
CAPÍTULO III

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.

O objetivo deste capítulo é o de apresentar a fundamentação teórica necessária para que os conceitos principais da acústica arquitetônica fiquem inseridos dentro da forma em que se deve fazer a caracterização de uma sala de aula.

Portanto, além de definir os conceitos deve ficar claro também que, para caracterizar a qualidade acústica de uma sala de aula, existem parâmetros bem definidos, como:

- Nível de Pressão Sonora;
- Ruído de Fundo;
- Tempo de Reverberação;
- Inteligibilidade da Fala; e
- Relação Sinal/Ruído.

3.1 DEFINIÇÕES PRÉVIAS

Para a concepção de como uma sala de aula deve ser projetada, tem-se a necessidade de descrever previamente alguns conceitos que permitam entender as propriedades básicas do som.

Entende-se por **Som** a uma alteração física num meio, que pode ser sólido, líquido ou gasoso, a qual pode ser percebida pelo ouvido humano. Para que estas perturbações possam propagar-se através do meio, é necessário que o mesmo tenha inércia e elasticidade.

Em geral, o som se irradia em ondas para todas as direções a partir de uma fonte, até encontrar obstáculos como paredes ou tetos.

Duas características dessas ondas sonoras são de interesse particular para a acústica arquitetônica: intensidade e frequência.

Intensidade Sonora é uma medida física de uma onda sonora, relacionada com quão forte o som é percebido.

Também pode-se medir a **Frequência** de uma onda sonora a qual é percebida como tom. Se o som tem apenas uma frequência é chamada de tom puro, mas muitos sons do dia a dia, como a fala, música e ruído, são sons complexos compostos por uma mistura de frequências diferentes.

A importância da frequência surge quando a onda sonora encontra uma superfície: o som reagirá diferentemente em frequências distintas. Os seres humanos estão mais sujeitos a serem incomodados por ruídos de média e alta frequência, especialmente por tons puros.

Quando o som incide sobre uma superfície, vários fenômenos podem acontecer:

- **Transmissão:** O som é transmitido através de uma superfície, de um lado para outro, ao fazê-la vibrar;
- **Absorção:** As superfícies dissipam a energia sonora, transformando-a em calor;
- **Reflexão:** O som incidente em uma superfície pode ser refletido de forma especular ou difusa.

Os fenômenos acima descritos podem ocorrer simultaneamente. Por exemplo, uma onda sonora pode ao mesmo tempo ser refletida e absorvida por uma parede, conforme mostrado na Fig. 3.1, onde podem ser definidos os coeficientes de absorção α , de reflexão r e de transmissão τ , conforme abaixo:

$$\alpha = \frac{\text{Energia Absorvida}}{\text{Energia Incidente}}, \quad (3.1)$$

$$r = \frac{\text{Energia Refletida}}{\text{Energia Incidente}}, \quad (3.2)$$

$$\tau = \frac{\text{Energia Transmitida}}{\text{Energia Incidente}}. \quad (3.3)$$

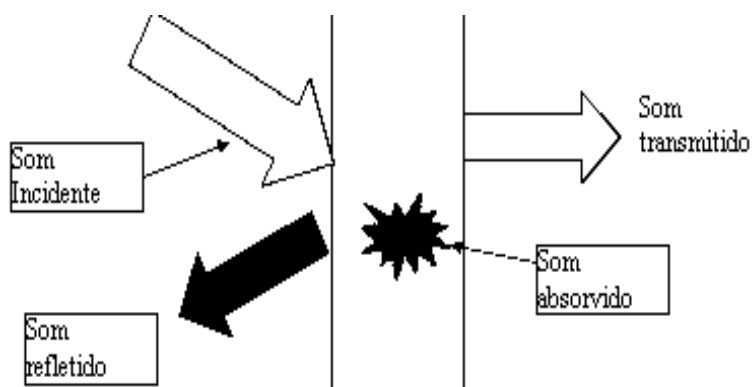


Figura 3.1- Esquema da divisão da energia sonora de uma onda ao encontrar um obstáculo (FERNENDEZ, 2002).

Como resultado, a onda refletida pode não ser tão intensa como a onda inicial. As frequências do som também fazem diferença, pois muitas superfícies absorvem sons de altas frequências e refletem sons de baixas frequências com maior facilidade.

Eco: O Eco é uma consequência imediata da reflexão sonora. Define-se eco como a repetição de um som que chega ao ouvido por reflexão 1/15 de segundo ou mais depois do som direto. Considerando-se a velocidade do som em 343 m/s, o objeto que causa essa reflexão no som deve estar a uma distância de 24 m ou mais.

Ondas Estacionárias: é um fenômeno que ocorre em recintos fechados. Consiste na superposição de duas ondas de igual frequência que se propagam em sentidos opostos. Ao se sobreporem, a coincidência dos comprimentos de onda faz com que os nós e os ventres ocupem alternadamente as mesmas posições, produzindo a impressão de uma **onda estacionária**. Em locais fechados o som refletido entre paredes paralelas pode criar esse efeito, causando graves problemas acústicos para o ambiente.

Eco Palpitante (*Flutter Echo*): ocorre devido à capacidade do ouvido humano de perceber com muita facilidade a ocorrência de sons com grande periodicidade, situação esta que acontece frequentemente em locais com superfícies refletoras e paralelas, mesmo quando a distância entre tais superfícies é menor que aquela descrita como necessária para a

ocorrência de um Eco. Nestes casos, o eco palpitante produzirá a sensação de um “som de campainha”.

3.2 NÍVEL DE PRESSÃO SONORA

A energia sonora total presente em qualquer ponto de uma sala se obtém como a soma de uma energia de valor variável, que depende da localização do ponto, e outra de valor constante. Supõe-se que a causa é uma fonte sonora de diretividade conhecida e com uma potência acústica bem definida.

A energia de valor variável corresponde ao som direto e diminui à medida que o receptor se afasta da fonte. A energia de valor constante está associada ao som indireto, ou refletido. O fato de tal energia não depender do ponto em consideração provém da aplicação da teoria estatística a todo som refletido e, em consequência, de tratar por igual todas as reflexões, sejam precoces ou tardias. Esta hipótese leva a resultados evidentemente aproximados, embora apresente a vantagem da simplicidade de cálculo da energia total.

Geralmente não se trabalha em termos de energia, mas sim de Nível de Pressão Sonora (NPS) o qual é totalmente equivalente, desde que se conheçam as características do campo acústico, além da distância da fonte ao receptor. Isto se deve ao fato de que, na prática, o NPS é facilmente medido. Portanto, a pressão sonora total em um ponto qualquer de um recinto obtém-se a partir da contribuição das pressões do som direto e do som refletido.

3.2.1 Campo Direto

A zona onde predomina o som direto se denomina zona de campo direto. A esta zona pertencem os pontos, mais próximos à fonte sonora e nela o NPS, chamado de nível de campo direto L_D , diminui 6 dB cada vez que se dobra a distância da fonte. É como se o receptor (aluno) estivesse localizado no espaço livre.

3.2.2 Campo Reverberante

A zona onde predomina o som refletido (também denominado som reverberante) recebe o nome de zona de campo reverberante. A ela pertencem os pontos mais afastados da

fonte sonora. Nesta zona o NPS, denominado nível de campo reverberante L_R , permanece constante.

A distância para a qual $L_D = L_R$ se denomina distância crítica, D_C .

Assim, diante do acima colocado, a energia radiada por uma fonte sonora em um ambiente fechado chega ao ouvinte localizado em um ponto qualquer deste, de duas formas diferentes: uma parte da energia chega de forma direta (som direto), como se a fonte e receptor estivessem no espaço livre. No entanto, a outra parte chega de forma indireta (som refletido), associada às sucessivas reflexões que sofre a onda sonora quando incide sobre as diferentes superfícies do recinto (sala de aula).

Em um ponto qualquer da sala de aula, a energia correspondente ao som direto, depende exclusivamente da distância da fonte sonora. No entanto, a energia associada a cada reflexão depende do caminho percorrido pelo raio sonoro, assim como do grau de absorção acústica dos materiais usados como revestimentos das superfícies implicadas. Logicamente, quanto maior for a distância percorrida e mais absorvente forem os materiais usados, menor será a energia associada, tanto ao som direto quanto às sucessivas reflexões (CARRION, 2001).

3.2.3 Medição

A medição dos Níveis de Pressão Sonora são a principal atividade para avaliação dos problemas do ruído em um ambiente. A norma NBR 10151 especifica um método para medição de ruído. O método de avaliação envolve as medições do nível de pressão sonora equivalente (L_{Aeq}), em decibels ponderados em “A”, comumente chamado dB(A). Por outro lado, devem ser seguidos os seguintes procedimentos de medição no interior de edificações:

- As medições em ambientes internos devem ser efetuadas a uma distância de no mínimo 1 m de quaisquer superfícies como paredes, tetos, pisos e móveis;
- Os níveis de pressão sonora em interiores devem ser o resultado da média aritmética dos valores medidos em pelo menos 3 posições distintas, sempre que possível afastadas entre si de pelo menos 0,5 m;

- As medições devem ser efetuadas nas condições de utilização normal do ambiente, isto é com as janelas abertas ou fechadas de acordo com o objetivo de interesse.

3.2.4 Legislação

Na ausência de Lei Orgânica do Município e do planejamento por zoneamento, a referência passa a ser as Normas Técnicas NBR 10151 e NBR 10152, seguindo as resoluções do CONAMA, as quais fornecem dados de acordo com as tabelas 3.1 e 3.2.

Tabela 3.1 - Nível de Critério de Avaliação para Ambientes Externos em dB(A).

TIPOS DE ÁREAS	DIURNO	NOTURNO
Área estritamente residencial urbana, de hospitais ou escolas	50	45

Fonte: NBR 10151

Tabela 3.2 - Valores de Nível Sonoro para Conforto em dB(A).

LOCAIS - ESCOLAS	dB(A)
Salas de Aula, laboratórios	40-50
Circulação	45-55

Fonte: NBR 10152

De acordo com as diferentes propostas uma sala de aula com condições acústicas satisfatórias, deve apresentar níveis de pressão sonora menor de 30 dB(A). Na tabela 3.3 podem-se observar os valores estabelecidos por diferentes países para os diferentes parâmetros.

3.3 RUÍDO DE FUNDO

O ruído de fundo ou ruído ambiente pode ser considerado como todo aquele ruído existente em um determinado local que não diz respeito ao objeto de apreciação ou medição. Para o caso de escolas, e mais especificamente salas de aula, o ruído de fundo é todo aquele ruído além da voz do professor (LOSSO, 2003).

Tabela 3.3-Legislações internacionais nos parâmetros de qualidade acústica em Salas de Aula

PAIS	RUIDO AMBIENTE dB(A)	TR	OBSERVAÇÕES
Brasil (NBR 10152)	35-45		Biblioteca
	40-45		Salas de Aula, Laboratórios
Portugal (Lei 251/ 87)	35	1	(125Hz - 250Hz)
	35	0,6-0,8	(500Hz- 4KHz)
Reino Unido (BB 87)	40	0,5-0,8	Aulas Expositivas
	45	0,5-0,8	Aulas Práticas
Reino Unido (BS 8205)	40	0,5	Aulas Expositivas < 1000m
	45	1	Aulas práticas < 1000m
Alemanha (DIN 4109)	30		
EUA (ASHA)	30	0,4	S/R ≥ 15dB(A)
EUA (ASHARAE)	45		
EUA (ANSI)	35	0,6-0,7	S/R ≥ 15dB(A)
Suécia (BBR 94)	30(L _{eq})		
Finlândia	35	0,6-0,9	
Turquia	45(L _{eq})		
OMS	35	0,6	Inteligibilidade em salas de A
Italia	36	0,5-0,2	Depende da frequência [Hz] e do volume [m ³] da sala
França	38(L _{eq})	0,4-0,8	≤ 250 m ³
		0,6-0,12	> 250 m ³
Belgica	30-45 (L _{eq})		

Fonte: VIVEIROS (2002)

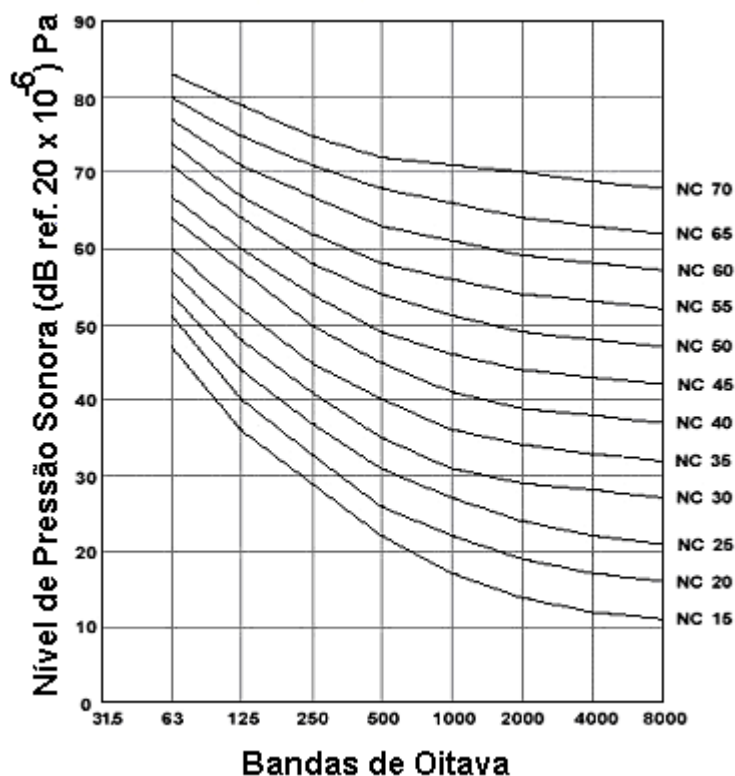
3.3.1 Curvas NC

Para a avaliação do grau de perturbação que um determinado ruído de fundo provoca sobre um ouvinte deve-se fazer a comparação dos níveis de ruído existentes nas salas para cada banda de oitava compreendida entre as frequências de 63 Hz e 8 kHz com um conjunto de curvas de referência denominadas NC, conforme mostradas na Fig. 3.2.

As **curvas NC** são utilizadas para estabelecer os níveis de Classe recomendados para diferentes tipos de espaços em função de seu uso, de acordo com o estabelecido na Tabela 3.4.

As curvas NC seguem, de forma aproximada, a evolução da sensibilidade do ouvido em função da frequência. Isto significa que, para uma determinada curva NC, os níveis de NPS máximos permitidos a baixas frequências (sons graves) são sempre mais elevados que os

correspondentes a frequências altas (sons agudos), já que o ouvido é menos sensível à medida que a frequência considerada é menor.



Figuras 3.2 - Curvas de Critério de Ruído NC.

3.3.2 Legislação

A norma NBR 10152 considera para Salas de Aula que o NC deve estar entre as curvas NC 35 e NC 45 como mostrado na tabela 3.4. Diz-se que um ambiente cumpre uma determinada especificação NC, quando os níveis de ruído de fundo, medidos por bandas de oitava, estão abaixo da curva NC correspondente, para todas as frequências compreendidas entre 63 Hz e 8 kHz.

Tabela 3.4-Níveis de Pressão Sonora para Conforto.

LOCAIS	dB(A)	Curvas NC
Hospitais		
Apartamentos, Enfermarias, Berçários, Centros Cirúrgicos	35 - 45	30 - 40
Laboratórios, Áreas para uso público	40 - 50	35 - 45
Serviços	45 - 55	40 - 50
Escolas		
Bibliotecas, Salas de música, Salas de desenho	35 - 45	30 - 40
Salas de aula, Laboratórios	40 - 50	35 - 45
Circulação	45 - 55	40 - 50
Hotéis		
Apartamentos	35 - 45	30 - 40
Restaurantes, Salas de estar	40 - 50	35 - 45
Portaria, Recepção, Circulação	45 - 55	40 - 50
Residências		
Dormitórios	35 - 45	30 - 40
Salas de estar	40 - 50	35 - 45
Auditórios		
Salas de concerto, Teatros	30 - 40	25 - 30
Salas de Conferências, Cinemas, Salas de uso múltiplo	35 - 45	30 - 35
Restaurantes	40 - 50	35 - 45
Escritórios		
Salas de reunião	30 - 40	25 - 35
Salas de gerência, Salas de projetos e de administração	35 - 45	30 - 40
Salas de computadores	45 - 65	40 - 60
Salas de mecanografia	50 - 60	45 - 55
Igrejas e Templos	40 - 50	35 - 45
Locais para esportes		
Pavilhões fechados para espetáculos e ativ. esportivas	45 - 60	40 - 55

Fonte NBR 10152

Em cada caso, o cumprimento da especificação NC supõe o primeiro passo para se conseguir um conforto acústico e um grau de inteligibilidade adequado (CARRION, 2001).

Para fazer uma análise das condições de viabilidade do desempenho acústico das salas de aula são consultadas as condições de conforto de $NPS_{(médio)}$ e NC, pois representam o nível sonoro de conforto. Os valores de conforto de $NPS_{(médio)}$ são os parâmetros fundamentais para a classificação, sendo as frequências associadas a estes valores de grande importância para o dimensionamento do isolamento acústico, pois representam uma referência de valores críticos a serem evitados (BERTOLLI, 2001).

3.4 TEMPO DE REVERBERAÇÃO

O tempo de reverberação é uma importante característica de ambientes fechados, usado para determinar o quão rapidamente o som decai numa sala.

Para determinar o tempo ótimo de reverberação tem-se a Norma NBR 12179 - Tratamento Acústico em Recintos Fechados, que indica o valor ideal de acordo com o volume dos ambientes e as atividades neles desenvolvidas.

De acordo com o Comitê Técnico em Acústica Arquitetônica da Sociedade Americana de Acústica, o tempo de reverberação para Salas de Aula deve estar na faixa de 0,4 a 0,6 s. O tempo máximo de reverberação para se atingir a inteligibilidade verbal numa sala de aula típica é $TR = 0,5$ s (SEEP et al., 2000).

3.4.1 Valores Recomendados de Tempo de Reverberação

Habitualmente, quando se estabelece um único valor recomendado de TR para um dado recinto, costuma-se fazer referência ao obtido como sendo a média aritmética dos valores correspondentes às bandas de 500 Hz e 1 kHz, que é representado por $TR_{médio}$.

Em geral, o valor mais adequado de TR depende tanto do volume do recinto como da atividade a ser realizada nesse ambiente. Por exemplo, como se trata de salas destinadas à palavra, é conveniente que os valores de TR sejam baixos, com o objetivo de se conseguir uma boa inteligibilidade. Entretanto, no caso de salas de concertos são recomendáveis valores apreciavelmente mais elevados, a fim de que a audição musical resulte ótima. A Fig. 3.3 mostra os valores de TR indicados para ambientes distintos.

3.4.2 Cálculo do Tempo de Reverberação

Existem fórmulas distintas para o cálculo teórico do TR. Entretanto, a fórmula clássica por excelência, e aceita como de referência em nível internacional por sua facilidade de cálculo, é denominada fórmula de Sabine, cuja expressão matemática, obtida aplicando a teoria acústica estatística, negligenciando o efeito da absorção produzida pelo ar, é a seguinte:

$$TR = 0,161 \frac{V}{A} \quad (3.4)$$

onde, V é o volume do recinto (em m^3) e A_{tot} é a absorção total do recinto em sabines.

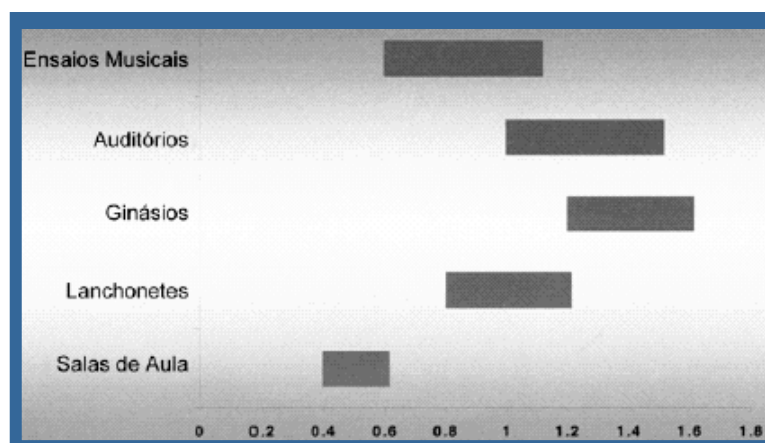
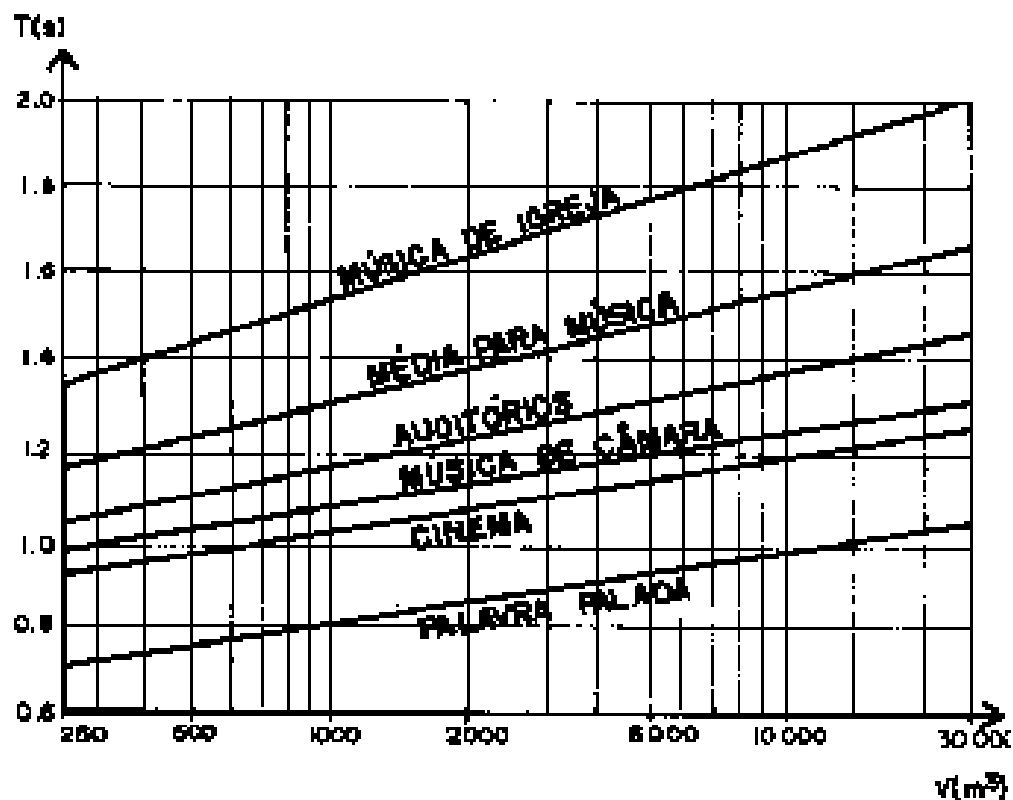


Figura 3.3 – Tempos de Reverberação Recomendados.

O grau de absorção do som de um material qualquer é representado pelo coeficiente de absorção sonora α , o qual é definido como a relação entre a energia absorvida pelo material e a energia incidente sobre ele, conforme a eq. (3.1).

O valor de α está diretamente relacionado com as propriedades físicas do material e varia com a frequência, assumindo valores entre 0 (para material totalmente refletivo) e 1 (para material com absorção sonora total).

O parâmetro A (absorção) de um material qualquer é obtido como resultado de se multiplicar o coeficiente de absorção α pela área S de sua superfície. A unidade de absorção é o sabine (1 sabin corresponde à absorção de 1 m² de janela aberta).

Finalmente, uma vez que um recinto é constituído por distintas superfícies recobertas de materiais diversos, se define a absorção total A_{tot} como a soma de todas as absorções individuais, ou seja:

$$A_{tot} = \alpha_1 S_1 + \alpha_2 S_2 + \dots + \alpha_n S_n \quad (3.5)$$

A partir de A é possível calcular o coeficiente médio de absorção α_m , dividindo a absorção total A_{tot} pela superfície total do recinto S_t :

$$\alpha_m = \frac{A_{tot}}{S_{tot}} \quad (3.6)$$

O TR calculado a cada frequência de interesse mediante a fórmula de Sabine não leva em conta a localização do receptor, uma vez que a mesma surge exclusivamente da aplicação da acústica estatística.

Por outro lado, é preciso comentar que, apesar da utilização universal desta fórmula, sua validade se circunscreve ao caso de recintos com as seguintes características (CARRION, 2001):

- Decaimento energético exponencial associado a um campo sonoro perfeitamente difuso (a energia se propaga com a mesma probabilidade em todas as direções);
- Sala com geometria irregular;
- Coeficiente médio de absorção α inferior a, aproximadamente, 0,2

Fórmula de Eyring:

Eyring verificou uma falha na fórmula de Sabine, que consiste no fato de que, quando o $\alpha_{sab} = 1$, ou seja, a absorção do ambiente é total, o TR não é nulo, propondo a seguinte expressão para o TR (BISTAFA e BRADLEY, 2000):

$$TR = \frac{-0,16V}{S \cdot \ln(1 - \alpha_m)} \quad (3.7)$$

onde S é a área total das paredes do ambiente e α_m é dado por:

$$\alpha_m = \frac{\sum_{i=1}^n S_i a_i}{S} \quad (3.8)$$

Comparação entre as duas formulações

A fórmula de Sabine deve ser usada quando:

- O coeficiente médio de absorção for baixo (menor que 0,2);
- Os materiais absorventes estejam distribuídos uniformemente;
- Os coeficientes de absorção não são precisos;
- Não se exige grande precisão nos cálculos.

A fórmula de Eyring deve ser usada quando:

- Os materiais absorventes estejam distribuídos uniformemente;
- Se conhece com exatidão os coeficientes de absorção;
- Se exige cálculo preciso do tempo de reverberação.

Embora o TR seja um parâmetro fundamental no projeto acústico de recintos, na prática se utiliza uma série de parâmetros complementares fundamentados na acústica geométrica e que dependem da situação do receptor. A otimização de todos eles na fase de projeto permite garantir com um elevado grau de confiabilidade a obtenção de uma acústica adequada, uma vez construído o recinto.

Um dos requisitos básicos para conseguir um bom conforto e uma boa inteligibilidade da palavra é que o nível de campo reverberante L_R seja suficientemente baixo.

Se o espaço objeto de estudo tem um grande volume e/ou está pouco, ou nulamente, tratado com materiais absorventes (espaço excessivamente ‘vivo’), o nível do campo reverberante resultará muito alto, já que o tempo de reverberação do mesmo será demasiado elevado, o que significa que a distância crítica D_C será pequena. Assim, afastando-se da fonte sonora facilmente se adentra a zona de campo reverberante onde a inteligibilidade da fala não é boa.

No caso de salas de conferências e salas de aulas, o valor de TR recomendado, considerando volumes situados entre 100 e 10.000 m³ se encontrara entre: $0.7 \leq TR \leq 1s$.

É conveniente também que a variação de tal valor em função do grau de ocupação da sala seja o menor possível, com o objetivo de que suas características acústicas não dependam do número de pessoas presentes em cada caso.

O tempo de reverberação longo é uma deficiência comum de salas de aula, porém há como resolver o problema. Idealmente, salas de aula devem ter TR na faixa de 0,4 - 0,6 s, entretanto, muitas salas de aula têm TR de 1 s ou mais.

Existem duas maneiras de reduzir o TR de uma sala: reduzindo o volume ou aumentando a absorção sonora da sala. Entretanto, reduzir o volume não é só uma opção, e sim uma alternativa desejável para muitas salas de aulas antigas com tetos altos.

Finalmente, é conveniente que o tempo de reverberação permaneça o mais constante possível com relação à frequência, especialmente às frequências baixas (bandas de oitava centradas em 125 e 250 Hz, já que um aumento de reverberação em baixa frequência produz um resultado não favorável do grau de inteligibilidade da palavra). Por outro lado, a partir da banda de oitava centrada em 2 kHz, existe uma diminuição inevitável dos valores do tempo de reverberação devido à absorção produzida pelo ar. Tal diminuição se faz particularmente perceptível quando se trata de espaços grandes.

3.5 INTELIGIBILIDADE DA FALA

O conceito de inteligibilidade é bastante genérico, podendo ser definido como a razão pela qual se entendem os sons.

A inteligibilidade pode ser aplicada à linguagem (palavra articulada), ao canto, às notas musicais, ou até a outros sons. A inteligibilidade da linguagem é mais usual, uma vez que a voz é o som ouvido em mais de 90% das vezes no dia-a-dia de uma pessoa.

Quando se refere à comunicação em um ambiente, a inteligibilidade é definida como “inteligibilidade acústica da linguagem” e é a principal característica acústica de um ambiente, pois reflete o grau de entendimento das palavras no seu interior. Para os locais onde a comunicação é primordial, (auditório, cinemas, teatros, igrejas, salas de aula e conferências, etc.) a boa inteligibilidade acústica é um fator decisivo (FERNANDEZ, 2000).

3.5.1 Características da Mensagem Oral

Quando uma pessoa emite uma mensagem, utiliza um tempo maior na emissão de vogais que nas consoantes. As vogais constituem o chamado regime permanente da fala, enquanto que as consoantes associam-se ao regime transitório.

A duração média de uma vogal é da ordem de 90 ms, reduzindo a 20 ms no caso de uma consoante.

O fato de que a duração das vogais é mais elevada, faz com que o nível de pressão sonora associado às mesmas seja da ordem de 12 dB maior que o correspondente às consoantes. O conteúdo de frequência é maior em baixas frequências, no entanto, as consoantes apresentam uma maior contribuição de altas frequências (ver Tab. 3.5).

Tabela 3.5 - Características mais relevantes da mensagem oral.

	Duração	Conteúdo em frequência	Nível	Contribuição à Intelig. Palavra
Vogais	≈ 90 ms	Baixas frequências	Nível vogais	Baixa
Consoantes	≈ 20 ms	Altas frequências	Nível consoantes + 12 dB	Alta

Fonte: CARRION, 2001.

3.5.2 Grau de Inteligibilidade da Fala

O grau de inteligibilidade da fala está estreitamente relacionado com a correta percepção em altas frequências. Em consequência, são as consoantes que determinam a compreensão da mensagem oral. A informação contida nas vogais é redundante.

Para que o conforto acústico, como o grau de inteligibilidade em uma sala, seja correto é necessário evitar a aparição de ecos, focalizações do som e eco palpitante. Assim, deve-se evitar a existência de grandes paredes paralelas refletivas, aplicando-se uma pequena inclinação (da ordem de 5°) a uma das duas paredes ou, então, aplicar um material absorvente pelo menos sobre uma das duas paredes problemáticas.

A presença de ecos pode ser devida a uma geometria inadequada. Este tipo de anomalia se apresenta quando o tempo de reverberação é bem curto. As possíveis soluções para prevenir ou eliminar ecos são as seguintes:

- Colocar material absorvente diante das superfícies problemáticas. Em qualquer caso é melhor evitar a utilização de grandes quantidades de absorção, porque poderia levar a uma diminuição excessiva do tempo de reverberação. Como norma prática, a porcentagem da superfície tratada para evitar, exclusivamente, a aparição destas anomalias não deve ser superior a 10% da superfície total da sala.
- Reorientar as superfícies problemáticas a fim de redirecionar o som refletido a outras zonas não problemáticas.

No que diz respeito à prevenção de focalizações, deve-se evitar as formas côncavas nas paredes e tetos.

3.5.3 Diretividade da Voz Humana

Em geral, qualquer fonte sonora irradia mais potência em uma direção que em outras e, portanto, apresenta uma certa diretividade. A diretividade depende da frequência e aumenta com a mesma.

A forma de expressar a diretividade de uma fonte sonora em um ponto qualquer do espaço é mediante o denominado **fator de diretividade Q** . O fator Q depende da relação entre o nível de pressão sonora produzido pela fonte sonora na direção considerada e o nível que se obteria se a fonte não fosse diretiva. Quanto maior for o NPS em uma direção determinada, maior será o valor de Q em tal direção.

A voz humana apresenta algumas características de diretividade que são determinadas pelo sistema de fonação e da forma da cabeça, sendo a direção frontal a de maior diretividade. Embora a diretividade aumente com a frequência, para efeitos práticos se considera que o fator de diretividade da voz humana na direção frontal é $Q = 2$.

3.5.4 Cálculo da Inteligibilidade da Fala

3.5.4.1 Métodos Subjetivos

A metodologia empregada é chamada de “Método Subjetivo de Índice de Acerto por Sílabas Padronizadas”, sendo o tipo de análise mais aceito pela comunidade científica. O método consiste em distribuir pessoas com audição normal no ambiente a ser estudado e, através de um orador (ou gravações da voz de locutores), pronunciar um lote de palavras normalizadas (monossílabas, dissílabas, polissílabas, sílabas sem sentido, frases, etc.) que são anotadas pelos ouvintes. As fichas são analisadas estatisticamente, obtendo-se o índice de acerto para cada posição e para cada ouvinte. Então, a inteligibilidade de cada posição do ambiente é calculada a partir deste índice de acerto. A porcentagem de acerto é chamada de Índice de Discriminação da Fala (IDF) (FERNANDEZ, 2000).

Se, por exemplo, a porcentagem média de sílabas detectadas corretamente em um dos ambientes foi de 85%, então se considera que a perda de informação seja de 15%. Como tal perda se associará a uma percepção incorreta das consoantes, Peutz denomina de Percentual de Perda da Articulação de Consoantes (%ALCons = 15%), que é um parâmetro indicativo da perda. Assim, quanto maior for esta última, pior será o grau de inteligibilidade existente (CARRIÓN, 2001).

Esta perda de articulação de consoantes será definida seguidamente na formulação matemática.

3.5.4.2 Formulação Matemática

Uma segunda forma para se determinar a inteligibilidade da fala é encontrar uma lei matemática que, a partir do conhecimento de uma série de parâmetros acústicos do recinto em estudo, permita encontrar o valor de %ALCons, em cada ponto do mesmo, sem a necessidade de ter que realizar as laboriosas provas de audiência. Logicamente, uma vez estabelecida tal lei, seria possível prever a inteligibilidade da fala em qualquer ponto de um recinto ainda por construir.

Fazendo uso da teoria da acústica estatística, Peutz deduziu que o valor de %ALCons em um ponto dado podia ser determinado, simplesmente, a partir do conhecimento do tempo de reverberação TR e da diferença entre os níveis de pressão sonora de campo direto L_D e de campo reverberante L_R em tal ponto.

Para o cálculo de $L_D - L_R$ a fórmula a utilizar é a seguinte:

$$L_D - L_R = 10 \log\left(\frac{Q \times R}{r^2}\right) - 17 \quad (3.9)$$

onde **log** representa o logaritmo decimal; Q é o fator de diretividade da fonte sonora na direção considerada ($Q = 2$ para voz humana considerando a direção frontal do orador); R é a constante da sala (m^2); e r é a distância do ponto considerado à fonte sonora (m).

Como tanto TR como R dependem do coeficiente médio de absorção α_m seu conhecimento, junto com o volume V e da superfície total S_{tot} permitem calcular os valores de TR e de $L_D - L_R$.

Em nível prático, geralmente se elege para o cálculo o valor de α correspondente à banda de 2 kHz, por ser de máxima contribuição à inteligibilidade da palavra.

A Fig. 3.4 permite determinar o valor de %ALCons (eixo de ordenadas esquerdo) a partir dos valores de TR (eixo de ordenadas direito) e da diferença $L_D - L_R$ (eixo das abscissas).

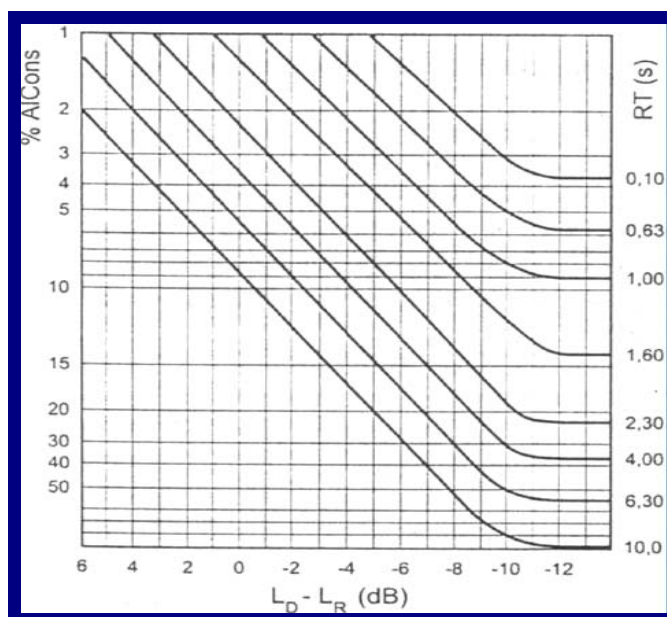


Figura 3.4 - Obtenção da %ALCons a partir de TR e de $L_D - L_R$.

3.5.5 Relação entre o Tempo de Reverberação e a Inteligibilidade da Fala

Quando se emite uma mensagem oral, a duração das vogais e seu correspondente nível de pressão sonora é maior que das consoantes.

O conteúdo de frequência das vogais é maior nas baixas frequências, enquanto que as consoantes apresentam um maior conteúdo de altas frequências.

Em uma sala com um tempo de reverberação alto, o decaimento energético de uma vogal emitida na mesma é apreciavelmente mais lento que o decaimento próprio (aquele que se observaria se a vogal fosse emitida no espaço livre). Tal fato, junto com a maior duração e nível comentado anteriormente, provoca um solapamento temporal da vogal com a consoante emitida imediatamente depois. A Tab. 3.6 estabelece a relação entre Reverberação e Inteligibilidade.

A simultaneidade temporal da vogal e da consoante com seus correspondentes níveis, assim como as características espectrais de ambos sons, são as causas do mascaramento parcial ou total da consoante produzido pela vogal.

Finalmente, como o grau de inteligibilidade está estreitamente ligado à correta percepção das consoantes, por seu importante conteúdo de altas frequências, o mascaramento das mesmas devido a um excesso de reverberação provoca uma perda de inteligibilidade na sala.

Tabela 3.6 - Relação Reverberação x Inteligibilidade.

Reverberação X Inteligibilidade
• A inteligibilidade varia com o inverso do quadrado do Tempo de reverberação.
• Para uma boa inteligibilidade da linguagem o tempo de reverberação TR60 deve permanecer abaixo de 1 s.
• O nível de campo reverberante depende da absorção das superfícies do local, do volume do ambiente e do nível do som gerado.
• Em algumas avaliações da inteligibilidade é usado o EDT (<i>Early Decay Time</i>) como medida da reverberação (mesma definição do T60 tomada para os primeiros 10dB).

Fonte: FERNANDEZ, 2000.

3.6 RELAÇÃO SINAL/RUÍDO (S/N)

É uma comparação útil para estimar o quão compreensível é a fala em uma sala. O nível sonoro da voz da professora em dB, menos o nível de ruído de fundo na sala, em dB, é igual à relação S/N em dB. Quanto maior a S/N maior é a inteligibilidade da fala. Se a S/N é negativa (o ruído de fundo é maior que a voz da professora), será difícil ser a professora compreendida. Tipicamente, a S/N é menor nos fundos da sala de aula, onde o nível sonoro da voz da professora cai, ou perto da fonte de ruído, situação que ocorre, por exemplo, perto de um ar condicionado da parede.

Estudos têm mostrado que, em salas de aula que têm S/N menor que +10 dB, a inteligibilidade da fala é significativamente degradada para crianças com audição mediana. Crianças com alguma deficiência auditiva precisam no mínimo de +15 dB de S/N (SEEP, 2002).

Picard e Bradley concluíram que os métodos convencionais de determinação da relação sinal/ruído podem superestimar os níveis da fala, pois integram a voz do professor

com o ruído de fundo existente. Para uma avaliação mais precisa deve-se medir o nível sonoro da voz do professor subtraindo-o do ruído de fundo, para então compará-lo ao ruído de fundo.

Uma diferença menor entre o sinal e o ruído de fundo significa maior esforço vocal por parte do professor, pois naturalmente o nível da fala precisa ser aumentado para ser compreendido pelos ouvintes. A situação mais crítica ocorre com os alunos localizados mais distantes do professor, pois as vozes vão decrescendo com a distância e ao chegar nos mais distantes, pode estar incorporada ao campo reverberante, ou seja, estaria incorporada no ruído de fundo. Também, locais próximos às fontes sonoras, como alunos perto de uma janela aberta voltada para a rua ou alunos próximos a ventiladores podem ser considerados similarmente críticos (LOSSO, 2003).

A Tab. 3.7 mostra a relação entre ruído e inteligibilidade.

Tabela 3.7 - Relação Sinal/Ruído x Inteligibilidade.

Ruído X Inteligibilidade
<ul style="list-style-type: none">• A relação Sinal/Ruído (S/N) é fundamental para a inteligibilidade.
<ul style="list-style-type: none">• Para S/N entre 0 e +10 dB a inteligibilidade será inaceitável; para S/N entre +20 e +30 dB será boa; e para S/N entre +30 e +40 dB a inteligibilidade será excelente.
<ul style="list-style-type: none">• ção em que chega ao ouvinte o ruído mascarante é importante. Quando a direção é a mesma do som da fala o mascaramento será maior.
<ul style="list-style-type: none">• O mascaramento do ruído será maior quando seu espectro for mais intenso na banda de transmissão de informações (1 a 4 kHz)

Fonte: **FERNANDEZ, 2000.**