

5 Exemplos

5.1 Interpretando os Resultados

Como existe uma grande variação entre as amplitudes de pressão máxima e mínima detectáveis pelo ouvido humano, é comum expressar a amplitude de pressão e a intensidade de uma onda sonora em escala decibel, que permite trabalhar com valores que apresentam diferenças de muitas ordens de grandeza de forma confortável [39].

Assim, ao invés de trabalhar com valores de pressão diretamente, é comum trabalhar com o chamado nível de pressão sonora ou *sound pressure level* (SPL). A expressão abaixo indica como converter a amplitude de pressão para SPL. P_{ref} corresponde à menor amplitude de pressão audível.

$$P_{SPL} = 20 \log \frac{P}{P_{ref}}$$
$$P_{ref} = 2.0 \times 10^{-5} N/m^2$$

Da mesma forma, ao lidar com a intensidade de uma onda sonora, é comum a utilização do nível de intensidade sonora ou *sound intensity level* (SIL). Abaixo estão indicadas as fórmulas que permitem calcular a intensidade sonora de uma onda a partir de sua amplitude de pressão e calcular seu SIL. O produto $\rho_0 c$ presente abaixo corresponde à impedância característica do meio. Para o ar, em condições normais, esta é igual a $414 \text{ kg}/(\text{m}^2 \text{ s})$.

$$I = \frac{P^2}{\rho_0 c}$$

$$I_{SIL} = 10 \log \frac{I}{I_{ref}}$$

$$I_{ref} = 1.0 \times 10^{-12} W$$

Para permitir avaliar a influência de uma fonte sonora em um ambiente, foram implementados três tipos diferentes de gráficos, que indicam o nível de pressão, o nível de intensidade e a resposta do ambiente ao impulso.

O primeiro gráfico corresponde aos níveis de pressão sonora da frente de onda, ou seja, ele indica em cada ponto do ambiente o nível de pressão correspondente ao menor caminho de propagação. Esse gráfico permite avaliar como se dá a propagação do som no ambiente.

O segundo gráfico indica, para cada ponto do ambiente, seu nível de intensidade sonora. Esse é calculado como a soma das intensidades sonoras associadas aos caminhos de propagação existentes entre a fonte e um determinado ponto do ambiente.

O terceiro gráfico permite visualizar com detalhes a resposta do ambiente ao impulso em um determinado ponto do ambiente. São mostrados os diversos caminhos de propagação calculados e três gráficos que permitem analisar a amplitude de pressão, o atraso e o ângulo de incidência associados a cada caminho de propagação. Nesses gráficos, a posição da fonte sonora é indicada por um asterisco e a posição do receptor por um círculo.

A Tabela 5.1, contendo dados obtidos em [39], indica alguns níveis de intensidade sonora típicos. Esses valores podem ser utilizados para uma análise qualitativa dos níveis de intensidade sonora apresentados em nossos gráficos. Para isto, basta calcular a diferença em decibéis entre os níveis de intensidade associados a dois pontos distintos de um ambiente e encontrar um par de valores típicos na figura que apresentem a mesma diferença.

Na região de frequência em que o nosso ouvido é mais sensível, podemos considerar que uma diferença de 10 dB corresponde à sensação da intensidade ser duas vezes maior que seu valor original [49]. Este fato também nos permite avaliar qualitativamente os resultados obtidos nos exemplos.

Limite da audição	0 dB
Folhas em movimento	20 dB
Sussurro (1 m)	30 dB
Casa Tranqüila	40 dB
Rua Tranqüila	50 dB
Conversa Normal	60 dB
Automóvel (interior)	70 dB
Canto alto (1 m)	75 dB
Automóvel (8 m)	80 dB
Motocicleta (10 m)	88 dB
Liquidificador (1 m)	90 dB
Metrô (interior)	94 dB
Caminhão Diesel (10 m)	100 dB
Cortador de grama (1 m)	107 dB
Rebitadora Pneumática (1 m)	115 dB
Serra Elétrica (1 m)	117 dB
Rock and Roll Amplificado (2 m)	120 dB
Avião a jato (30 m)	130 dB

Tabela 5.1: Valores Típicos de Níveis de Intensidade Sonora

5.2

Exemplo 1 - Difração

O ambiente utilizado neste exemplo (ilustrado na Figura 5.1) consiste em duas paredes paralelas. A maior das paredes tem comprimento igual a 10 m e a menor, 2 m . A área total do ambiente é igual a 1600 m^2 ($40\text{ m} \times 40\text{ m}$).

Este exemplo nos permite demonstrar que, ao adicionar feixes de difração aos caminhos de propagação, podemos criar campos sonoros mais “ricos” (ou interessantes). A Figura 5.2 apresenta um gráfico que indica a concentração de feixes em cada ponto do ambiente, que nos permite visualizar a disposição dos feixes no ambiente.

Os mapas apresentados na Figura 5.2 foram criados permitindo que os traçadores de feixes criassem um número ilimitado de feixes. Em a , apenas feixes de reflexão especular e transmissão são utilizados. Note como a adição de feixes de difração, permitiu criar em b um campo de pressão mais complexo. Com difração foi possível a reflexão da onda na menor das paredes e depois sua reflexão na parede maior. Foram estas reflexões que formaram o “W” deitado presente em b . Note também como toda a região localizada atrás da menor parede agora é ocupada por feixes.

A maior cobertura do ambiente foi conseguida porque a difração permitiu ao traçador criar um número maior de feixes. Em a , apenas 7 feixes foram criados. Em b esse número aumenta para um total de 63 feixes.

As Figuras 5.3 e 5.4 apresentam o nível de pressão sonora e o nível de intensidade sonora calculados para os casos a e b , respectivamente. Na Figura 5.5, estão ilustrados os caminhos de propagação entre a fonte sonora

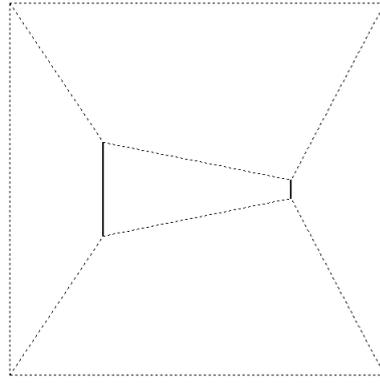


Figura 5.1: Exemplo 1 - Ambiente

e um ponto localizado atrás da menor das paredes. É interessante notar como estes caminhos, devido à difração, parecem envolver as paredes do ambiente.

5.3

Exemplo 2 - Difração versus Reflexão Especular

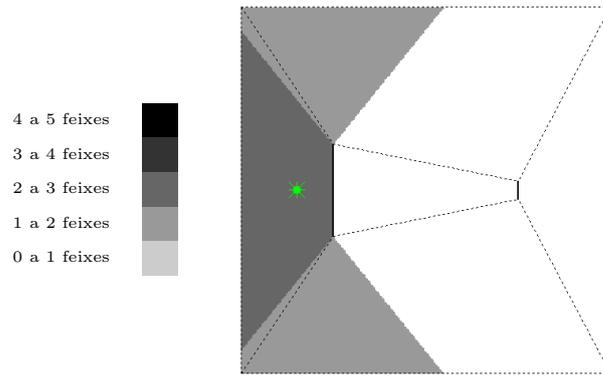
Neste exemplo buscamos mostrar o efeito que a adição de feixes de difração pode ter sobre um campo sonoro mais complexo que o apresentado no exemplo anterior. O ambiente utilizado neste exemplo, que busca imitar um prédio de escritórios, apresenta uma área de aproximadamente $361 m^2$ ($19 m \times 19 m$).

Foram calculados dois campos sonoros distintos. No primeiro (caso *a*) foram traçados apenas feixes de reflexão especular e transmissão, com um máximo de 6 reflexões. No segundo (caso *b*) uma das reflexões é substituída por uma difração, ou seja, foram traçados caminhos com um máximo de cinco reflexões especulares e uma difração. Nos dois casos, foi utilizada a mesma posição para a fonte sonora.

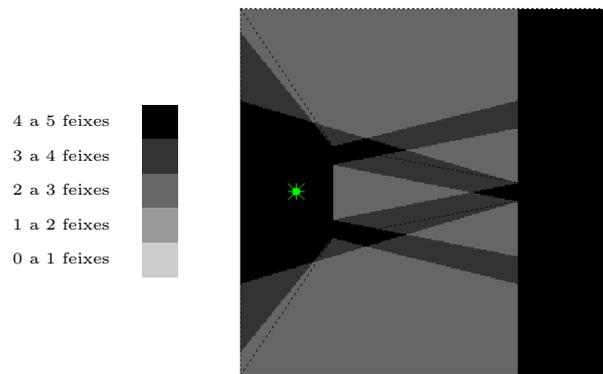
Como no exemplo 1, a inclusão do feixe de difração causou um aumento significativo no número de feixes criados. Em *a*, 3825 feixes foram criados e em *b*, 20297.

Na Figura 5.6 estão ilustrados os gráficos de amplitude de pressão da frente de onda correspondentes aos casos *a* e *b*. Note como a frente de onda no campo sonoro que utiliza difrações se apresenta mais contínua, principalmente dentro dos escritórios mais próximos à fonte sonora.

Apesar da difração atenuar bastante a onda sonora, este efeito também está presente nos gráficos de intensidade (Figura 5.7). Note como muitos dos feixes de som nas regiões ocupadas por feixes de difração (que podem ser



(a) Uso de Transmissões e Reflexões Especulares



(b) Uso de Transmissões, Reflexões Especulares e Difrações

Figura 5.2: Exemplo 1 - Feixes Obtidos sem (a) e com (b) Difração

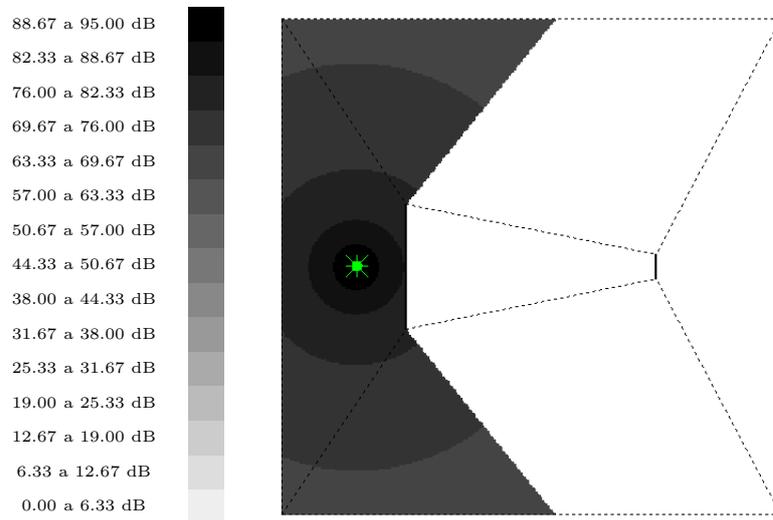
identificadas nos gráficos de SPL), antes claramente identificáveis no gráfico de intensidade do caso *a*, desaparecem em *b*.

A adição de uma difração aos caminhos de propagação também tem um efeito significativo sobre a resposta do ambiente ao impulso como pode ser visto nas Figuras 5.8, 5.9, 5.10 e 5.11. Estas figuras mostram como a adição da difração modifica a resposta ao impulso em duas posições diferentes do ambiente. Nestas figuras podemos verificar um aumento significativo no número de caminhos de propagação calculados quando feixes de difração são utilizados.

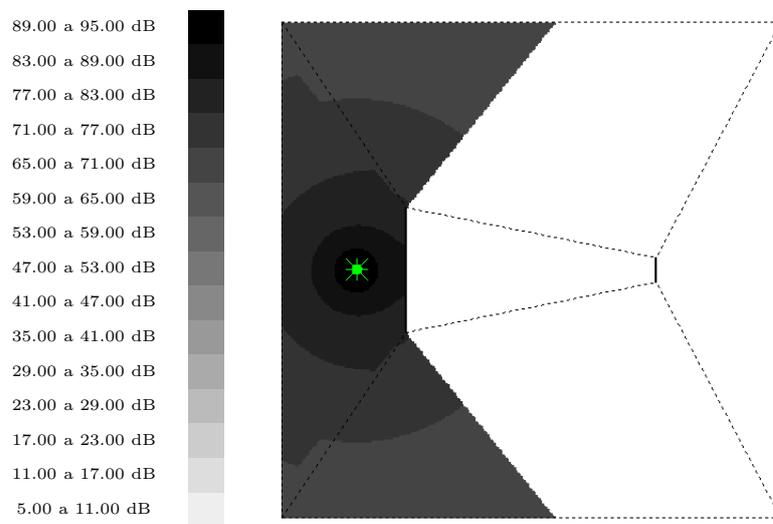
5.4

Exemplo 3 - Edifício Residencial

Como nosso último exemplo ilustrando os campos sonoros obtidos em nossa implementação, utilizamos um modelo extraído da planta de arquitetura de um edifício real. O modelo utilizado possui uma área igual a

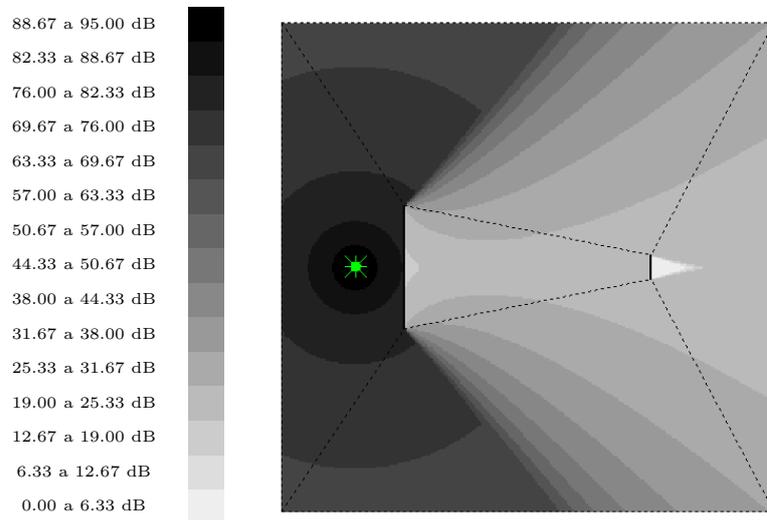


Amplitude da Frente de Onda (SPL)

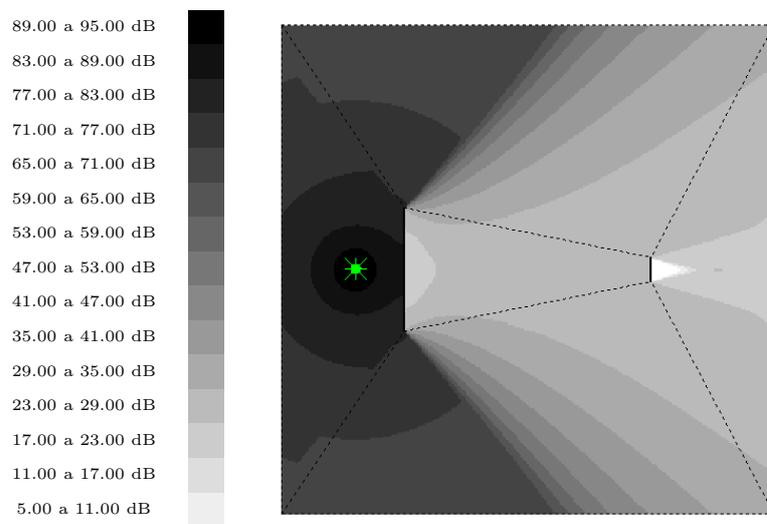


Intensidade Sonora (SIL)

Figura 5.3: Exemplo 1 - Resultados sem Difração



Amplitude da Frente de Onda (SPL)



Intensidade Sonora (SIL)

Figura 5.4: Exemplo 1 - Resultados com Difração

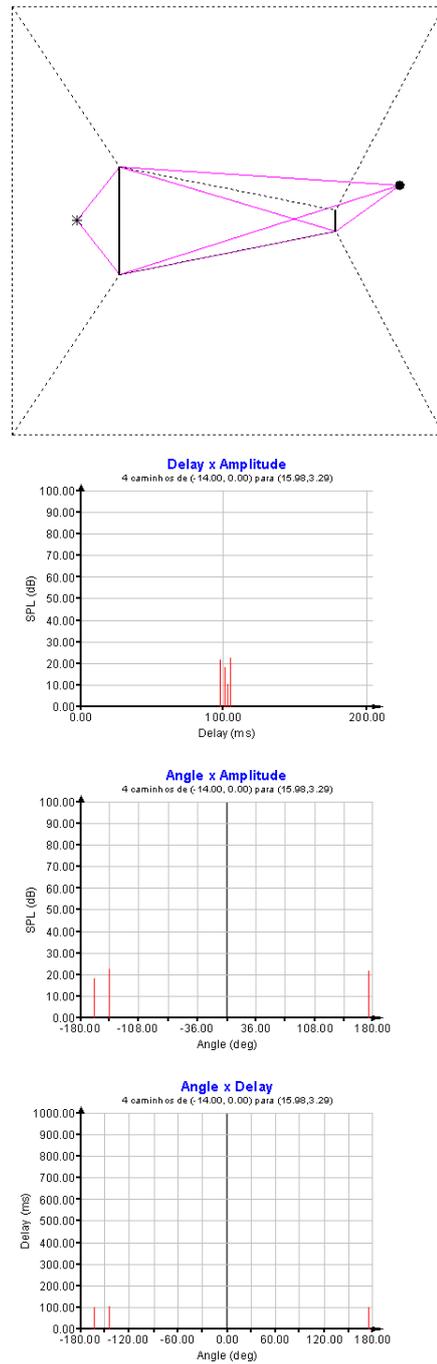
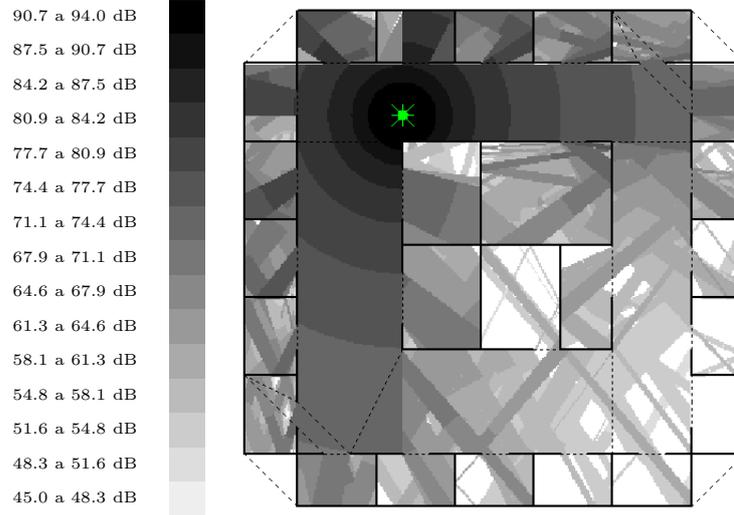
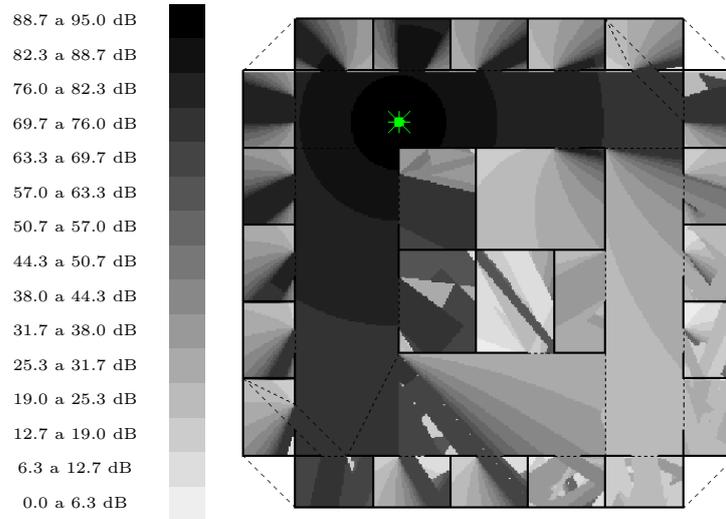


Figura 5.5: Exemplo 1 - Caminhos de Propagação

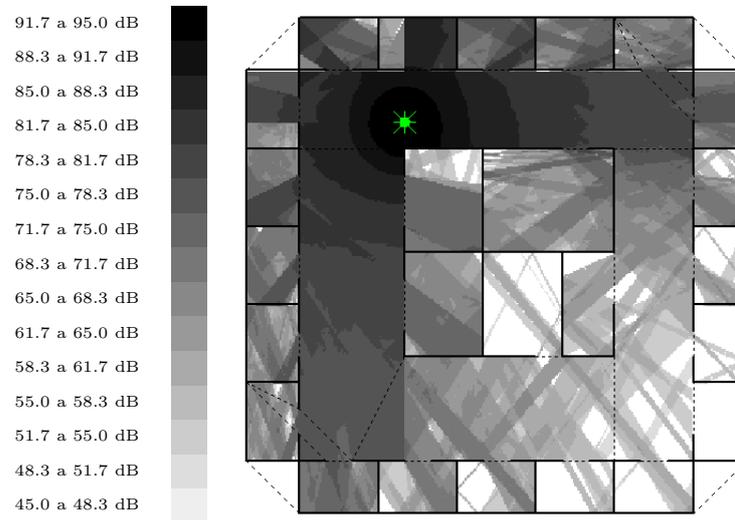


Sem Difração (Caso *a*)

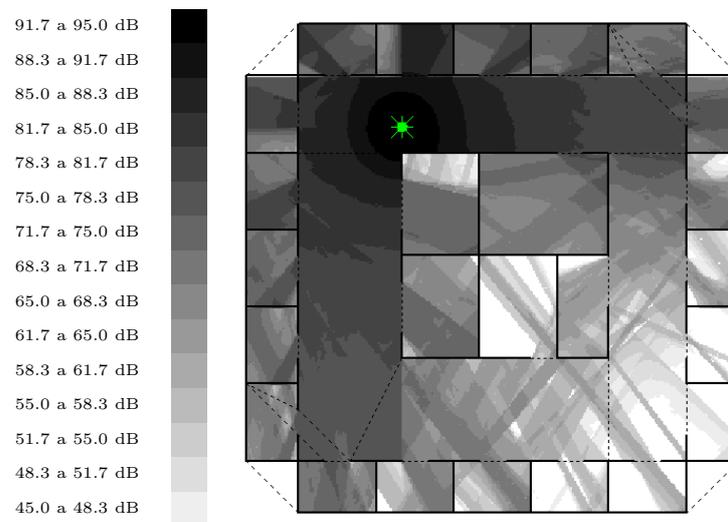


Com Difração (Caso *b*)

Figura 5.6: Exemplo 2 - Amplitude da Frente de Onda (SPL)



Sem Difração (Caso *a*)



Com Difração (Caso *b*)

Figura 5.7: Exemplo 2 - Intensidade Sonora (SIL)

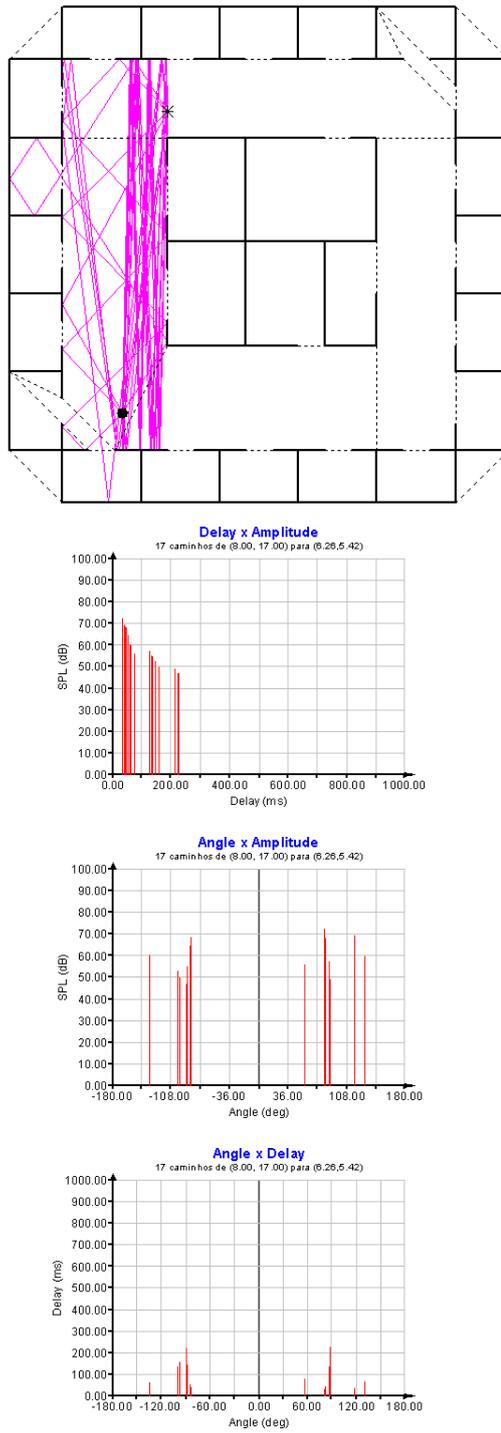


Figura 5.8: Exemplo 2a - Caminhos sem Difração até a Posição 1

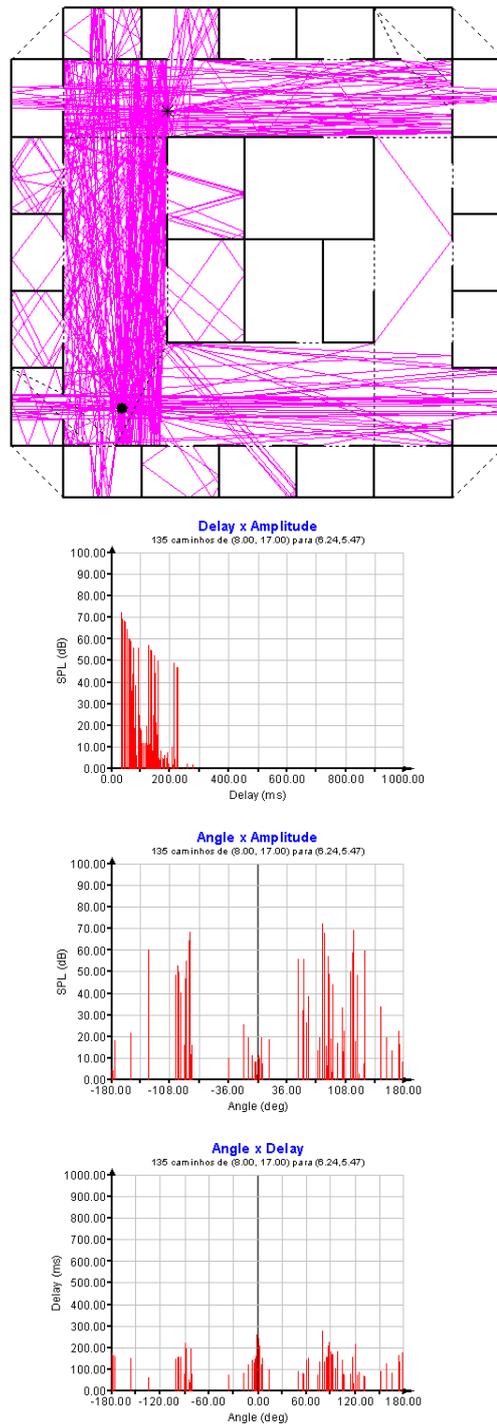


Figura 5.9: Exemplo 2b - Caminhos com Difração até a Posição 1

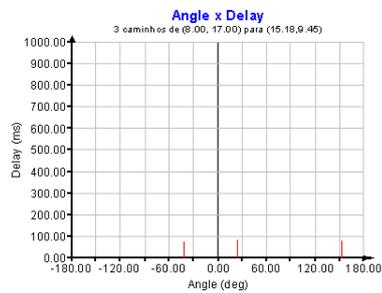
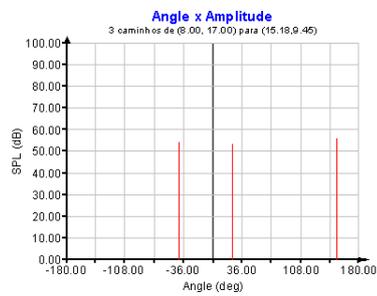
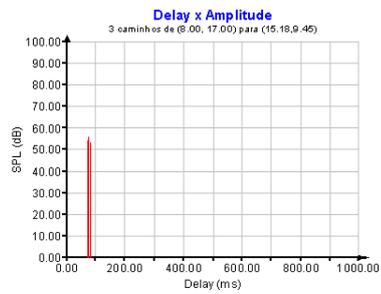
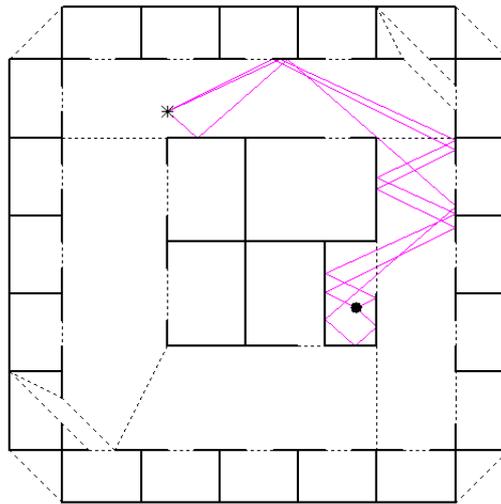


Figura 5.10: Exemplo 2a - Caminhos sem Difração até a Posição 2

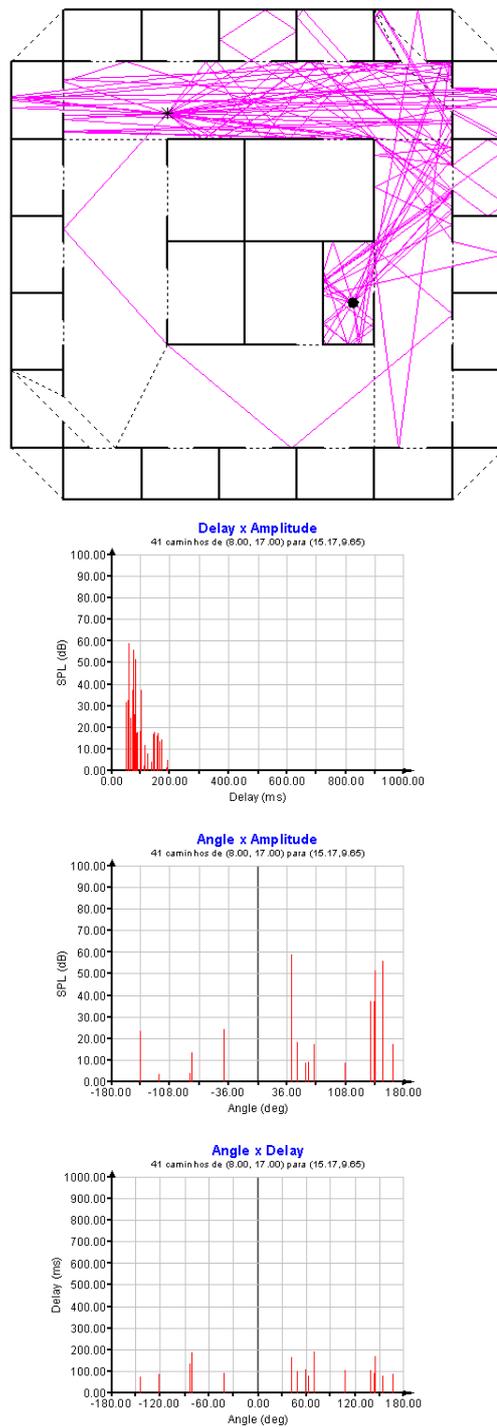


Figura 5.11: Exemplo 2b - Caminhos com Difração até a Posição 2

$777 m^2$. O comprimento e a largura do modelo são respectivamente, $50.72 m$ e $24.43 m$. Na montagem do modelo, foram removidas as portas e detalhes como os batentes das mesmas. Janelas foram consideradas como sendo acusticamente opacas. O modelo resultante pode ser visto na Figura 5.12.

Neste exemplo, foram calculados os campos de pressão e intensidade sonora para duas posições distintas da fonte sonora. Os resultados obtidos para a primeira e a segunda posição podem ser vistos, respectivamente, nas Figuras 5.12 e 5.16.

Os caminhos de propagação foram criados com um máximo de oito reflexões especulares e uma difração, o que resultou na criação de 105968 feixes para a primeira posição da fonte sonora e 85821 feixes para a segunda posição. Também foram incluídas as respostas ao impulso em três posições diferentes, para cada caso. Os gráficos das respostas ao impulso relativos à primeira posição da fonte sonora podem ser vistos nas Figuras 5.13 a 5.15. Os relativos à segunda posição da fonte sonora podem ser vistos nas Figuras 5.17 a 5.19.

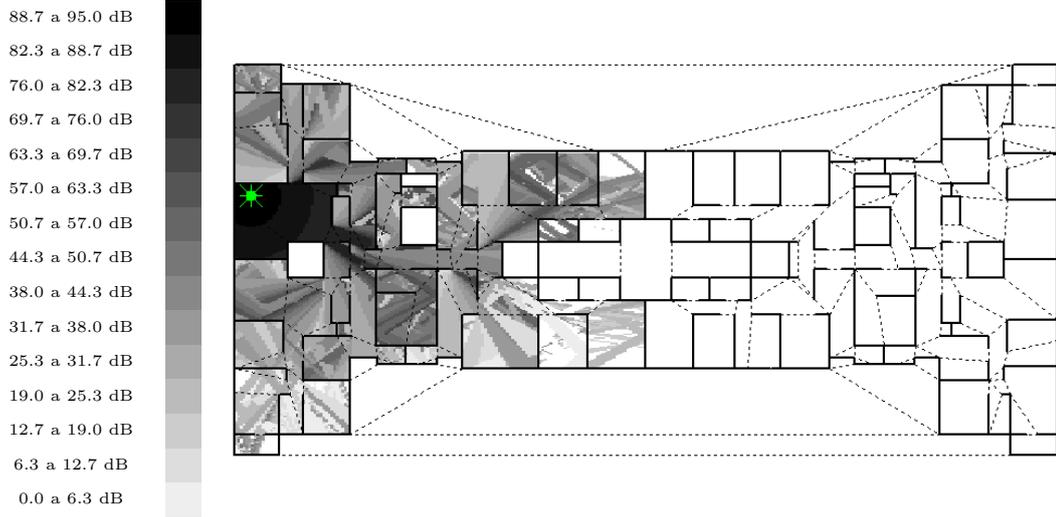
5.5

Medidas de Desempenho

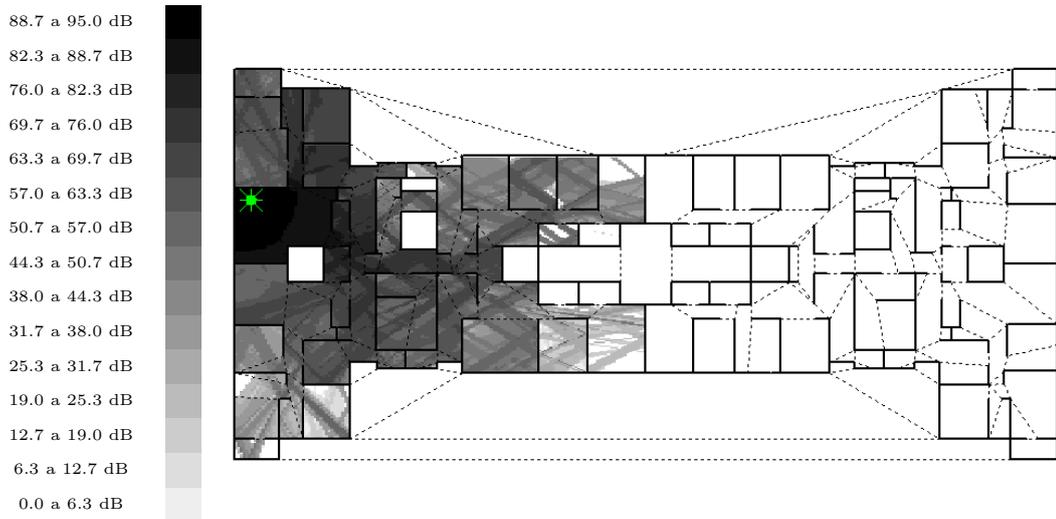
Para medir o desempenho do nosso programa, foram realizados três testes. Os dois primeiros testes tinham o objetivo de avaliar o desempenho da etapa de construção da *beam tree* e o terceiro teste o objetivo de avaliar a construção dos caminhos de propagação. Os dois primeiros testes foram realizados em um computador com processador Pentium4, 2 GHz, e o terceiro teste em um com processador Athlon, 1 GHz. Ambos os computadores possuíam 512 MB de memória.

Os dois primeiros testes diferem apenas no ambiente utilizado. No primeiro, utilizamos um ambiente que representa um conjunto de quarteirões de uma cidade, contendo 400 quarteirões dispostos sobre um *grid* regular (20×20), com espaçamento de $10 m$ entre cada quarteirão. O segundo ambiente utilizado é o mesmo utilizado em nosso segundo exemplo.

A avaliação do desempenho na criação da *beam tree* foi realizada fixando a posição da fonte sonora em cada ambiente e o número máximo de difrações em um caminho de propagação, enquanto o número máximo de reflexões era aumentado progressivamente. Este procedimento deu origem às três diferentes curvas presentes nos gráficos das Figuras 5.20 e 5.21, correspondentes aos casos contendo nenhuma, uma ou duas difrações. Os valores utilizados nos gráficos correspondem à média de dez experimentos.



Amplitude de Pressão da Frente de Onda (SPL)



Intensidade Sonora (SIL)

Figura 5.12: Exemplo 3a - Amplitude de Pressão e Intensidade Sonora

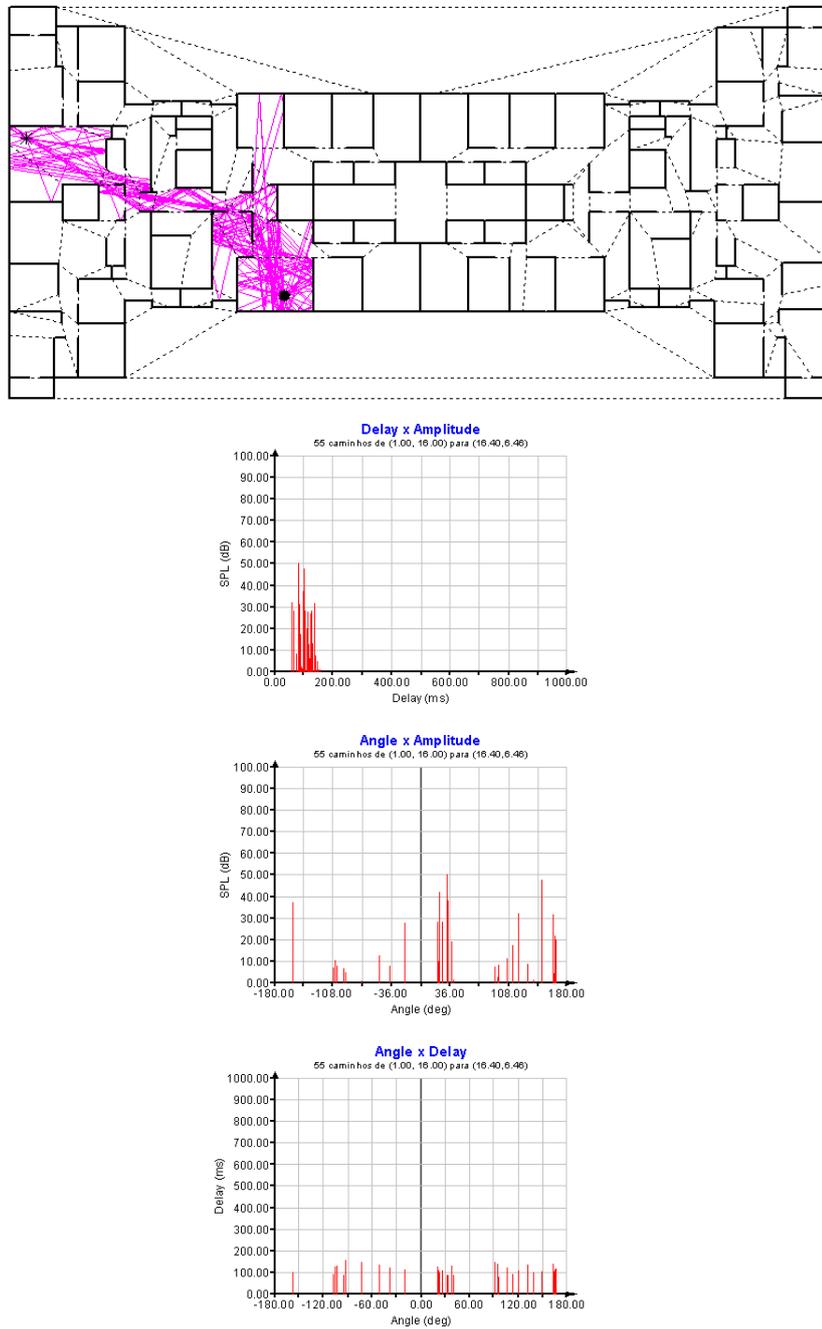


Figura 5.13: Exemplo 3a - Caminhos de Propagação (a)

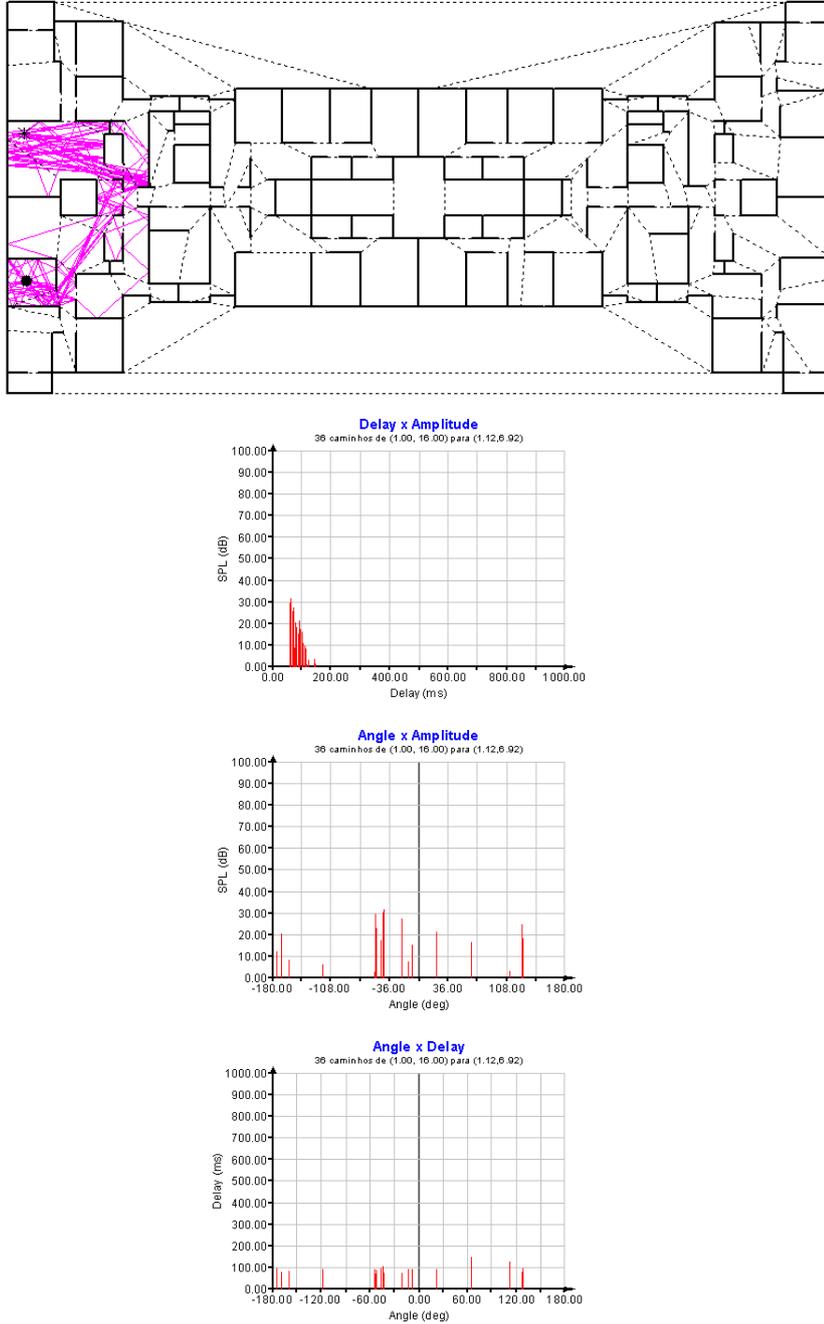


Figura 5.14: Exemplo 3a - Caminhos de Propagação (b)

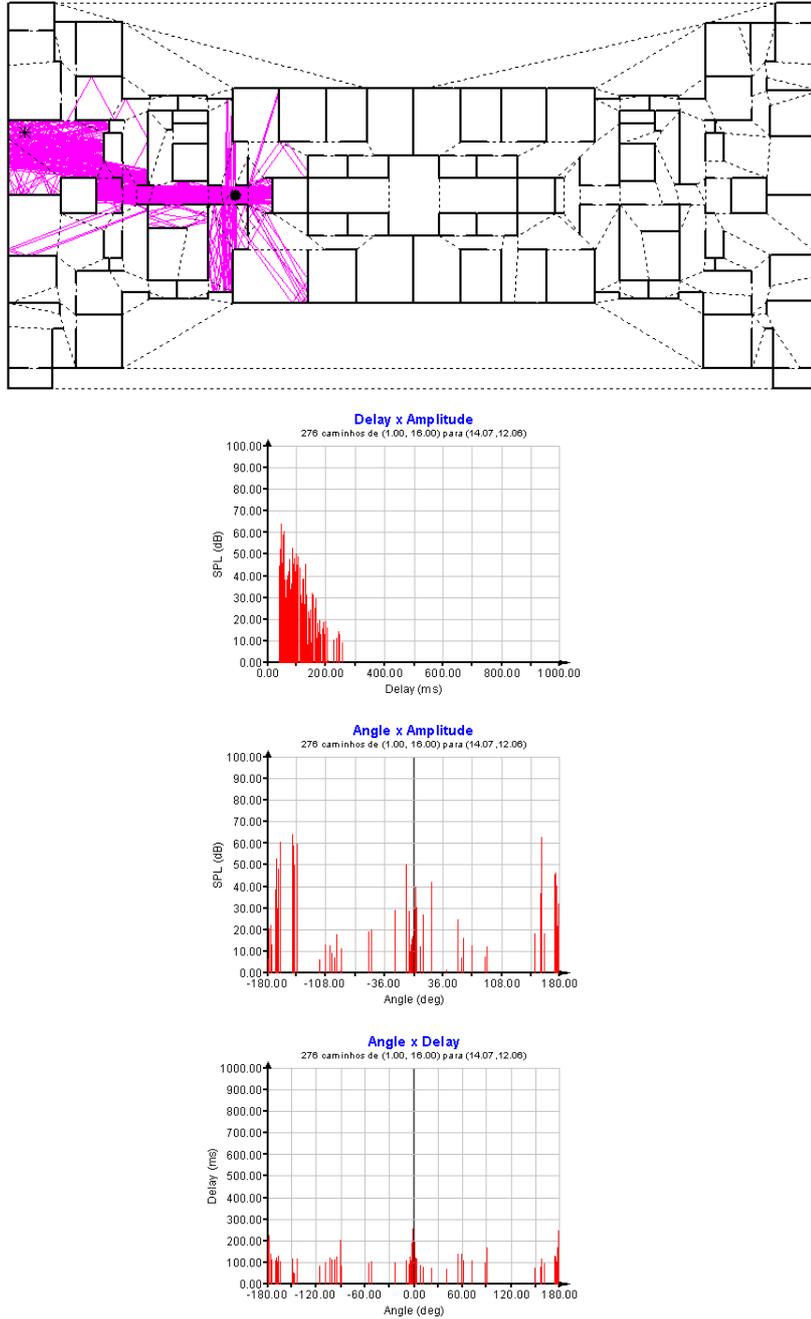
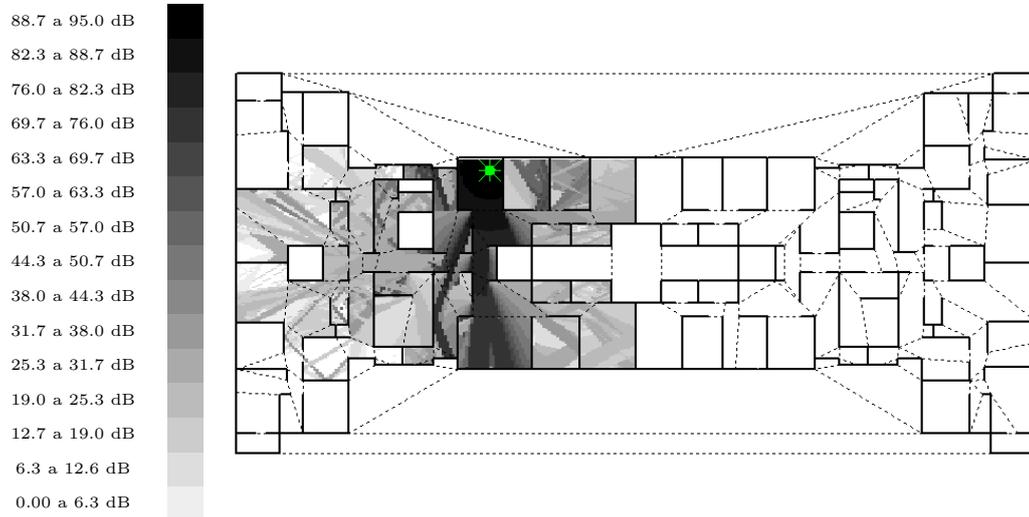
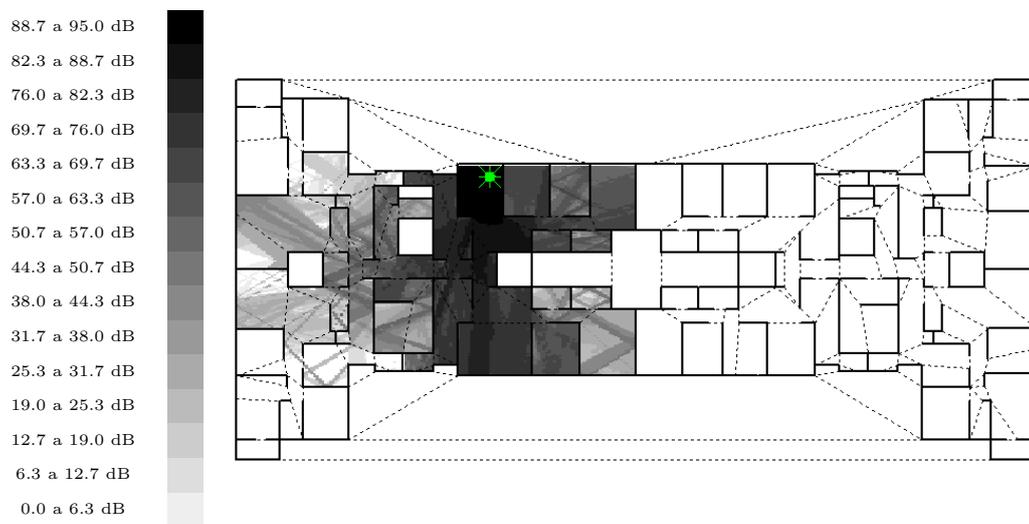


Figura 5.15: Exemplo 3a - Caminhos de Propagação (c)



Amplitude de Pressão da Frente de Onda (SPL)



Intensidade Sonora (SIL)

Figura 5.16: Exemplo 3b - Amplitude de Pressão e Intensidade Sonora

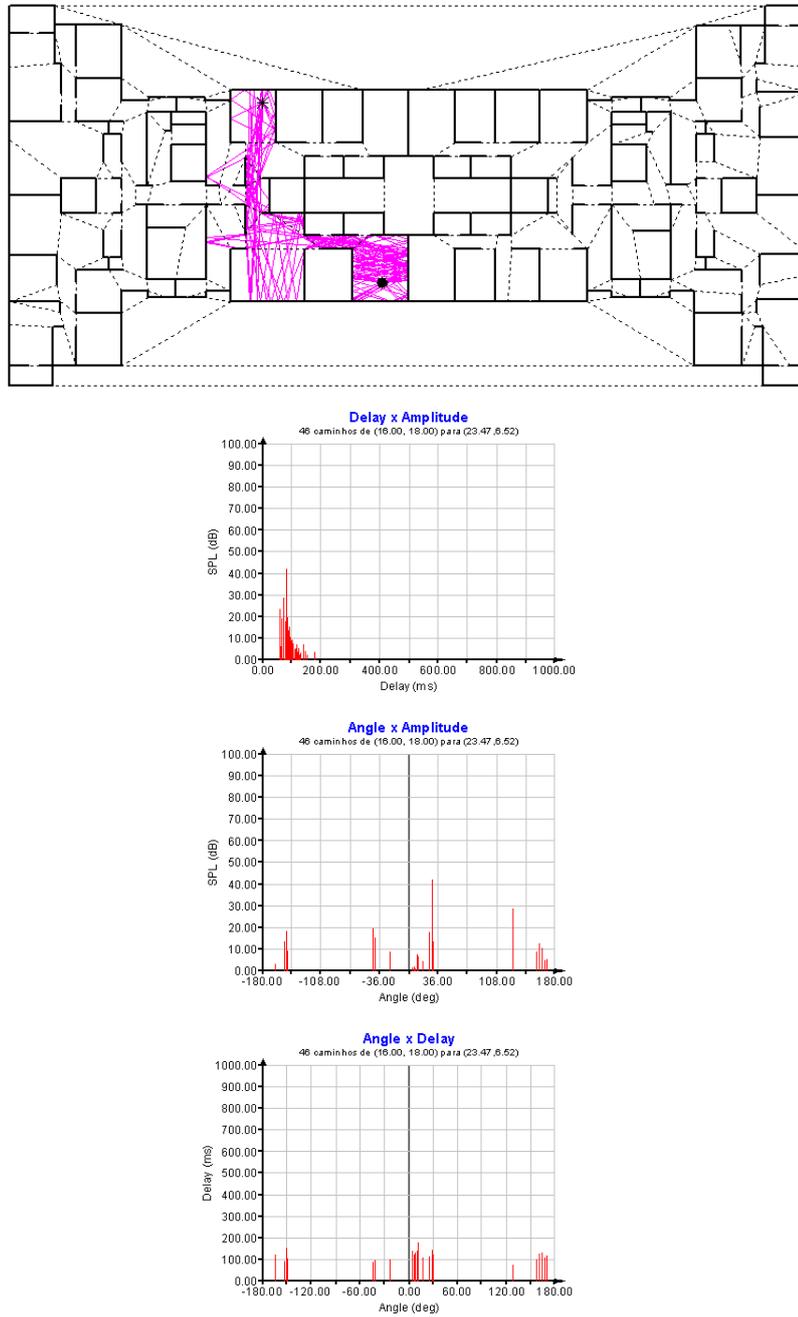


Figura 5.17: Exemplo 3b - Caminhos de Propagação (a)

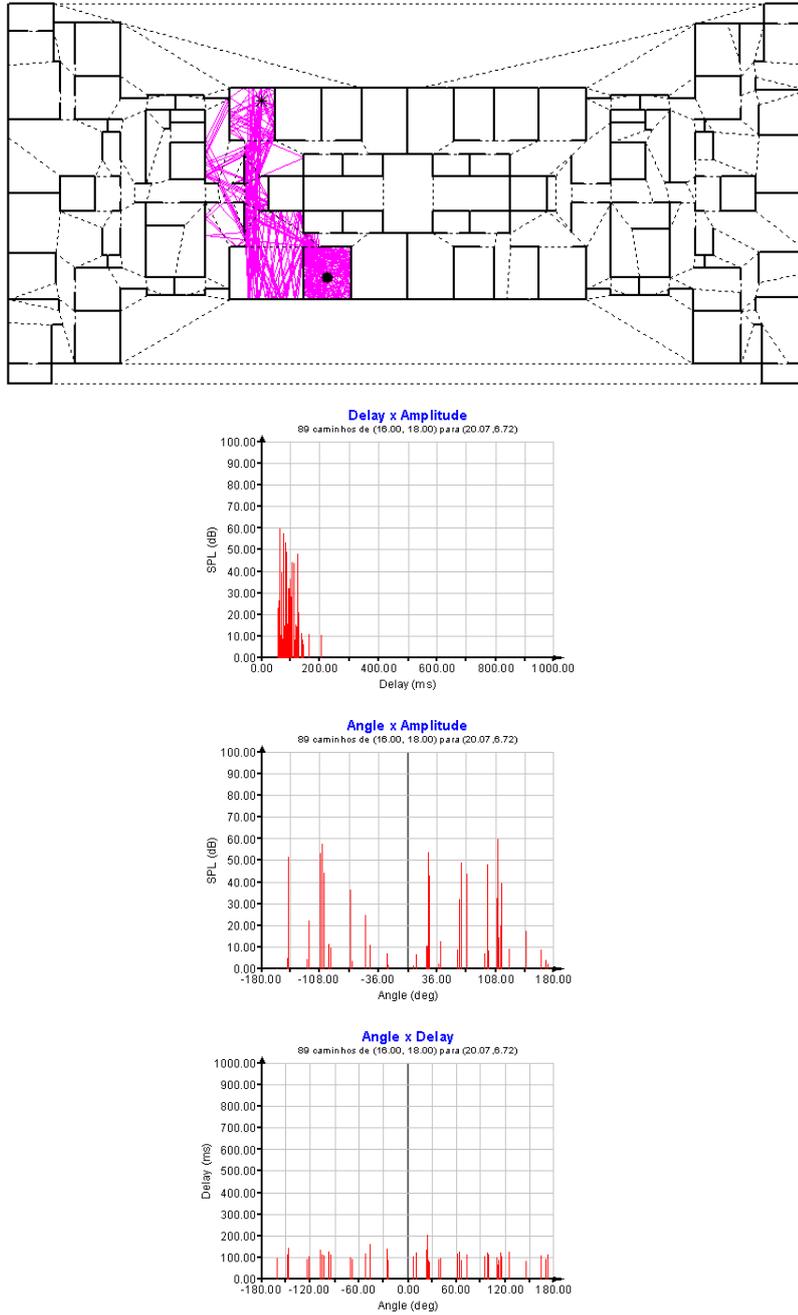


Figura 5.18: Exemplo 3b - Caminhos de Propagação (b)

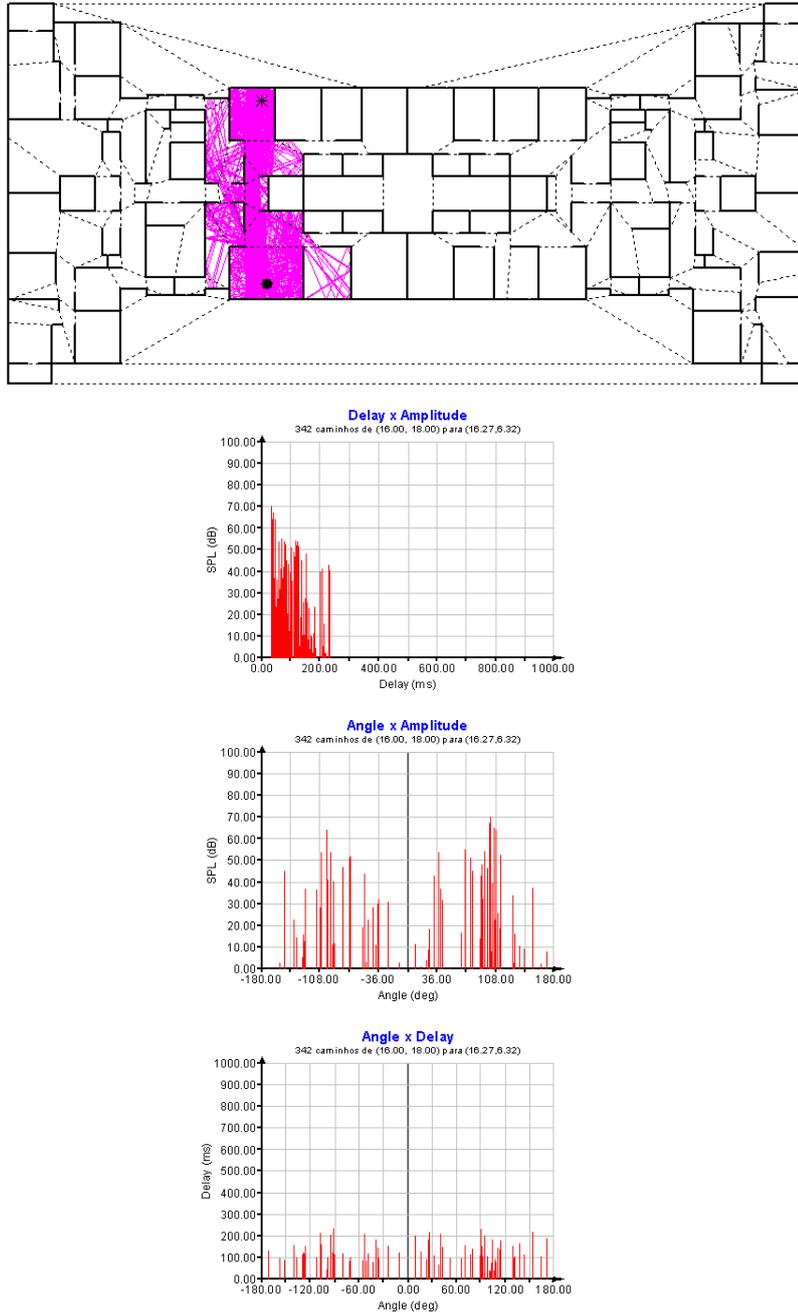


Figura 5.19: Exemplo 3b - Caminhos de Propagação (c)

Um aumento significativo do número de feixes em função do número de reflexões já era esperado, dados os resultados obtidos em [32], onde foi verificado que o número de feixes cresce exponencialmente em relação ao número de reflexões. Como os nossos gráficos indicam, a utilização de feixes de difração acelera significativamente este crescimento.

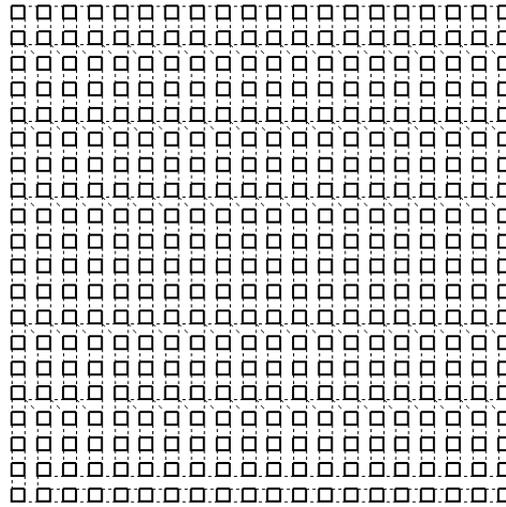
Como esperávamos, a geometria do ambiente também é um fator importante na construção dos feixes. Note como no segundo teste o crescimento do número de feixes é mais acelerado.

O desempenho da construção de caminhos de propagação foi avaliado criando os caminhos de propagação existentes no ambiente do exemplo 2, em dez posições distintas para o receptor. Estes foram criados após a construção de uma *beam tree* contendo todos os caminhos de propagação com no máximo 8 reflexões especulares e 1 difração. A Figura 5.22 apresenta as posições onde foram realizadas as medições e os resultados obtidos. Como nos testes anteriores, os valores contidos na tabela correspondem à média de dez experimentos.

Baseados, nestes testes iniciais, podemos concluir que a nossa implementação é apropriada para calcular as reverberações iniciais em tempo real. Além disso, os resultados obtidos na etapa de pré-processamento são bastante animadores. Acreditamos que pré-alocando os feixes de propagação e otimizando alguns predicados geométricos utilizados na construção da *beam tree*, podemos obter uma melhora significativa no desempenho desta etapa.

Também baseados nestes resultados, acreditamos que, se realizadas as mudanças propostas em [36] (*beam tracing* bidirecional, *beam tracing* com prioridades e *beam tracing* amortizado), o traçado de feixes bidimensionais pode ser utilizado em tempo real sem a necessidade de um servidor dedicado, como proposto em [36]. Este pode ser um fator determinante na adoção destas técnicas em aplicações como jogos.

Para melhorar o desempenho do programa, precisamos melhorar o controle de nossos traçadores de feixes para que estes não tracem feixes inutilmente. De acordo com [49], no cálculo da resposta ao impulso do ambiente, é suficiente ter caminhos de propagação separados por intervalos de tempo de 5 a 10 *ms*, que correspondem aproximadamente à resolução temporal de nossa audição. Como evidenciam os testes realizados nos exemplos anteriores e a avaliação da etapa de construção dos caminhos de propagação, nosso programa calcula um número excessivo de caminhos de propagação, uma vez que as reverberações iniciais estão limitadas aos primeiros 80 *ms* da resposta ao impulso [36]. Este controle adicional, entretanto, só pode ser realizado levando em consideração a posição do receptor.



Ambiente de Quarteirões

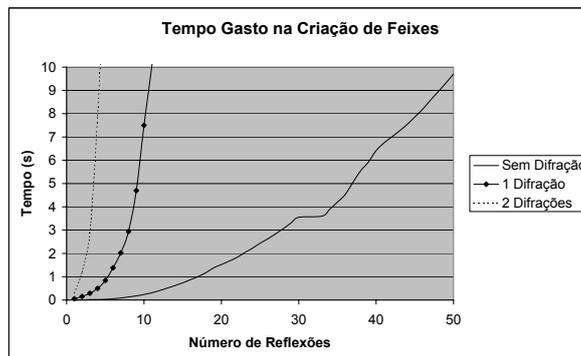
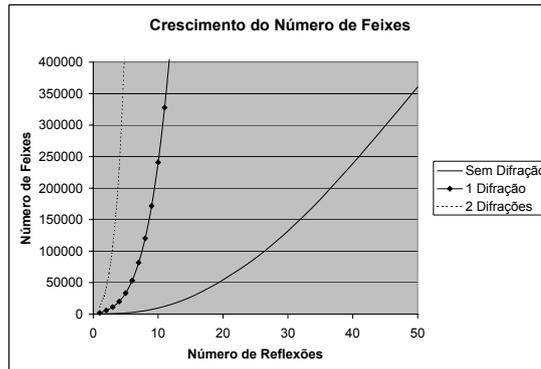


Figura 5.20: Construção de Feixes - Ambiente de Quarteirões

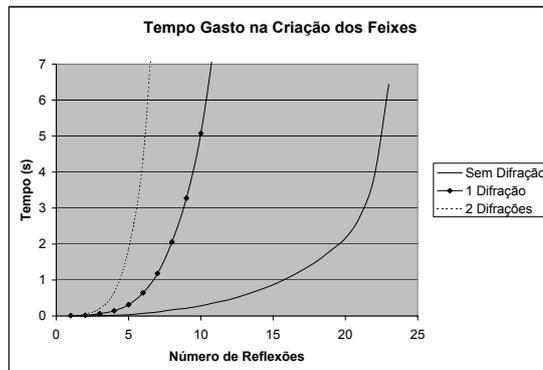
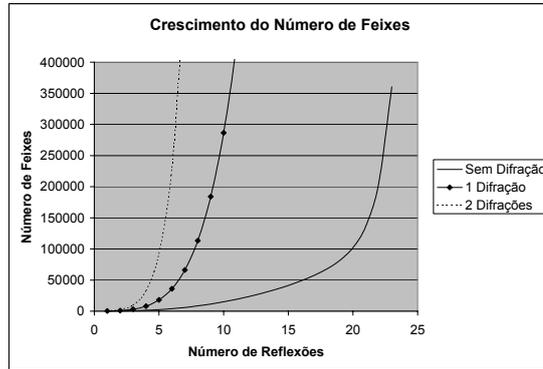
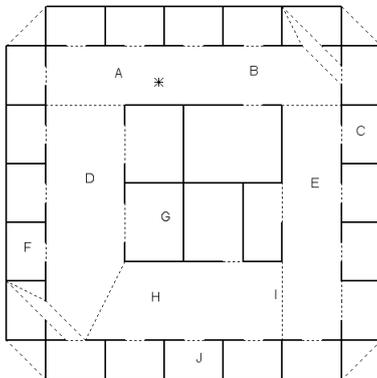


Figura 5.21: Construção de Feixes - Ambiente do Exemplo 2



Receptor	Número de Caminhos	Tempo (s)
A	414	0.012
B	478	0.012
C	117	0.003
D	338	0.013
E	303	0.010
F	174	0.005
G	199	0.005
H	159	0.006
I	143	0.005
J	40	0.001

Figura 5.22: Tempo Gasto na Construção de Caminhos de Propagação