



## III ENCONTRO NACIONAL I ENCONTRO LATINO-AMERICANO

Gramado, RS, 4 a 7 de julho de 1995

### OTIMIZAÇÃO DE FORMA EM TETOS ACÚSTICOS DE AUDITÓRIOS

Marco Antônio Cypreste Romanelli  
Departamento de Arquitetura e Urbanismo – UFES  
Av. Fernando Ferrari s/no, Goiabeiras, Vitória, ES, 29.060-900  
Telefones: 335 2565 e 235 1903; Fax: 335 2577

#### RESUMO

Apresenta-se um método para a otimização do desenho de tetos refletores. Demonstra-se como desenhar um refletor plano que atue sobre uma área prevista. É estabelecido um padrão para a atuação do teto refletor e apresentado um método de desenho que atenda a este padrão. São reportados exemplos de aplicação em duas salas diferentes e comentada a restrição ao método descrito imposta pela difração.

#### ABSTRACT

A method for shape optimization on reflecting ceilings is presented. One shows how to design a flat reflector covering a foreseen area. A pattern for reflecting ceiling action is established, and a method for designing attending to that pattern is presented. Applying samples on two different rooms are reported and the restriction imposed by diffraction is related.

#### PALAVRAS-CHAVE

Acústica; Tetos refletores; Otimização de Forma; Método de Cálculo.

#### INTRODUÇÃO

O Problema do desenho dos tetos que funcionem como refletores acústicos em auditórios é geralmente deixado em aberto pela bibliografia disponível. Diz-se apenas que tais superfícies devem ser modeladas de maneira que otimizem a distribuição do som refletido sobre a platéia, evitando fenômenos indesejáveis como ecos e focalizações. O arquiteto se ressentiu de critérios mais específicos em aplicabilidade para o desenho dos tetos acústicos, que ao menos orientem o processo convencional de tentativa-e-erro.

*É sempre necessário desenhar superfícies especiais nos tetos em paredes que atuem como refletores para o reforço do som no fundo da sala. ... Devem ser tomadas providências para reforçar a palavra e a música em uma sala de modo que o nível sonoro seja adequado em todas as suas partes. Em uma sala pequena, este requisito pode ser atendido pelo desenho apropriado de superfícies refletoras (paredes, piso e teto); em uma sala maior, em adição ao desenho apropriado das superfícies refletoras, um sistema de amplificação sonora de alta qualidade é indispensável. (KNUDSEN & HARRIS, 1950, T. A.)*

Um teto plano convencional produz apenas uma imagem da fonte, de onde parte uma reflexão divergente, que se perde antes do primeiro ouvinte e para além do último. Se encurvamos para baixo a extremidade do teto junto à fonte, criaremos novas imagens e novas reflexões, que poderão ser intencionalmente dirigidas para os primeiros ouvintes. O mesmo pode ser feito com a outra extremidade, a mais distante da fonte, dirigindo as reflexões desta parte do teto para os últimos ouvintes, eliminando as perdas.

## OTIMIZAÇÃO DA FORMA DO TETO

**O Desenho de Um Refletor.** Primeiro determinamos o ponto onde começará a face plana. Observamos que este ponto define o lugar geométrico de imagens possíveis em uma circunferência com centro no ponto e raio igual à distância entre a fonte e o ponto. A escolha de uma inclinação para o refletor definirá sua imagem da fonte sobre a circunferência. Podemos perceber que algumas inclinações definem imagens mais próximas da fonte, outras têm imagens mais próximas da platéia. Há também inclinações inúteis, que produzem imagens "invisíveis" por qualquer ouvinte. Figura 01a.

Se existe um ponto da platéia que deve ser o "início" da área (A) de atuação desta face do teto, ligando este ponto e a fonte àquele ponto onde começará o teto, a inclinação do mesmo fica automaticamente definida pela lei de igualdade entre os ângulos de incidência e de reflexão. Aparece assim a imagem da fonte refletida por esta face do teto acústico. Se definirmos outro ponto sobre a platéia como sendo o "final" da atuação do refletor, encontraremos a extensão do mesmo ligando este ponto à imagem que acabamos de definir.

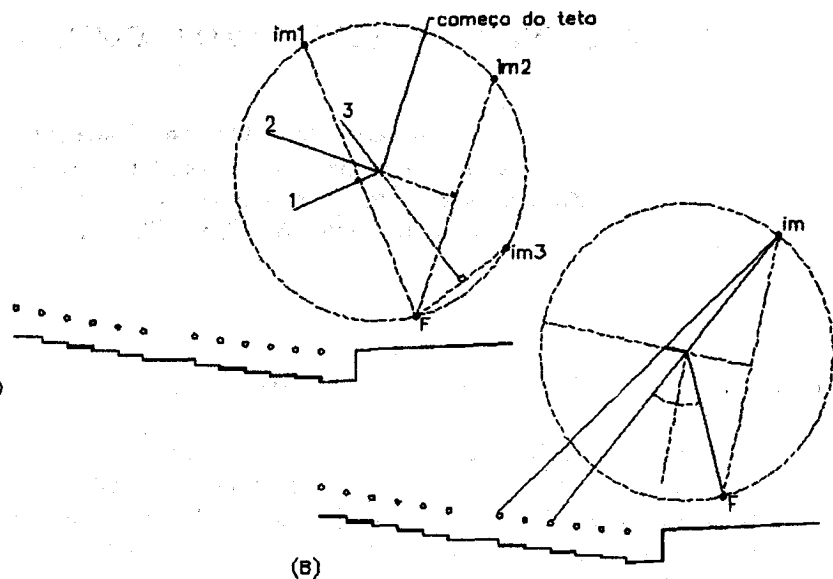


Figura 01. Construção geométrica do desenho de refletores acústicos.

Desse modo podemos controlar o funcionamento de um refletor acústico plano, obtendo maiores ou menores intensidades do som refletido em áreas determinadas da platéia. Resta a tarefa de dimensionar o desenho do teto encurvado de modo a otimizar seu desempenho como refletor da fonte sonora. Figura 01b.

**Um Padrão para a Atuação de um Teto Refletor.** A distribuição do som direto de uma fonte omnidirecional ao longo de uma platéia segue um padrão de intensidade decrescente, inversamente proporcional ao quadrado da distância, conforme a figura 02a. A distribuição ideal seria uniforme, com a mesma intensidade para todos os ouvintes, o que, na prática é impossível de realizar. Teoricamente, esta situação ideal seria obtida compensando a intensidade para os lugares mais distantes até o valor desejado. Na figura 02b demonstramos que esta compensação deve começar no ponto em que a queda do som direto atinge a intensidade que consideramos o mínimo a manter, e que deve crescer num perfil simétrico ao do som direto, em relação a um eixo horizontal com ordenada igual à metade daquela intensidade tomada como mínima.

O resultado da soma das duas curvas, i. e. da soma do som direto com o som refletido no teto, é uma terceira curva que coincide com a do som direto até o início do som refletido. A partir daí, a intensidade sonora se mantém constante no espaço, sendo a queda no som direto compensada exatamente pelo aumento da porção

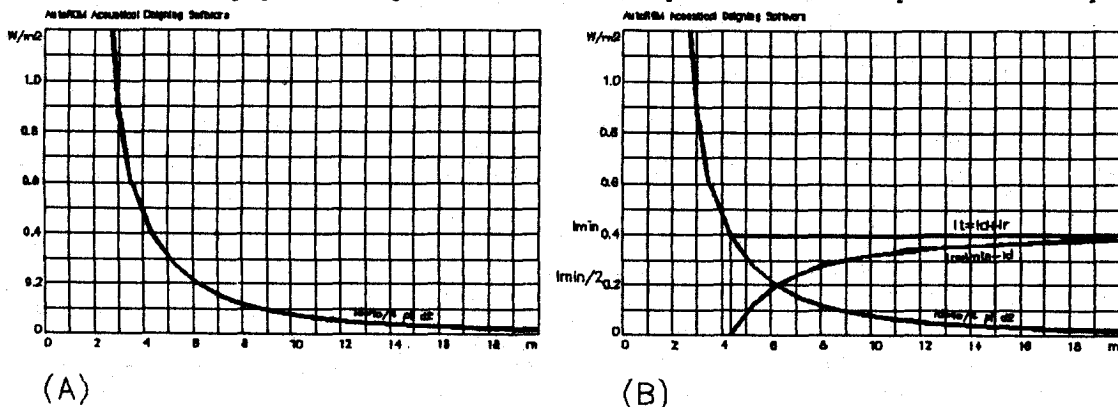


Figura 02. O padrão ideal de compensação do som direto com o som refletido.

refletida. A curvatura ótima para o teto, portanto, seria tal que permitisse o crescimento da intensidade do som refletido na medida em que nos afastássemos da fonte. Se escrevermos que o som direto decai segundo:

$$I_d = I_0 / 4 \pi d^2$$

Podemos então deduzir que o som refletido deve variar como:

$$I_r = I_{\min} - I_0 / 4 \pi d^2$$

Ou seja, para um dado ouvinte:

$$I_r = I_{\min} - I_d$$

O que é bastante sensato: a intensidade do som refletido deve ser a diferença entre a intensidade do som direto e a intensidade mínima para uma boa audição. Onde o som direto for mais intenso que o mínimo indispensável, não há necessidade de som refletido.

**O Desenho do Teto.** Para obter esta distribuição no som refletido com um teto facetado, à medida em que nos afastamos da fonte deve haver mais faces do teto atuando sobre a platéia. O número de faces do teto que atua sobre cada ouvinte deve variar simultaneamente de acordo com a variação no som direto dada pela distância até a fonte; e com a variação no som refletido dada pela distância até as imagens da fonte.

Na figura 03 podemos perceber que as distâncias entre a platéia e as imagens da fonte refletidas no teto aumentam à medida em que o teto se encurva e que as faces se afastam da fonte. Como cada face se comporta como um espelho plano, a distância entre a fonte e a placa se repete entre a placa e a imagem da fonte. Isto nos obriga a considerar a variação na intensidade dos reflexos de cada placa quando determinamos quantos deles devem atuar sobre um ouvinte de modo a complementar o som direto até uma intensidade satisfatória.

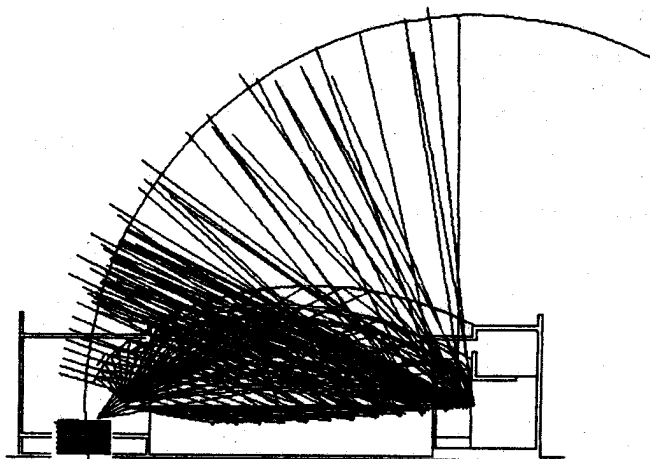


Figura 03. As distâncias ao último ouvinte são aproximadamente uniformes.

Uma forma de quantificar a distribuição do som refletido pela platéia é considerar a posição do último ouvinte. Percebemos, após muitos desenhos de tetos acústicos, que a disposição das imagens guarda uma certa equidistância do último ouvinte. Mesmo com alguma variação perceptível, podemos tomar o último ouvinte como sujeito a reflexos de todas as placas com intensidades muito parecidas entre si.

Isto permite calcular aproximadamente quantas placas devem agir sobre a última fila da platéia dividindo a quantidade de som refletido necessária neste ponto pela intensidade proveniente de uma placa. Todas as placas atuarão sobre a última fila, de modo que o número de faces que atua na última fila é também o número total de faces do teto.

Para a distribuição do efeito das placas sobre o restante da platéia, um caminho seria efetuar o mesmo cálculo para cada uma das outras fileiras, mas este processo ficaria prejudicado pelo fato de que, para as demais fileiras, as distâncias até as imagens variam muito significativamente. Uma alternativa simplificadora é a divisão da extensão longitudinal da platéia em  $N + 1$  porções – onde  $N$  é o número total de placas – fazendo cada placa atuar sobre uma porção a mais que a anterior. Isto resulta em:

- a) todas as placas atuam sobre a última fila da platéia de modo a atingir a intensidade desejada.
- b) nenhuma atua sobre as filas que tenham, apenas com o som direto, a intensidade desejada para o resto da platéia.

c) a área de atuação de cada placa varia acrescentando  $L / (N + 1)$  à área da placa anterior – sendo L a extensão longitudinal da platéia e N o número de placas – a partir da última placa, que fica sobre a última fila.

Desenhando o teto de trás para adiante – a partir da última face – encontraremos um padrão de variação da intensidade sonora muito próximo do desejado: na região da platéia que recebe som refletido a intensidade oscila bem pouco em torno do valor estabelecido como objetivo a atingir.

## DOIS EXEMPLOS DE APLICAÇÃO

**O Auditório CCE-UFES.** Na figura 04, desenhamos um perfil de um teto para uma platéia de 12 fileiras, de modo a tentar um nível constante em todas as fileiras. É o projeto de um auditório, atualmente em fase de detalhamento, para a Universidade Federal do Espírito Santo. É uma pequena sala com capacidade para cerca de duzentas pessoas, destinada principalmente a conferências, e eventualmente atividades teatrais e musicais.

Tendo definidas a posição da fonte sonora, a 1,00m da borda do palco, com 1,20m de altura e a 2,50m do primeiro ouvinte; o primeiro passo no projeto do teto é a marcação de um ponto (A) no fundo da sala para definir a extremidade do teto nesta região. A posição deste ponto segue critérios principalmente arquitetônicos, tais como a liberação de um pé-direito útil no fundo da sala, a desobstrução do funcionamento de cabines de controle ou projeção. Se a última fileira fica encostada na parede de fundo, o teto acaba praticamente em cima do último ouvinte. Mas, se a planta da sala permitir, o teto pode terminar depois da última fila, aproveitando toda a extensão da sala.

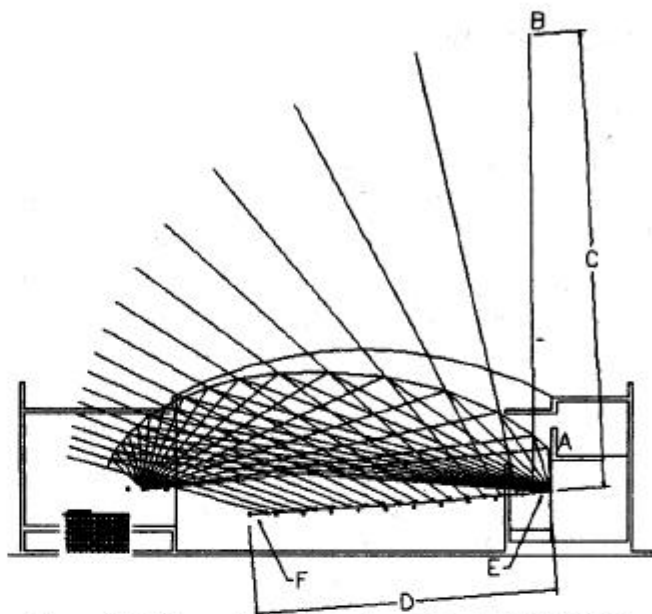


Figura 04. O desenho do teto do auditório CCE-UFES.

Definido o ponto final da seção do teto acústico, ligamos a fonte a este ponto e este ao último ouvinte. Desta forma encontramos, fazendo iguais os ângulos de incidência e de reflexão, a direção da última face do teto e a imagem da fonte refletida nesta última face, de modo a atingir a última fileira da platéia (B).

Se o teto termina mais ou menos sobre a última fileira, esta imagem da fonte fica igualmente em cima desta fileira. Se o teto acaba mais para trás, a imagem se desloca neste sentido. De qualquer forma, nos interessa a distância até esta imagem (C), que definirá, junto com a absorção acústica do material de que é feito o teto, a intensidade sonora do som refletido por esta última face do teto sobre o último ouvinte.

Como dissemos, é possível desenhar o teto de modo a manter as todas as intensidades refletidas sobre este último ouvinte próximas de um valor constante. Assim, esta intensidade que encontramos para o som refletido na última face do teto que acabamos de desenhar será a base para calcularmos quantas imagens devem atuar sobre o último ouvinte e, conseqüentemente, quantas faces deve ter o teto acústico.

O segundo passo é a definição da intensidade mínima a garantir sobre a platéia. Isto pode ser feito utilizando um dado padrão mínimo de intensidade para a audição, ou de atenuação de um determinado tipo de fonte. Neste exemplo, no entanto, faremos de outra forma: vamos tentar uma platéia ideal, em que todos ouçam com a mesma intensidade. Para tanto, estabeleceremos como padrão a atender a intensidade sonora do som direto na primeira fila. Assim, o teto deverá atuar sobre todas as filas, a exceção da primeira.

O terceiro passo é a subtração do som direto na última fila do som direto na primeira, obtendo a intensidade de som refletido que deve atuar sobre a aquela, para igualar a intensidade desta. Depois fazemos a divisão desta intensidade do som refletido necessário na última fileira pela intensidade do som refletido pela última

face do teto, que calculamos no primeiro passo. O resultado é o número de faces do teto ou, o número de imagens que deve atuar sobre a última fileira.

O quarto passo é o desenho de uma linha ligando a primeira à última fileira (D). Em termos ideais, seria uma linha que acompanhasse a curvatura da disposição das fileiras, mas em termos práticos podemos desenhar uma linha reta. Esta linha deverá ser dividida em segmentos de número igual à quantidade de faces do teto definida no terceiro passo, mais um.

O quinto passo é o desenho do teto propriamente dito, a partir da última face, já iniciada. A partir da imagem desta face, já definida no primeiro passo, desenhamos uma linha até o final do segmento da linha desenhada no quarto passo (E), segmento este junto ao último ouvinte. Assim definimos a região de atuação da última face. Ela projeta som refletido sobre este último segmento da extensão da platéia. As demais faces do teto são desenhadas atuando sobre um número crescente de segmentos, cada uma acrescentando um deles à sua área de atuação. Quando desenharmos todas as faces previstas, a mais próxima da fonte – a última que desenhamos – atuará sobre todos os segmentos menos um: aquele mais próximo da primeira fila (F).

Isto garante que a primeira fila não receba som refletido. Quando calculamos a distribuição da intensidade sonora sobre a platéia provocada pelo teto que acabamos de desenhar encontramos valores bastante próximos do desejado; como demonstra o gráfico na figura 04. O som direto no primeiro ouvinte era cerca de  $0.61 \text{ W/m}^2$ , e o som direto na última fila era da ordem de  $0.052 \text{ W/m}^2$ . Como a intensidade do som refletido na última placa era cerca de  $0.034 \text{ W/m}^2$ , encontramos:

$$(0.61 - 0.05) / 0.034 = 16.4 \approx 17 \text{ placas.}$$

A atuação destas 17 placas sobre a platéia propõe uma variação linear na área de atuação das placas, cujo resultado aparece na figura 05. Quase conseguimos a uniformidade, a não ser por uma ligeira variação com um mínimo de  $0.52 \text{ W/m}^2$  no terceiro ouvinte e um máximo de  $0.64 \text{ W/m}^2$  no oitavo. O desvio padrão para os valores do som total em todas as filas é da ordem de  $0.03 \text{ W/m}^2$ , com média em  $0.58 \text{ W/m}^2$ . Poderíamos fazer um julgamento do desempenho deste teto acústico aplicando o critério:

$$QI = Tfa / Tfr (1 + Tfd / Tfa)$$

Fazendo a média  $Tfa = 0.58 \text{ W/m}^2$ ; o desvio  $Tfd = 0.03 \text{ W/m}^2$  e a referência  $Tfr = 0.61 \text{ W/m}^2$  (o primeiro ouvinte), temos:

$$QI = 0.58 / 0.61 (1 + 0.03 / 0.58) = 0.9040$$

A condição ideal seria tal que  $Tfa = Tfr$  e  $Tfd = 0$ , ou seja, todos ouvem como o primeiro. Neste caso  $QI$  ideal seria 1. O valor 0.9040 é uma medida de quanto o teto analisado se aproxima da condição ideal proposta.

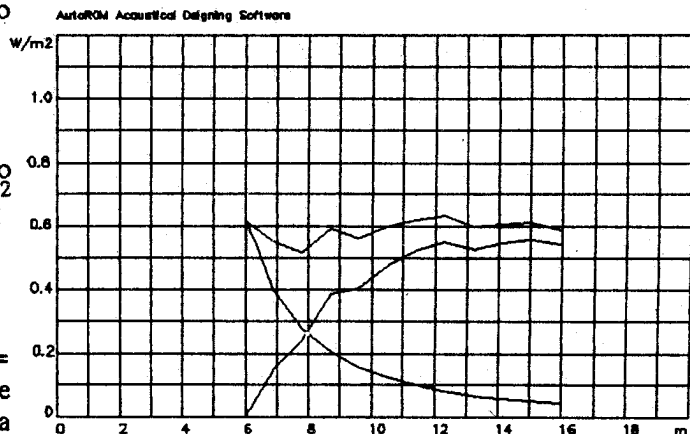


Figura 05. O desempenho do teto da figura 04.

**O Cine-teatro "Broadway".** Esta sala é parte de um estudo para reforma de um cinema em Cachoeiro de Itapemirim, ES; que originalmente possuía cerca de 600 lugares, em uma platéia e um balcão. Devido ao caráter atualmente pouco rentável de uma sala tão grande, foi feito o estudo da divisão do espaço em salas menores, abrigando um cinema, um teatro e um espaço para exposições.

A figura 06 apresenta o projeto, onde podemos ver a localização do novo cinema no balcão do antigo, o aproveitamento do foyer e do espaço abaixo do balcão para um hall e duas salas de exposição, e a construção do teatro na platéia do cinema anterior. A fonte sonora foi localizada sobre o palco, a cerca de 2.00m da borda, ficando a cerca de 3.50m do primeiro ouvinte. O desenho do teto foi feito a partir de um ponto situado a 2.00 m do piso da última fila, junto à parede. Usando como referência a terceira fila da platéia, encontramos a necessidade de nove placas atuando sobre a última fila para igualar o campo total nesta última ao campo direto naquela terceira.

O desenho do teto resultante aparece na mesma figura 06, e os resultados da simulação aparecem na figura 07. Considerando a platéia apenas a partir da terceira fila, encontramos o Índice de Qualidade de 0.9337, com média de  $0.2518 \text{ W/m}^2$  e desvio de  $0.0797 \text{ W/m}^2$ . São resultados compatíveis com os encontrados para a outra sala simulada, que consideramos plenamente satisfatórios. O gráfico permite observar que a intensidade do campo total a partir da terceira fila se mantém praticamente uniforme até o último ouvinte.

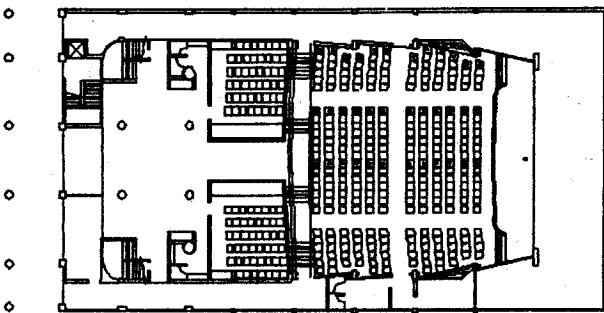
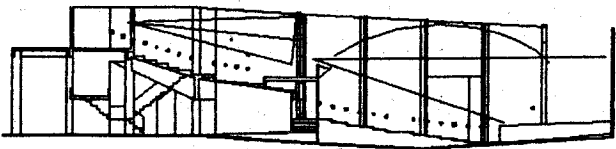


Figura 06. O projeto para o Cine-teatro Broadway.

### CONSIDERAÇÕES FINAIS

É oportuno lembrar que as dimensões assumidas por estas placas acústicas quando desenhadas desta maneira podem resultar num caráter seletivo do teto quanto à frequência. A reflexão sonora só ocorre como estivemos desenhando aqui se as dimensões do refletor tiverem ordem de grandeza maior que o comprimento de onda do som incidente. No sistema decimal de numeração, isto acontece quando o refletor é dez ou mais vezes maior que o comprimento de onda.

Na faixa de 750 a 2000 Hz estão as frequências mais comuns nos sons cotidianos – especialmente na voz – que correspondem a comprimentos de onda entre 0.45 e 0.17 m. Um valor médio para esta faixa seria 0.30 m (1375 Hz), e seria refletido apenas diretamente por placas com mais de 3.00 m. Dimensões menores reduzem a diretividade pelo aumento da difração, até a difusão completa quando o refletor for dez vezes menor que o comprimento de onda (cerca de 3 cm).

No exemplo que descrevemos, as placas resultantes tem entre 1.0 e 1.5 m, o que nos leva a crer que se comportariam como parcialmente diretivas e parcialmente difusoras. Isto impõe a necessidade de considerar uma correção para a intensidade do som refletido, que deve ser menor na faixa de frequências em que o teto atua como difusor.

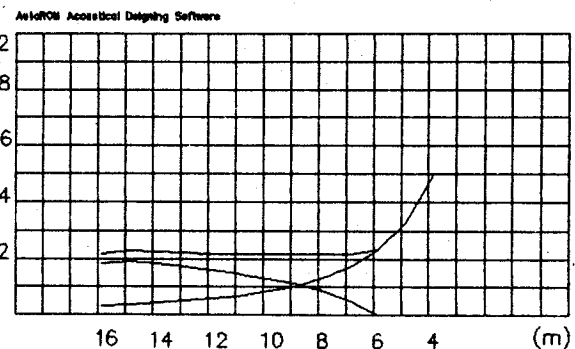


Figura 07. O desempenho do teto do Broadway.

No entanto, a modelagem quantitativa dos padrões de difração é por demais complexa diante de nossos objetivos presentes; ficando, assim, esta ressalva como uma limitação a considerar nos procedimentos que estamos a descrever.

### REFERÊNCIAS

- ANDRADE, T. B., *Edifício Departamental do Centro de Ciências Exatas da UFES*, Projeto de Arquitetura, Vitória, Laboratório de Projetos da UFES, 1994.
- GLÓRIA, P. M., *Reforma do Cine-teatro Broadway*, Projeto de Arquitetura, Cachoeiro de Itapemirim, 1994.
- KNUDSEN, V. O. & HARRIS, C. M., *Acoustical Designing in Architecture*, John Wiley & Sons, New York, 1950.
- NEPOMUCENO, L. X., *Acústica Técnica*, São Paulo, Etegil, 1968.