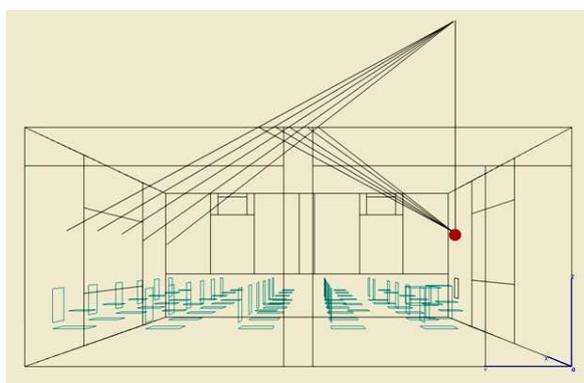


Figura 10 - Determinação do caminho das ondas sonoras utilizando o Método da Fonte Imagem Especular

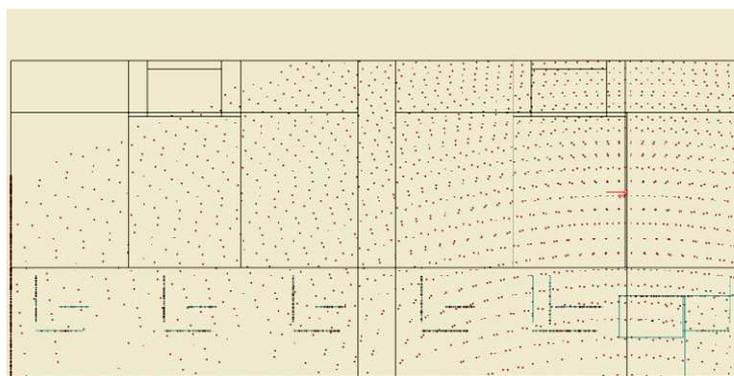


Figura 11 - Distribuição sonora da sala eliminando as reflexões provenientes da parede do fundo e parte do teto.

Como resultado desse tratamento, tem-se a distribuição sonora da sala, mostrada na Figura 11, na qual os pontos vermelhos representam frentes de onda e assim, pode-se ter idéia do comportamento da sala após a implementação das modificações propostas.

São propostos então, tratamentos acústicos da sala em questão, utilizando-se painéis de fibra de sisal e de fibra de açai, previamente caracterizados acusticamente, e um material convencional comumente utilizado para esta finalidade: placas acústicas Sonex Flexonic - 75 mm, tendo-se como base o caminho das ondas sonoras mostrado na Figura 10 e realizando-se simulações com esses materiais, inicialmente sem audiência (ver Figura 12a) e, em seguida, com a capacidade total de alunos utilizando-se somente os referidos painéis de sisal como material de revestimento (ver Figura 12b), verificando de que forma os parâmetros acústicos variam, quando da alteração do material utilizado no tratamento e quando da presença da audiência máxima em sala de aula.

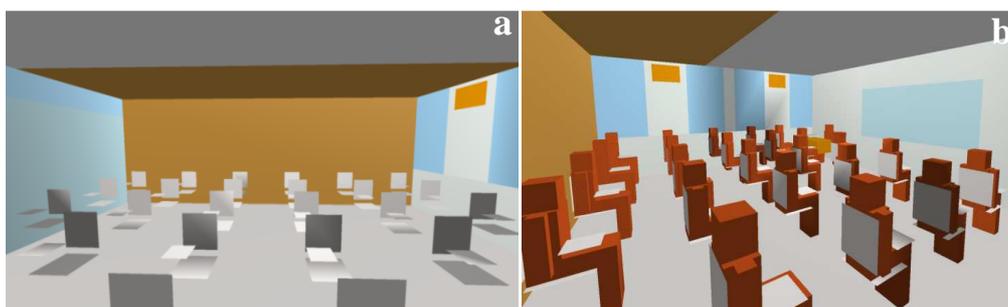


Figura 12 - (a) Sala com tratamento acústico proposto e (b) com o mesmo tratamento proposto e com a capacidade total de alunos na sala.

Os resultados esperados para as situações sem audiência podem ser vistos na Tabela 3, enquanto que os resultados obtidos para a situação com audiência podem ser vistos na Tabela 4. Eventualmente poderiam ser feitas outras simulações (tratamentos acústicos hipotéticos), levando-se em consideração diferentes partes da sala a serem tratadas, utilizando-se materiais de revestimento diversos. No entanto, baseando-se no estudo feito através do Método da Fonte Imagem Especular, o qual forneceu o caminho das ondas mostrado na figura 10 quando do preenchimento de parte do teto e parede do fundo com material de acústico, optou-se por utilizar a solução mais simples e de boa eficiência, no que se refere à quantidade de material de revestimento utilizada e sua aplicação na região que pode receber este material sem prejudicar a acústica da sala.

Tabela 3 - Valores esperados para os parâmetros acústicos da sala sem audiência e com tratamentos acústicos diversos.

Frequência (Hz)	TRATAMENTOS ACÚSTICOS PROPOSTOS											
	SONEX FLEXONIC (75 mm)				PAINÉIS DE AÇAÍ (30 mm)				PAINÉIS DE SISAL (20 mm)			
	TR (s)	EDT (s)	D ₅₀	RaSTI	T ₃₀ (s)	EDT (s)	D ₅₀	RaSTI	TR (s)	EDT (s)	D ₅₀	RaSTI
500	0,60	0,56	0,76	0,71 a 0,73	0,74	0,70	0,67	0,71 a 0,73	1,01	1,00	0,53	0,66 a 0,68
1000	0,58	0,47	0,82		0,59	0,50	0,80		0,74	0,74	0,65	
2000	0,53	0,43	0,84		0,55	0,48	0,81		0,59	0,51	0,79	
4000	0,51	0,41	0,85		0,49	0,44	0,83		0,54	0,47	0,82	
8000	0,42	0,37	0,88		0,43	0,38	0,87		0,51	0,49	0,80	

Tabela 4 - Valores esperados para os parâmetros acústicos da sala com audiência máxima e com tratamento acústico com painéis de fibra de sisal.

Frequência (Hz)	TRATAMENTO ACÚSTICO (PAINÉIS DE SISAL) E AUDIÊNCIA MÁXIMA			
	T ₃₀ (s)	EDT (s)	D ₅₀	RaSTI
500	0,50	0,48	0,79	0,75 a 0,78
1000	0,44	0,40	0,85	
2000	0,41	0,33	0,90	
4000	0,39	0,32	0,90	
8000	0,35	0,33	0,90	

Nota-se as que os tratamentos acústicos propostos promovem melhorias consideráveis em todos os parâmetros analisados como no caso do Tempo de Reverberação, porém, o efeito combinado do tratamento com a audiência aproximam os valores dos parâmetros acústicos, dos valores ideais para a finalidade do ambiente. A determinação dos parâmetros acústicos de um ambiente com a presença de audiência é importante no sentido de analisar o comportamento da sala em uma condição semelhante à sua real utilização, não fazendo sentido se preocupar com a qualidade acústica de um ambiente se este não for frequentado por pessoas. Porém, a influência da audiência deve ser mínima, de forma que para situações bem distintas (ora a sala cheia, ora com poucas pessoas) o comportamento da sala seja praticamente o mesmo.

Comparando-se os valores do Tempo de Reverberação da sala sem audiência, com e sem o tratamento acústico, utilizando-se como material de revestimento, painéis de fibra de sisal, as reduções obtidas para as frequências de 500 Hz, 1 kHz e 2 kHz foram de 19%, 34% e 41%, respectivamente, e o parâmetro responsável pela inteligibilidade (*RaSTI*) aumentou de 0,46 a 0,67, em média, melhorando assim, consideravelmente a qualidade acústica da sala em estudo. As frequências de 500 Hz, 1 kHz e 2 kHz tem grande importância no que diz respeito à inteligibilidade por dois motivos principais, o primeiro é porque a frequência da fala humana encontra-se justamente neste intervalo, ou seja, tempos de reverberação elevados nessas frequências, dificultam o entendimento das palavras e consequentemente a comunicação

verbal; o segundo é porque essas frequências tem um peso maior quando da determinação do índice de inteligibilidade de forma analítica.

6. CONCLUSÕES

Os tratamentos acústicos aqui propostos, utilizando-se tanto materiais acústicos convencionais quanto painéis de fibras vegetais (painéis de sisal e açai), promoveram melhorias significativas em todos os parâmetros analisados, destacando-se o fato de que o efeito combinado do tratamento com a audiência tornaram os valores dos parâmetros acústicos próximos dos valores ideais para a finalidade do ambiente.

Medições com audiência são importantes no sentido de analisar o comportamento do ambiente estudado em uma situação semelhante à sua real utilização. No entanto, sua qualidade acústica deve ser tal que não sofra grandes influências quando da variação de audiência, pois, como é um parâmetro que varia muito, a qualidade acústica do ambiente pode variar conforme a variação deste parâmetro.

No ambiente aqui analisado, observou-se que, anteriormente aos tratamentos propostos, a audiência promovia diferenças significativas nos parâmetros analisados, diferenças essas que ficaram menores após a “implementação” desses tratamentos hipotéticos, ou seja, a influência da audiência nos parâmetros da sala foi reduzida quando da utilização dos tratamentos propostos. Assim, conclui-se que a sala, sem tratamento algum, não apresenta boa qualidade acústica.

A qualidade acústica de uma sala depende fortemente de sua inteligibilidade, porém, outros parâmetros tem grande importância (Relação Sinal/Ruído, Tempo de Decaimento Inicial, entre outros), pois servem como indicadores de outras características, o que torna sua avaliação mais completa já que se relacionam entre si, ou seja, a inteligibilidade de um ambiente está associada com parâmetros como o Tempo de Reverberação, com a Relação Sinal/Ruído, com o Tempo de Decaimento Inicial, entre outros.

7. REFERÊNCIAS

- ANSI STANDARD 12.60: *Acoustical Performance Criteria, Design Requirements and Guidelines for Schools*, 2002.
- Bertoli, S. R. *Avaliação do conforto acústico de prédios escolares da rede pública: o caso de Campinas*. In: II ENCONTRO LATINO AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 2001, Águas de São Pedro. Anais do ENCAC 2001, 2001.
- Camilo, T. S.; Tenebaum, R. A.; Coelho, J. L. Bento. *Engenharia acústica auxiliada por computador: um método híbrido para simulação de acústica de salas*. IN: I SEMINÁRIO DE ENGENHARIA DE ÁUDIO, 2002, Belo Horizonte. Anais do I Seminário de Engenharia de Áudio. Belo Horizonte, 2002. v. CD. p. 1-8.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 3382: *Measurement of the reverberation time of rooms with reference to other acoustical parameters*, 1997.
- Mateus, Diogo et al. *Avaliação dos parâmetros de qualidade sonora nas capelas da reconciliação no edifício da nova igreja do santuário de Fátima*. In: ACÚSTICA 2008, Universidade de Coimbra, Portugal, 2008.
- Medeiros, E. B. *Introdução à teoria acústica*. IN: I SEMINÁRIO DE ENGENHARIA DE ÁUDIO, 2002, Belo Horizonte. Anais do I Seminário de Engenharia de Áudio. Belo Horizonte, 2002. Versão do CD.
- Melo, V.S.G. et al. *Aperfeiçoamento do software RAIOS para simulação numérica de acústica de salas com inclusão de modelo modal para baixas frequências*. REVISTA DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ACÚSTICA (SOBRAC) nº 38, 2007.
- Raynoise. *Manual - Numerical Integration Technologies*. N. V., 1993.
- Souza, M. C. R.. *Previsão do ruído em salas por raios acústicos e ensaios experimentais*. 1997. 113 f. Dissertação de Mestrado, Setor de Ciências Exatas, Vibrações e Acústica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1997.
- Tenebaum, R. A.; Camilo, T. S. *Método híbrido para simulação numérica de acústica de salas: teoria, implantação computacional e validação experimental*. In: I SEMINÁRIO MÚSICA CIÊNCIA TECNOLOGIA: ACÚSTICA MUSICAL, 2004, São Paulo.
- Toro, M. G. U. *Avaliação acústica de salas de aula em escolas públicas na cidade de Belém - Pará: uma proposição de projeto acústico*. 2005. 174 f. Dissertação de Mestrado, Setor de Ciências Exatas, Vibrações e Acústica, Universidade Federal do Pará, Belém, 2005.
- Vieira, R. J. A.. *Desenvolvimento de painéis confeccionados a partir de fibras de coco para controle acústico de recintos*. 2008. 262 f. Dissertação de Mestrado, Setor de Ciências Exatas, Vibrações e Acústica, Universidade Federal do Pará, Belém, 2008.
- Vorländer, M.; Bietz, H. *Comparison of Methods for Measuring Reverberation Time*. *Acustica* vol. 80. pp. 205 – 215, 1994.