

CARACTERIZAÇÃO ACÚSTICA DE AUDITÓRIOS UTILIZADOS PARA A FALA QUANTO A INTELIGIBILIDADE DO DISCURSO

Gabriella K. Oliveira (1); E. Felipe Vergara (2)

(1) Arquiteta, Mestranda do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura, gabriella@labcon.ufsc.br

(2) Dr. Eng., Professor do Departamento de Engenharia Mecânica, e.f.vergara@ufsc.br

Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Arquitetura e Urbanismo, Laboratório de Conforto Ambiental, Cx Postal 476, Florianópolis-SC, 88040-900, Tel.: (48) 3721 4974

RESUMO

Uma comunicação falada adequada é de extrema importância em salas de aula, auditórios, aeroportos e ambientes de trabalho em geral, onde mensagens importantes ou de emergência devem ser transmitidas. A avaliação da inteligibilidade da fala em salas por meio do Índice de Transmissão da Fala (STI) tem se tornado um requisito importante da qualidade acústica e se o STI da sala for inferior a 0,45 a inteligibilidade da fala é classificada como fraca. Neste trabalho três auditórios são avaliados, cujo uso principal é a transmissão de informações através da palavra falada. Estes ambientes possuem volumes aproximados, porém com características arquitetônicas (dimensões e acabamentos internos) diferentes. A partir da resposta acústica impulsiva, conforme recomendações da norma ISO 3382 (2009), nestes locais foram determinados experimentalmente o Índice de Transmissão da fala (STI), o tempo de reverberação (TR), o tempo de decaimento inicial (EDT) e a definição (D_{50}). As medições do tempo de reverberação e do ruído de fundo permitiram a quantificação do fator de redução de modulação e consequentemente do STI para contrapor os resultados experimentais e analíticos do Índice de Transmissão da Fala. Os resultados indicam que em média os TR estão entre 0,9 e 1,3 s, os EDT entre 0,9 e 2,5 s e a D_{50} entre 20,2 e 62,9%. O modelo do fator de redução de modulação se mostrou apropriado para calcular o STI já que foram observadas diferenças inferiores a 0,15 e com desvios padrão que não ultrapassam 0,02.

Palavras-chave: inteligibilidade da fala, auditórios, resposta impulsiva, fator de redução da modulação.

ABSTRACT

An adequate speech communication is extremely important in classrooms, auditoriums, airports and general working environment where important messages or emergency should be transmitted. The evaluation of speech intelligibility in rooms through the Speech Transmission Index (STI) have been an important requirement of the acoustic quality and if the room STI is less than 0,45 the intelligibility of speech is classified as poor. In this work three auditoriums are evaluated, in which the main use is the transmission of information through the spoken word. These environments have approximate volumes, but with different architectural characteristics (dimensions and internal finishness). From de acoustic impulsive response, as recommendation by the ISO 3382 (2009) standard, in these places were experimentally determined the Speech Transmission Index (STI), the reverberation time (RT), the early decay time (EDT) and the definition (D_{50}). The measurements about reverberation time and the background noise allowed quantification the modulation reduction factor and consequently the STI value to compare the experimental and analytical results the Speech Transmission Index. The results indicate that on average the TR are between the 0,9 and 1,3 s, the EDT between the 0,9 and 2,5 s, and the D_{50} between 20,2 and 62,9%. The model of the modulation reduction factor proved appropriate to calculate the STI since differences less than 0,15 were found, and standard deviations not exceeding 0,02.

Keywords: speech intelligibility, auditorium, impulsive response, modulation reduction factor.

1. INTRODUÇÃO

A comunicação falada pode ocorrer tanto em locais abertos quanto em fechados, e variar de acordo com as condições da fonte, do receptor e do caminho percorrido pela onda sonora. Em um ambiente fechado, a importância para que esta comunicação aconteça de forma correta e clara é grande, o que justifica a necessidade de se ter uma adequada propagação sonora. A boa qualidade acústica só irá acontecer quando este canal de transmissão conseguir levar a mensagem sonora até o receptor sem grandes alterações das características originais da onda sonora, e isto só é possível quando não há excesso de absorção da energia incidida ou de muitas reflexões no ambiente. Sinteticamente é possível dizer que o critério básico para qualificar a percepção das mensagens orais é que o som seja inteligível, ou seja, que tenha intensidade suficiente para superar o ruído de fundo e que o espectro sonoro seja minimamente alterado para que o som seja reconhecido.

No caso de ambientes como auditórios em que sua principal finalidade é a de transmitir informações importantes para um determinado número de pessoas, Knudsen (1950), Long (2006) e Barron (2010) dizem que o primeiro objetivo para esses locais é a realização das condições para se ter uma boa inteligibilidade da fala. Esta característica significa o quão bem a fala é reconhecida e entendida. Para que isso seja possível devem-se levar em conta alguns fatores, tais como: o tempo de reverberação ótimo, a eliminação de defeitos acústicos como ecos e ecos flutuantes, a maximização da audibilidade na área de audiência, a minimização do nível de pressão sonora do ruído de fundo da sala e, quando necessário, o fornecimento de um sistema de reforço da fala. Todas estas variáveis estão vinculadas ao desempenho acústico dos ambientes e, no caso de auditórios, eles devem ser projetados de modo a aproveitar ao máximo as questões de inteligibilidade da fala e todas as outras variáveis que estão diretamente ligadas como reverberação, definição, clareza e tempo de decaimento inicial.

Um dos parâmetros acústicos objetivos mais conhecidos para medir e simular a inteligibilidade da fala em salas é o índice de transmissão da fala (STI, *Speech Transmission Index*). O índice de transmissão da fala mensura a inteligibilidade do discurso no ambiente considerando a modulação da fala causada principalmente por interferência do ruído de fundo e do tempo de reverberação. Seu resultado varia de 0 (fala ininteligível) a 1 (inteligibilidade perfeita). A norma suíça IEC 60268-16 (2011) apresenta essa classificação de inteligibilidade dividida em cinco faixas de valores que variam de “ruim” a “excelente”, sendo o intervalo central considerado “razoável”, com valores de STI que vão de 0,60 a 0,45. Abaixo disso a inteligibilidade já pode ser considerada fraca.

A respeito das demais variáveis vinculadas à inteligibilidade, o tempo de reverberação é recomendado e analisado conforme o volume de cada ambiente e seu uso, que são aplicados em gráficos de referência apresentados pela norma NBR 12179 (1992) e por Bistafa (2011). No caso dos auditórios, especificamente sobre os que serão estudados nesta pesquisa, os valores de TR ótimo ficam em torno de 0,66 e 0,68 s. O tempo de decaimento inicial, por se tratar da sensação de reverberação de um ambiente, teria como comportamento ideal ser próximo ao desempenho do TR ou inferior a ele. Já a definição tem como classificação adequada valores acima de 65%, em uma faixa que varia de 0 a 100%. (CUSTÓDIO, 2004; TANG, 2008)

Neste trabalho são avaliados três auditórios, onde a principal atividade realizada neles é a transmissão de mensagens importantes através da palavra falada. Situação em que a inteligibilidade do discurso requer atenção para atingir um bom desempenho entre o locutor e o ouvinte.

2. OBJETIVO

O objetivo deste artigo é apresentar os resultados da avaliação do desempenho acústico de três auditórios, onde a principal atividade realizada é a transmissão de informações através da palavra falada, dando ênfase aos critérios de inteligibilidade da fala determinados a partir de parâmetros acústicos relacionados com critérios de qualidade e inteligibilidade. Uma análise comparativa é realizada entre o índice de transmissão da fala (STI) obtido a partir de ensaios experimentais e da expressão que formula o fator de redução da fala, a fim de julgar ser este último um método apropriado para utilização por profissionais da área.

3. MÉTODO

A avaliação do desempenho acústico dos três auditórios é realizada a partir da medição da resposta impulsiva em cada ambiente e da quantificação do índice de transmissão da fala e de parâmetros acústicos relacionados com a inteligibilidade e decaimento da energia sonora.

3.1. Características arquitetônicas dos auditórios

Os três auditórios estudados nesta pesquisa são denominados CJ, SE e TC. Estes três ambientes são locais destinados à transmissão de informações através da palavra falada e possuem volumes aproximados, proporções distintas e com diferentes materiais de revestimento interno.

O auditório CJ está localizado em um segundo pavimento de uma edificação de três andares, afastado de qualquer via de grande movimento que o circundam, e tem suas janelas voltadas para a parte interna do lote. O auditório do SE é uma edificação própria e também está distante de vias de tráfego veicular. Já, o auditório do TC é situado dentro de uma edificação. Porém, ao contrário dos demais auditórios, está localizado bem próximo de uma via de alto fluxo de veículos e suas aberturas também são voltadas para ela. Na tabela 1 são apresentados os dados de cada auditório, com volume, capacidade de uso e relação das dimensões.

Tabela 1 - Características dos auditórios.

Auditório	Volume [m ³]	Capacidade [un]	Relação de dimensões (z:x:y)
CJ	368,1	90	1:2,7:4,7
SE	417,0	120	1:3,9:3,8
TC	394,2	120	1:3,2:4,7

O auditório CJ não possui desníveis ao longo da área de audiência, apenas a diferença de altura do palco que é na medida de 0,23 m. Todo o piso, incluindo o palco, é revestido com carpete que também está presente nas paredes do palco e na parede ao fundo da plateia. O forro é apenas laje de concreto maciço rebocado e pintado, como pode ser visto na Figura 1. As poltronas são com estofamento de tecido poroso, estrutura de poliuretano e prancheta de madeira laminada móvel.

O auditório SE, apresentado na Figura 2, possui um palco de alvenaria. A área de audiência é escalonada com desníveis de aproximadamente 0,12 m para cada degrau. As paredes são de alvenaria convencional e o teto é laje de concreto maciço, ambos são revestidos de reboco liso pintado. As janelas ocupam todo o comprimento das duas paredes laterais do ambiente e são bipartidas em dois vãos com fechamento maxim-ar. O ambiente possui apenas uma porta de acesso, de modelo batente composta de duas folhas de madeira maciça. As poltronas possuem estruturas de poliuretano, assento móvel, revestida de couro e sem pranchetas.

O auditório TC possui desníveis na área de audiência cada um com alturas diferentes. O palco tem diferença de 0,35 m em relação ao nível zero e é de alvenaria. As paredes são de alvenaria convencional, rebocadas e pintadas, a laje é de concreto também rebocado e pintado, e o piso é revestido com cerâmica. As janelas são de alumínio com vidro simples e com película, folhas de correr com abertura basculante acima, e não possuem cortinas. As portas são de madeira maciça com duas folhas batentes e estão localizadas na parede ao fundo do auditório (acesso principal) e na parede lateral do palco. As poltronas são de ferro com estofamento em couro, assento fixo e sem prancheta (Figura 3).



Figura 1 – Vista do palco e da audiência do auditório CJ.



Figura 2 – Vista do palco e da audiência do auditório SE.



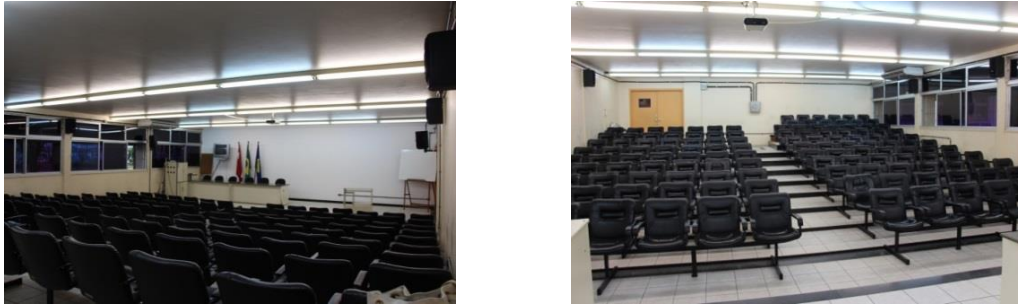


Figura 3 – Vista do palco e da audiência do auditório CT.

3.2. Medição da resposta impulso nos auditórios

Baseando-se nas recomendações da norma ISO 3382-1 (2009) foram obtidos os parâmetros acústicos utilizados para a determinação da qualidade acústica dos auditórios, a partir da sua resposta acústica impulsiva. Os parâmetros acústicos que foram levantados foram o Tempo de Reverberação (TR), o Tempo de Decaimento Inicial (EDT), a Definição (D_{50}) e o Índice de Transmissão da Fala (STI).

O método adotado para a geração do sinal impulsivo nos ambientes foi o estouro de balões gigantes, fabricados de látex, com diâmetro de 46 cm e com capacidade de volume de ar de 55 litros ($0,055 \text{ m}^3$). Os equipamentos utilizados para a captação da resposta impulsiva foram o medidor de pressão sonora SOLO da 01dB, o microfone de precisão de $\frac{1}{2}$ polegada, o calibrador acústico CAL 21 da 01dB (ref.: 1k Hz, 94 dB). O sistema de aquisição consistiu em um computador portátil e o software dBBat32, também responsável pelo pós-processamento dos dados. Para evitar interferência do ruído de fundo na geração de sinal sonoro impulsivo, a ativação do medidor de pressão sonora foi configurada para um nível de disparo de 80 dB.

Durante as medições acústicas em cada auditório avaliado, foram utilizadas seis posições de microfone e uma posição de fonte, a qual foi localizada no centro do palco na altura de 1,5 m do chão. Os microfones foram posicionados a 1,2 m de altura e entre as poltronas, para representar mais fielmente a localização do ouvinte, como mostra a Figura 4. Para cada ponto de receptor foram registradas três leituras para levar em consideração as características aleatórias do sinal da fonte. O medidor de pressão sonora também foi usado para medir os níveis de ruídos de fundo em cada auditório.

Os materiais e objetos encontrados no interior da sala não foram retirados e as cortinas ou persianas, quando haviam, foram fechadas para a realização do experimento. Todas as medições foram realizadas com o ambiente desocupado para que pudesse ser adquiridas características da sala, estando presente apenas três pessoas responsáveis pelo comando dos equipamentos.

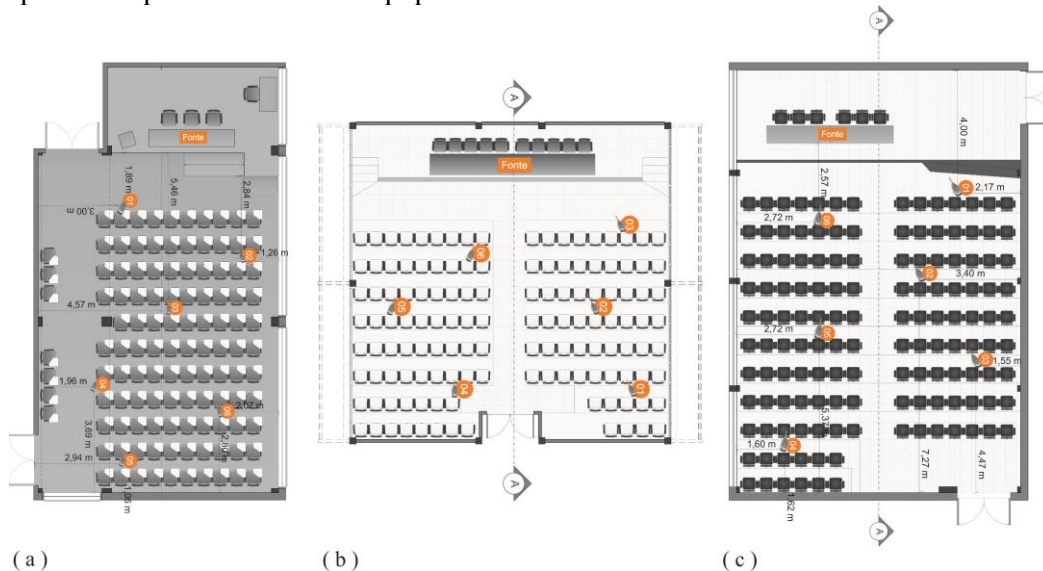


Figura 4 - Posicionamento da fonte e dos receptores dos auditórios CJ (a), SE (b) e CT (c).

3.3. Determinação do STI

O método de cálculo do índice de transmissão da fala (STI) baseia-se no modelo desenvolvido para obter o fator de redução de modulação. Quando um sinal sonoro é transmitido para um ouvinte, ele pode ser alterado pelo ambiente causando redução da inteligibilidade, isso acontece devido ao ruído de fundo e à reverberação no interior do ambiente. À medida que essas interferências vão acontecendo na onda sonora, sua modulação

fica alterada, causando a redução da modulação, caracterizado pelo fator de redução da modulação $m(F_m)$ (Equação 1), que ocorre em função da frequência de modulação F_m . A perda dessa modulação reproduz a perda de modulação da voz falada, e seu valor pode variar de 0 a 1 (100% de redução da modulação). (MÜLLER, 2005)

A norma IEC 60268-16 (2011) especifica que 98 sinais devem ser usados como sinais de entrada determinados através de um ruído de banda larga filtrado em bandas de oitava, com frequências centrais entre 125 Hz a 8000 Hz, o que resulta em sete sinais. Cada um desses sete sinais é multiplicado por quatorze sinais de modulação que resultarão em 98 sinais de saída que comporão a matriz dos índices de modulação.

$$m(F_m) = \frac{I}{\sqrt{I + \left[2 \pi F_m \frac{TR}{13,8}\right]^2}} \cdot \frac{I}{I + 10^{(-0,1L_{S/N})}} \quad \text{Equação 1}$$

A Equação 1 indica que o fator de modulação m depende de duas variáveis mensuráveis e presentes no meio de transmissão, ou seja, a relação sinal-ruído (S/N) que tem em conta o ruído de fundo, e o tempo de reverberação (TR). Vale ressaltar que o ruído de fundo interfere em todas as bandas de frequência enquanto o tempo de reverberação afeta principalmente as bandas de alta frequência, e que F_m tem valores entre 0,63 Hz e 12,5 Hz, em intervalos de terço de oitava, de modo a coincidirem com a fala humana, sendo as frequências de 3 e 4 Hz as que possuem componentes espectrais significativos e nas quais a intensidade da voz é maior (MÜLLER, 2005). O valor global da relação sinal-ruído, ponderado A , é o nível de pressão sonora global da fala menos o nível de pressão sonora global do ruído de fundo, na posição do ouvinte com a sala desocupada.

Long (2006), explica que Houtgast e Steeneken desenvolveram um algoritmo para transformar os valores de m para valores de índice de transmissão da fala (STI). Esse algoritmo é representado na equação 2 e considera a relação sinal-ruído aparente como valor causador da variação do ruído emitido pela fonte. O valor do STI pode variar entre 0 (inteligibilidade nula) e 1 (inteligibilidade total) e em intervalos intermediários apresentados na norma IEC 60268-16 (2011).

$$L_{SNapp} = 10 \log \frac{m}{1 - m} \quad \text{Equação 2}$$

Onde L_{SNapp} representa a relação do sinal-ruído aparente, em dB, e m o fator de redução da modulação.

A partir do somatório dos resultados nas sete bandas de frequências de oitava (125 a 8000 Hz), obtém-se o nível do sinal-ruído aparente médio, em dB, representado na equação 3, e conseqüentemente o STI , conforme equação 4. (LONG, 2006)

$$\overline{L_{SNapp}} = \sum_{i=1}^7 w_i (L_{SNapp})_i \quad \text{Equação 3}$$

$$STI = [\overline{L_{SNapp}} + 15]/30 \quad \text{Equação 4}$$

4. ANÁLISE DE RESULTADOS

4.1. Avaliação dos tempos de reverberação TR e EDT

Na figura 5 está representado o desempenho do tempo de reverberação nos três auditórios estudados. Como primeira análise é possível identificar um comportamento semelhante dos locais, onde nas baixas frequências os valores de TR são mais altos, diminuindo à medida que aumentam as frequências. O auditório CJ é o que possui melhor comportamento sonoro, com TR melhor quando comparado aos valores considerados ideais para o volume da sala, enquanto que os demais, SE e TC são mais reverberantes. Porém, neste caso é necessário ressaltar que os ambientes foram analisados experimentalmente quando desocupados, fator que influencia nos resultados de TR quando comparados aos obtidos quando a sala estiver ocupada. Este fato é comprovado através de um estudo realizado por Cravero et al. (2014) em que concluiu que a absorção sonora influenciada pela presença das pessoas no ambiente diminui cerca de 50% a reverberação do mesmo em bandas de frequências acima de 125 Hz.

Assim, o CJ que aparentemente possui um bom resultado de desempenho, pode se tornar um ambiente muito absorvente quando ocupado, fator que também é prejudicial à inteligibilidade da fala. Os outros dois auditórios tendem a ser menos reverberantes, mas ainda assim ficam fora da marca do TR ideal.

Todos os valores encontrados nas medições experimentais de TR possuem desvios que permanecem na faixa de 0,2 a 0,0, portanto valores mínimos, o que torna os resultados confiáveis.

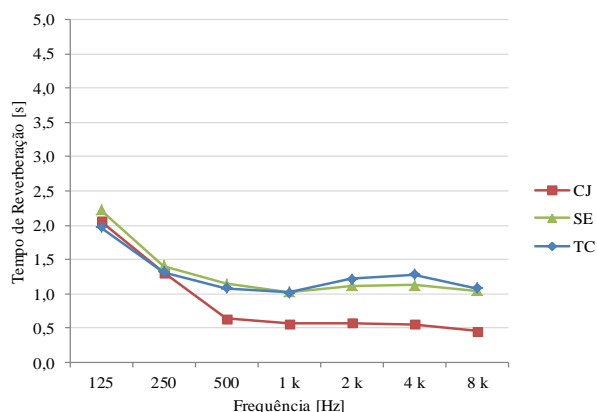


Figura 5 – Gráfico com valores médios de tempo de reverberação (TR) dos auditórios.

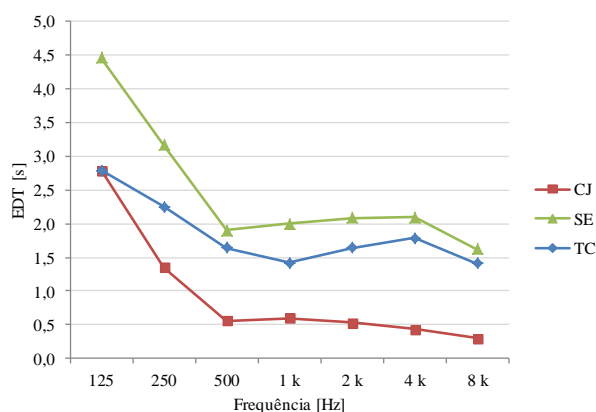


Figura 6 – Gráfico com valores médios de tempo de decaimento inicial (EDT) dos auditórios.

A variável de tempo de decaimento inicial (EDT) está representada na figura 6, e mostra um comportamento geral de que os ambientes, com exceção do CJ, possui sensação de reverberação maior do que o auditório realmente possui fisicamente. Fazendo uma análise relacionada aos materiais de acabamento encontrados nos auditório, o desempenho do CJ pode estar relacionado ao uso de carpetes tanto no piso quanto na parede do fundo, em função de que este material tem maior influência de absorção sonora nas altas frequências, o que justifica a baixa reverberação nesta faixa do espectro.

O auditório SE é o que possui pior desempenho subjetivo com distâncias em valores que variam de 1,8 s em 250 Hz e diminuem a partir de 500 Hz, chegando a 0,6 s em 8 kHz, entre os resultados de TR e EDT. No auditório TC, em 125 Hz, a diferença entre os dois parâmetros é de 1,0 s e 0,3 s em 8000 Hz, sendo também um ambiente que possui alta sensação de reverberação. Tais resultados, tanto físicos quanto subjetivos, quando analisados em função dos materiais de acabamento que são, em geral, de alta reflexão sonora nestes dois auditórios, permite concluir tamanha influência que os revestimentos desempenham na acústica do local.

4.2. Avaliação da Definição D_{50}

Na figura 7 está mostrado o comportamento dos auditórios quanto ao parâmetro de Definição, onde mais uma vez é possível verificar a diferença de resultados obtidos no CJ, único a contemplar o mínimo considerado aceitável de 65%, a partir de 500 Hz, o que é aceitável visto que é a partir dessa faixa frequência que há maior interferência na audibilidade. Os demais auditórios estão bem abaixo desta faixa, com valores médios que variam, a partir de 500 Hz, entre 30,3% e 20,1% no SE e 30,1% e 25,4% no TC.

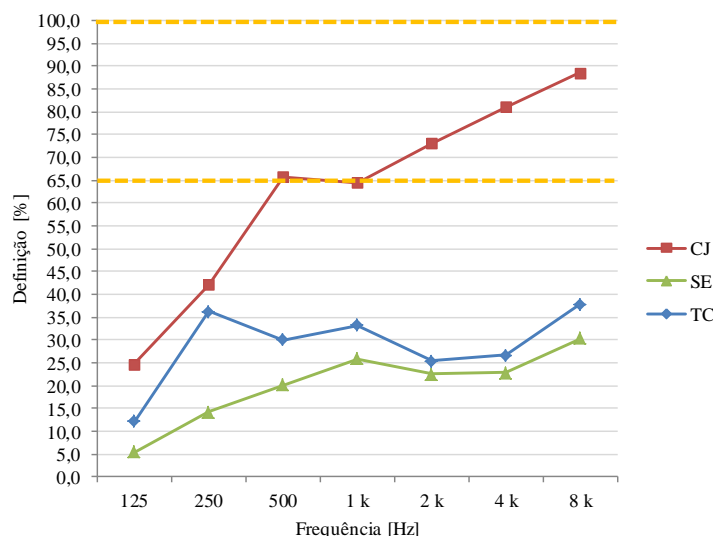


Figura 7 – Gráfico com os valores médios de definição (D_{50}) dos auditórios.

4.3. Avaliação do Índice de Transmissão da Fala (STI)

Realizados os métodos experimental e analítico para obtenção dos valores de STI, é possível enfim analisar o desempenho de cada auditório quanto a sua inteligibilidade do discurso perante o ouvinte. A tabela 2 mostra os resultados desse parâmetro para cada técnica utilizada e em cada ponto de receptor posicionados nos ambientes. Esses resultados também podem ser conferidos graficamente pelas figuras 8, 9 e 10.

Tabela 2 – Resultado de STI para os três auditórios e suas posições de receptores.

STI	Auditório	Posições					
		1	2	3	4	5	6
RI	CJ	0,70	0,68	0,69	0,69	0,70	0,69
m(F _m)		0,62	0,62	0,64	0,61	0,61	0,62
RI	SE	0,43	0,44	0,41	0,40	0,43	0,40
m(F _m)		0,52	0,52	0,52	0,54	0,53	0,51
RI	TC	0,46	0,48	0,48	0,49	0,48	0,47
m(F _m)		0,52	0,52	0,52	0,53	0,52	0,51

Em um primeiro momento é possível realizar a análise de desempenho de acordo com a norma IEC 60268-16 (2011) em que os valores de STI do auditório CJ estão todos na faixa considerada como “bom”, no auditório SE fica entre a faixa “pobre” e “razoável”, já o auditório do TC pertence ao intervalo de “razoável”. Esta é a técnica de análise mais comumente utilizada para essa variável, porém há também a possibilidade de realizar o estudo pela análise por bandas de frequência, situação permitida através do método analítico utilizado.

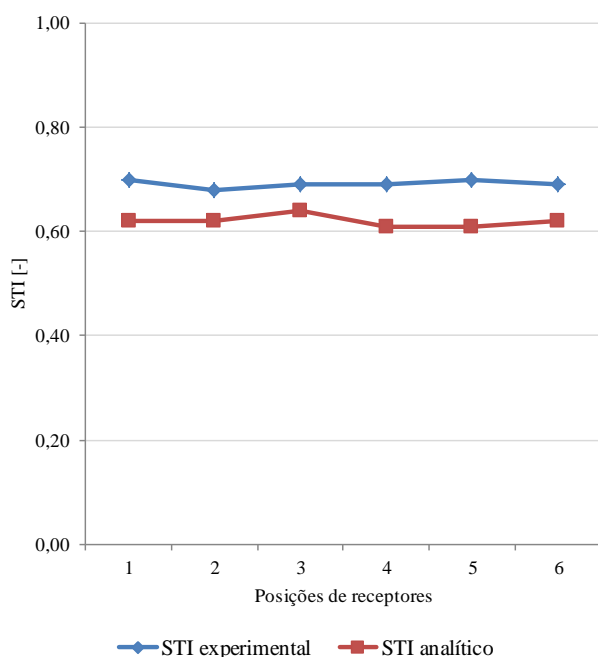


Figura 8 – STI experimental e analítico do auditório do CJ.

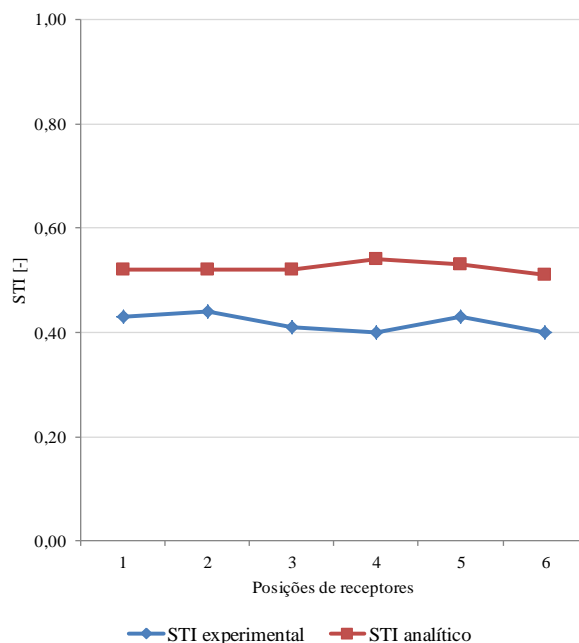


Figura 9 – STI experimental e analítico do auditório do SE.

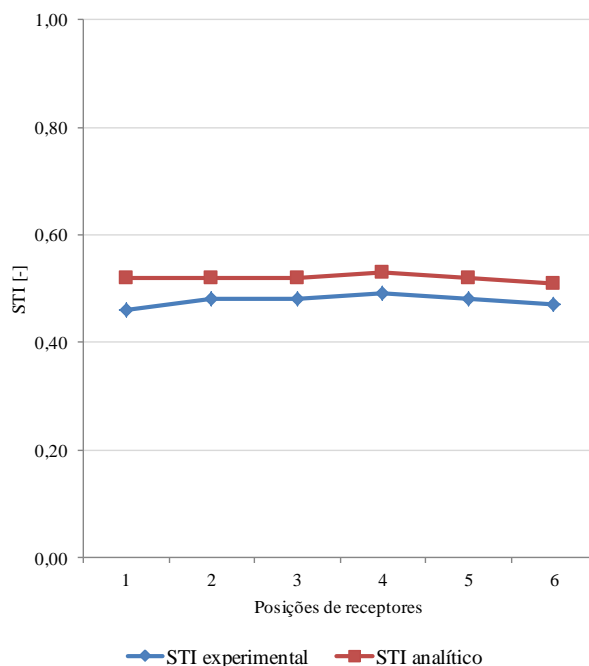


Figura 10 – STI experimental e analítico do auditório do TC.

Essa representação por bandas de frequência é apresentada através da figura 11 (CJ), 12 (SE) e 13 (TC). Nelas são exibidas as curvas de redução da modulação em função das frequências de modulação, que tem influência do tempo de reverberação das salas e da relação sinal-ruído, que agem em conjunto, porém com efeitos diferentes em cada frequência. No caso destes ambientes, os valores das relações sinal-ruído ultrapassam 15 dB, assim, todos eles são fixados em 15 dB, conforme indicado por Hodgson e Nosal (2002) e Muller (2005). Portanto, a análise é realizada apenas com a influência do tempo de reverberação que afeta principalmente as médias e altas frequências, atuando como um filtro passa-baixa no comportamento da redução da modulação. Assim, a interpretação das curvas é feita como um filtro de frequência em que quanto maior for o valor de $m(F_m)$ maior será a seleção das frequências de modulação da fala. Então, mais quantidade de energia sonora da onda original (voz) chega até o ouvinte.

Esta interferência causada pelo tempo de reverberação fica comprovada no momento em que é possível comparar as curvas de $m(F_m)$ com os resultados de TR já mostrados. O auditório CJ, por exemplo, que possui resultados de TR menores, apresenta curvas de redução de modulação, que se comportam semelhantes ao gráfico do TR, no momento em que as duas menores frequências possuem menor $m(F_m)$ e as médias e altas frequências possuem valores maiores, inversamente proporcionais como é identificado na equação 1. Uma análise geral que pode ser realizada, é que para os casos em que o TR é superior a 1,0 segundo, a influência negativa causada no $m(F_m)$ é considerável, enquanto que para os casos em que o TR é igual ou inferior a 1,0 segundo, tanto o $m(F_m)$ quanto o STI possuem resultados melhores.

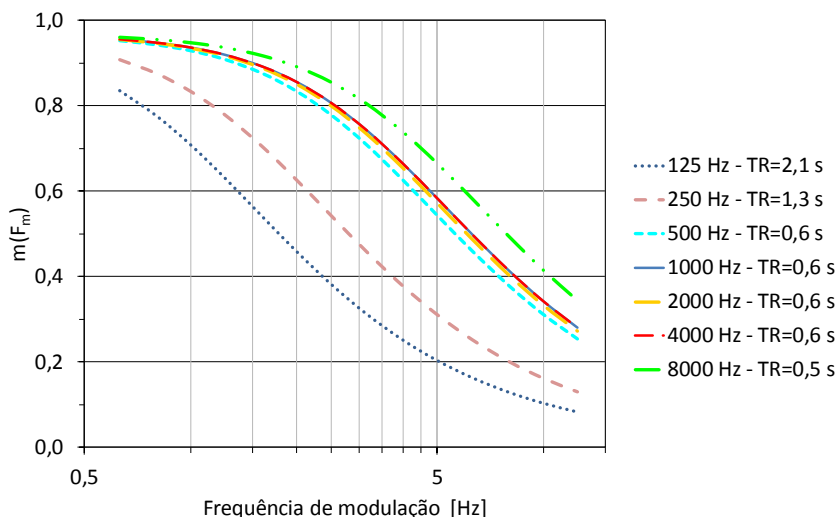


Figura 11 – Fator de redução de modulação do auditório CJ.

O auditório SE (Figura 12) possui resultados de tempo de reverberação acima do ideal e acima de 1,0 segundo, o que resulta em curvas de redução de modulação com valores menores, com apenas as bandas de frequências de 1000 e 8000 Hz atingindo um valor de redução de modulação aceitável para as frequências de modulação da voz de 3 e 4 Hz. No caso do CT (Figura 13) apenas as frequências de 1000, 2000 e 8000 Hz estão dentro da faixa de valores de redução aceitável para as frequências de 3 e 4 Hz. Em comum nestes dois auditórios tem-se o TR médio entre as bandas de frequências de 250 a 4000 Hz, que fica em torno de 0,5 segundos.

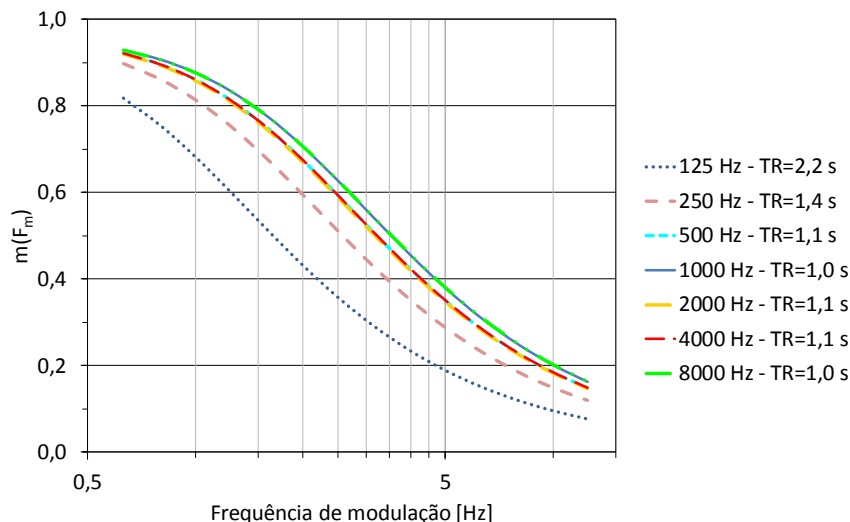


Figura 12 – Fator de redução de modulação do auditório SE.

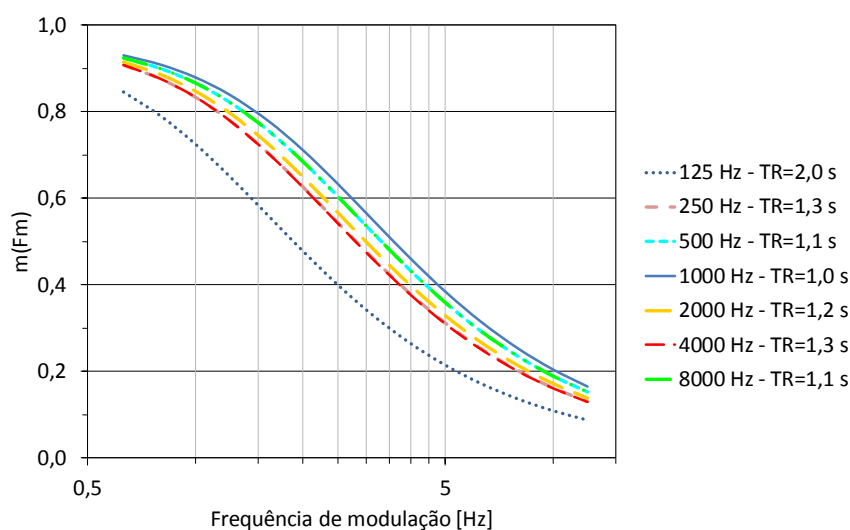


Figura 13 – Fator de redução de modulação do auditório TC.

A partir dos valores de $m(F_m)$, seguindo as etapas de equações do STI tem-se resultados que traduzem os gráficos em valores únicos de inteligibilidade da fala. Com base neles, que possuem valores de desvios padrão que não ultrapassam 0,1, e comparados aos resultados obtidos experimentalmente, fica comprovada a viabilidade de execução do estudo do STI através do método de cálculo, principalmente para aqueles profissionais em que o acesso a equipamentos é limitado.

Por fim, um resumo com os valores médios de cada variável analisada para os três auditórios é apresentado na tabela 3. Nela, mais uma vez, fica evidente que o desempenho acústico do CJ é o melhor entre os três auditórios, seguido do TC e por último do SE.

Tabela 3 – Valores médios dos diferentes parâmetros analisados nos auditórios.

Auditório	TR [s]	EDT [s]	Definição [%]	STI	
				RI	$m(F_m)$
CJ	0,6	0,6	65,2	0,69	0,62
SE	1,1	1,9	23,0	0,42	0,53
TC	1,0	1,5	31,7	0,48	0,52

5. CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos com os primeiros parâmetros analisados experimentalmente, é possível verificar que os auditórios SE e TC são mais reverberantes e com menos definição em relação ao auditório CJ que apresenta melhor comportamento sonoro. Julgando os resultados destes ambientes a partir da inteligibilidade da fala, o desempenho deles se mantém da mesma forma, com o auditório CJ melhor que os auditórios SE e TC. Isto evidencia a interligação existente entre as variáveis, incluindo aqui o ruído de fundo e o nível de pressão sonora da fonte que são traduzidos na relação sinal-ruído.

Assim, é possível alegar que a qualidade acústica dos resultados de um ambiente depende do equilíbrio entre a absorção e a diferença do nível da relação sinal-ruído. Ou seja, quando S/N se mantém adequado (entre 0 dB(A) e 15 dB(A) considerando ouvintes com audição normal), devido à níveis elevados da voz e/ou baixos níveis de ruído de fundo, os resultados são positivos, ou seja, é um comportamento benéfico para a inteligibilidade da fala no ambiente. No entanto, a absorção também deve estar em equilíbrio visto a interferência causada pela reverberação nas curvas de redução de modulação e conseqüentemente nos resultados de STI. Isto acontece porque a absorção atua tanto na redução da reverberação, o que é bom, mas reduz também o nível de S/N, o que é ruim e significativo no desempenho da sala.

Deixando de lado o comportamento dos auditórios e analisando os métodos utilizados, o método analítico, que foi alvo de discussão nesta pesquisa na condição de ser ou não uma ferramenta útil de trabalho para os profissionais da área de arquitetura e engenharia que não possuem equipamentos de medição, mostrou-se apto a ser utilizado. Porém, é válido ressaltar que os resultados gerados por ele, apesar de muito próximos aos resultados do método experimental e com desvio padrão não superior a 0,1, não possuem precisão total em função de que variáveis importantes na acústica de sala não são consideradas como, por exemplo, a forma geométrica do ambiente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12179 - Tratamento acústico em recintos fechados**. Brasil, 1992.
- BARRON, M. **Auditorium acoustics and architectural design**. Second Edition. New York: Spon Press, 2010.
- BISTAFA, S. R. **Acústica aplicada ao controle do ruído**. 2ª edição. São Paulo: Edgard Blücher, 2011.
- CRAVERO, G. A. et al. **Análisis de parámetros acústicos de recintos para dos condiciones de ocupación : estudio de caso de un aula universitaria**. VIII Congreso Ibero-americano de Acústica. **Anais...**2014
- CUSTÓDIO, M. F. **Qualidade Sonora através da Modelagem Numérica e Ensaios Experimentais no Centro de Convenções “Centro Sul” de Florianópolis-SC**. [s.l.] Universidade Federal de Santa Catarina, 2004.
- HODGSON, M.; NOSAL, E.-M. Effect of noise and occupancy on optimal reverberation times for speech intelligibility in classrooms. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 111, n. 2, p. 931, 2002.
- IEC, I. E. C. **IEC 60268-16: International Standard: Sound system equipment - Part 16: Objective rating of speech intelligibility by speech transmission index**. Suíça, 2011.
- INTERNACIONAL STANDARD. **ISO 3382-1:2009 - Acoustics - Measurement of room acoustic parameters - Part 1: Performance spaces**, 2009.
- KNUDSEN, V. O. **Acoustical designing in architecture**. New York: J. Wiley, 1950.
- LONG, M. **Architectural Acoustics**. California, USA: Elsevier Academic Press, 2006.
- MÜLLER, S. **Medir o STI**. Campinas: 2005
- TANG, S. K. Speech related acoustical parameters in classrooms and their relationships. **Applied Acoustics**, v. 69, n. 12, p. 1318–1331, dez. 2008.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a CAPES pelo apoio financeiro concedido no período de execução desta pesquisa.