

# Módulo 06

## Física da Fala e da Audição

### Percepção e Medidas de Som I

Prof. Edmilson Manganote  
Instituto de Física Gleb Wataghin (IFGW)  
Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP)  
[mangano@ifi.unicamp.br](mailto:mangano@ifi.unicamp.br)

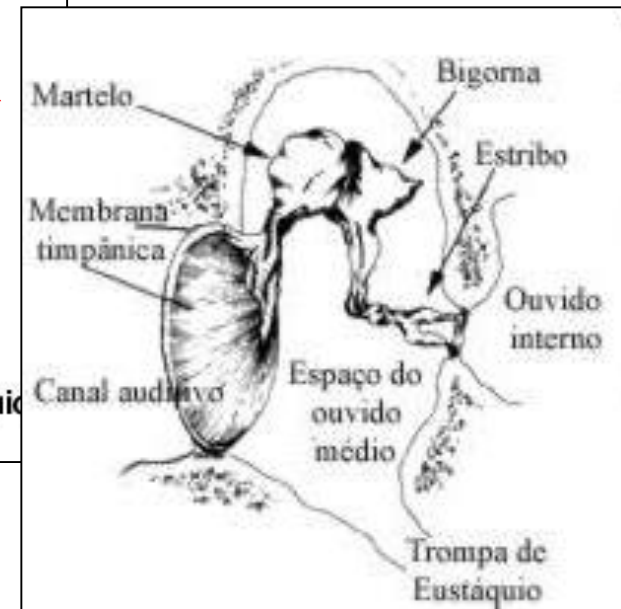
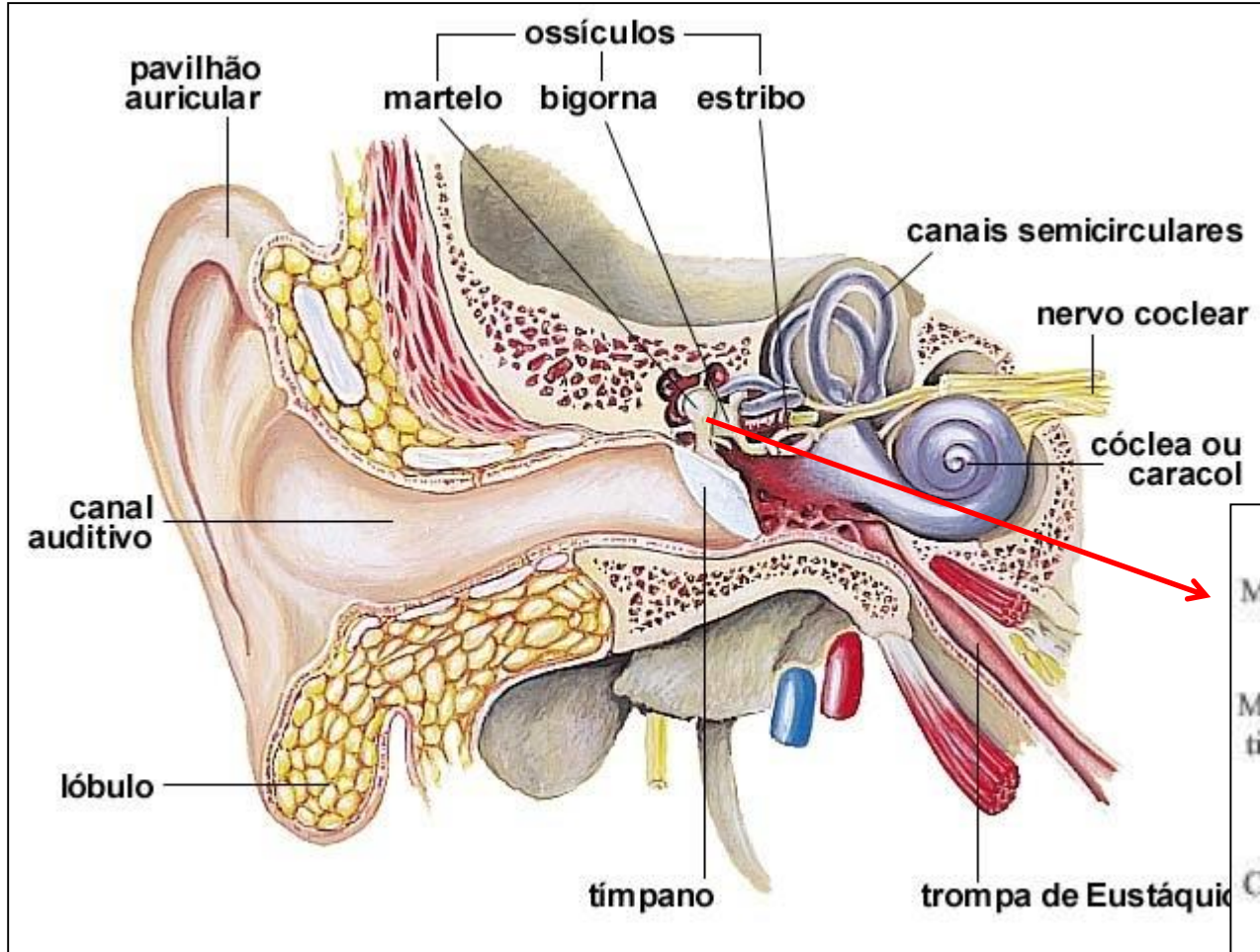
# A função audição

- Alguns números:
  - Nosso ouvido responde a variações de pressão dentro de um intervalo de 1 milhão de vezes...
  - As vibrações no tímpano podem ser tão pequenas quanto  $10^{-8}$  mm...
  - Ouvimos de 20 a 20.000 Hz
  - Somos pouco sensíveis a baixas frequências (nossa sensibilidade a 1000 Hz é cerca de 1000 vezes maior que a 100 Hz...

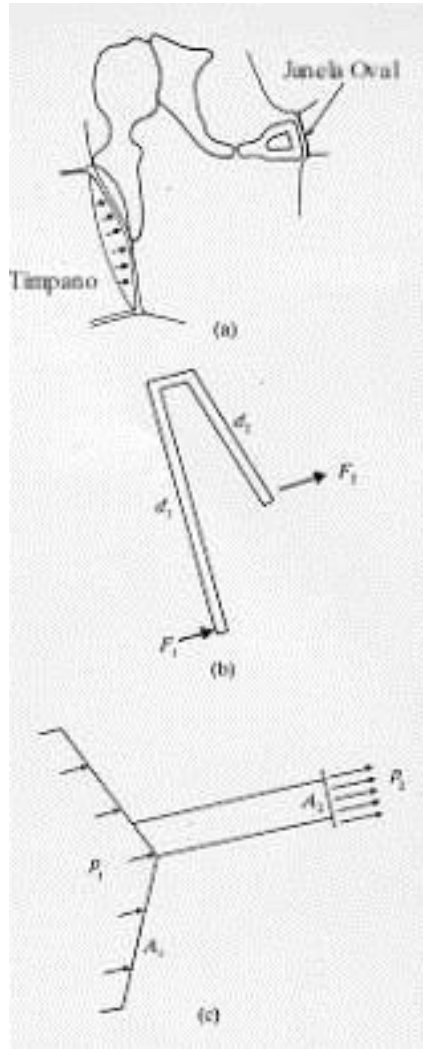
# A função audição

- Alguns números:
  - Nossa sensibilidade para sons de altas frequências decresce gradualmente por toda a vida...
  - Um adulto tem dificuldades em ouvir sons com frequências superiores a 10.000 ou 12.000 Hz...
  - Seletividade

# Estrutura do Ouvido



# Estrutura do Ouvido



Processo de Amplificação das ondas sonoras pelos ossículos (ouvido médio):

(a) - Os três ossos ligam o tímpano ao ouvido interno (janela oval)

(b) - Efeito alavanca: uma pequena força atuando numa grande distância resulta numa força acentuada que atua numa distância pequena

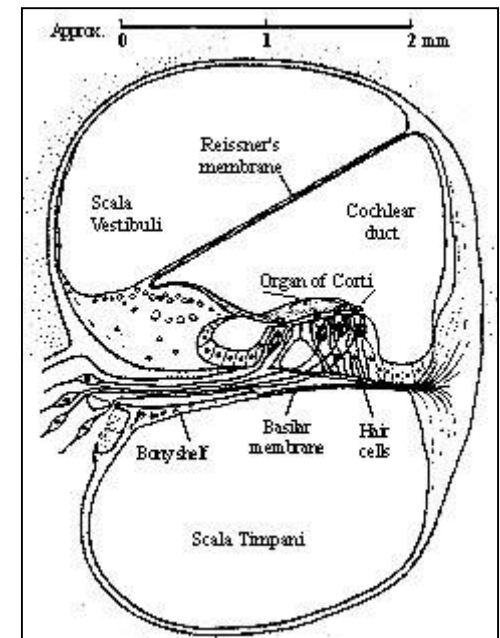
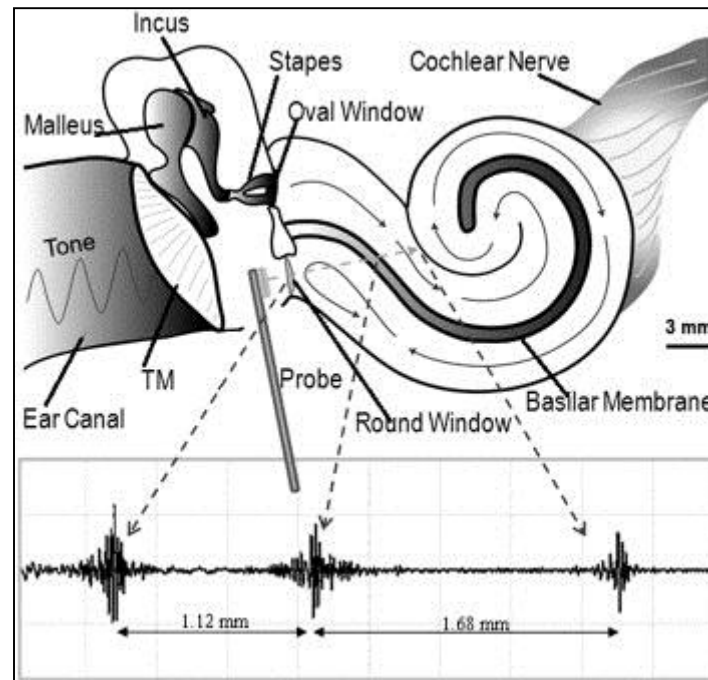
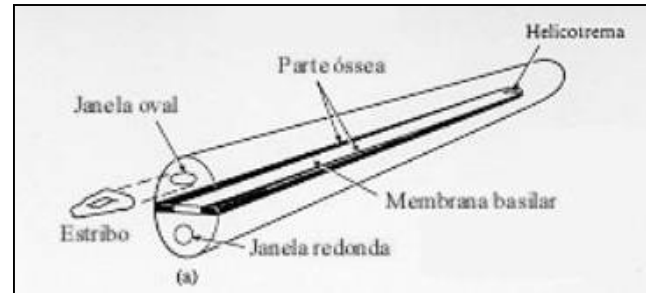
(c) - Efeito pistão: uma pressão baixa que está distribuída numa área grande resulta numa pressão alta numa área pequena

# Estrutura do Ouvido - A Cóclea

Cóclea de um feto humano  
(5 meses de gestação)

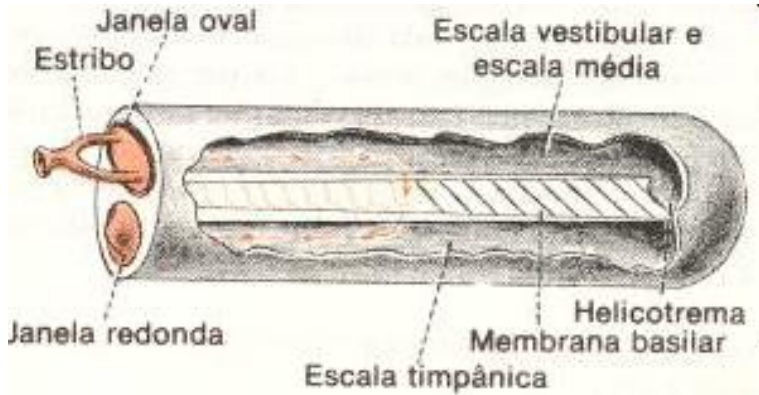


Cóclea - Diagrama esquemático

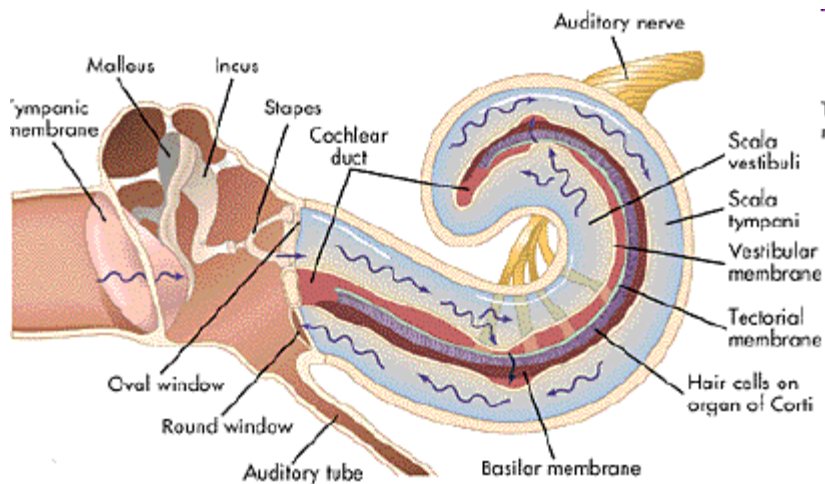




# Estrutura do Ouvido - A Cóclea

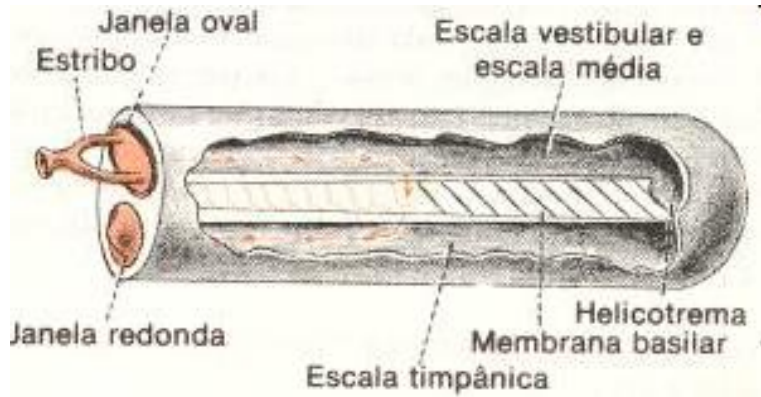


O "tubo" ósseo enrolado que constitui a cóclea encontra-se dividido em toda a sua extensão em três secções, estando todas preenchidas com um líquido semelhante à água.



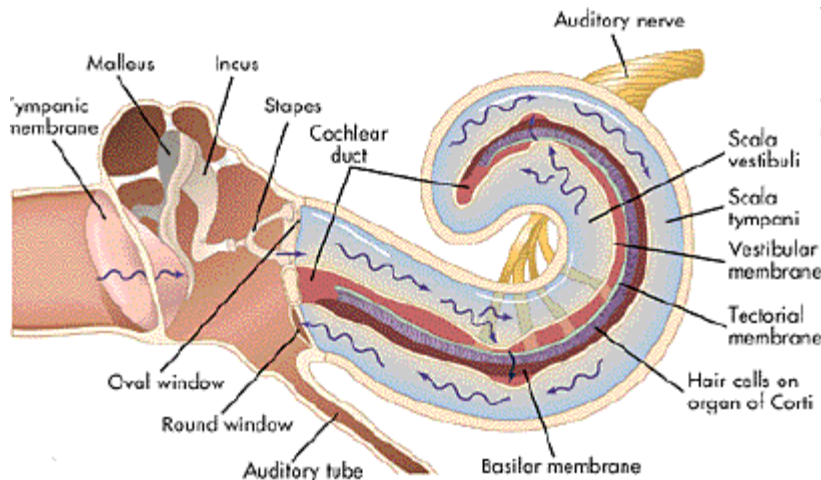
A primeira denomina-se de scala vestibuli (rampa vestibular) e está ligada à janela oval, enquanto que a última, a scala tympani (rampa timpânica) se encontra ligada à janela redonda. Estas duas secções unem-se apenas no fim da cóclea, no chamado helicotrema, e estão separadas por uma terceira secção denominada de ducto coclear.

# Estrutura do Ouvido - A Cóclea



A separação entre as três secções referidas é efetuada por duas membranas.

A separar a scala vestibuli do ducto coclear encontra-se a membrana de Reissner e entre o ducto coclear e a scala tympani está a membrana basilar.

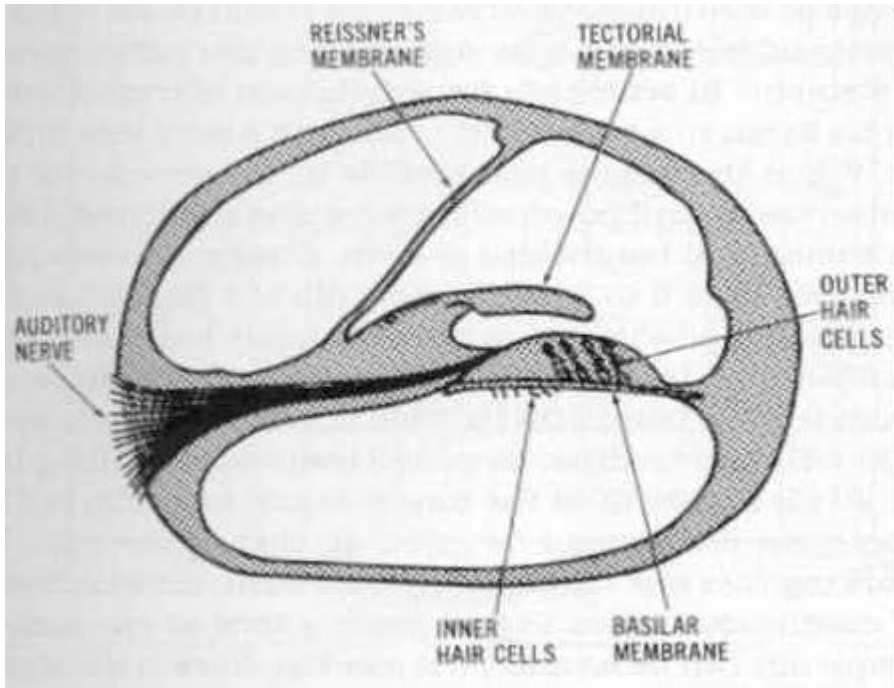


A membrana basilar é fundamental pois é ela que suporta o órgão de Corti.

No órgão de Corti localizam-se as células ciliadas que, quando agitadas pelas vibrações sonoras, produzem impulsos elétricos que o cérebro decodificará.



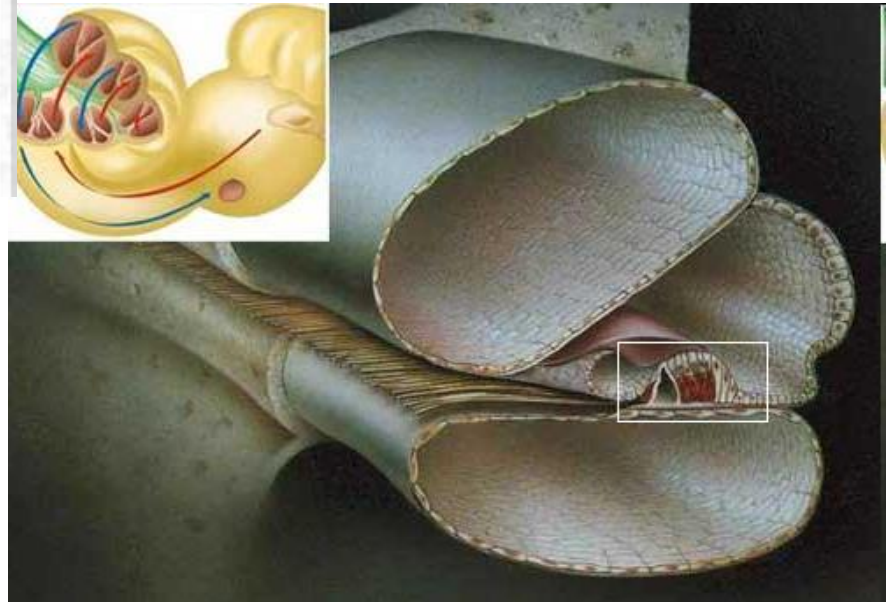
# Estrutura do Ouvido - Órgão de Corti



O órgão de Corti aloja as células ciliadas, assentado sobre a membrana basilar e seguindo a estrutura em espiral da mesma.

Um som normal pode ser obtido como a soma de sons elementares com frequências diversas.

Devido às características da cóclea, cada uma dessas frequências excita uma determinada zona da membrana basilar, estimulando assim apenas as células ciliadas que aí se encontram.

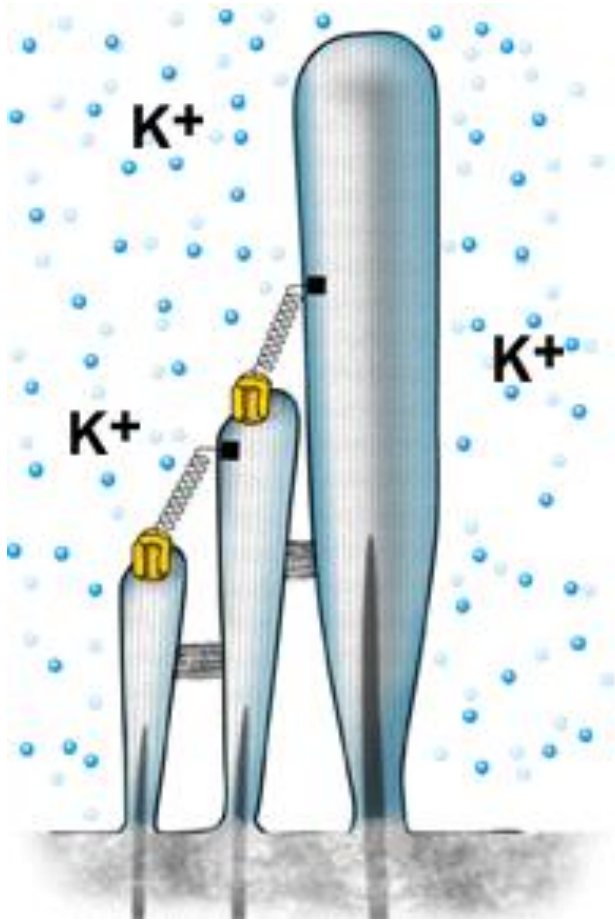


# Estrutura do Ouvido - Órgão de Corti

O funcionamento básico do órgão de Corti pode ser resumido esquematicamente em 5 estágios:

- 1) As ondas sonoras movem a Membrana Basilar para cima e para baixo.
- 2) Os cílios das Células Ciliadas Externas (CCE), implantados na Membrana Tectorial se curvam e a célula é despolarizada.
- 3) As CCE despolarizadas reagem através de uma contração (eletromotilidade); isto é, um mecanismo ativo.
- 4) Devido à firme junção entre as CCE com a Membrana Basilar e a Membrana Reticular, este mecanismo ativo gera energia de volta para o Órgão de Corti e assim as Células Ciliadas Internas (CCI) são excitadas, provavelmente através da ativação de seus cílios pela Membrana Tectorial.
- 5) as sinapses nervosas das CCI são ativadas e a mensagem é enviada ao Sistema Nervoso Central.

# Estrutura do Ouvido - Órgão de Corti

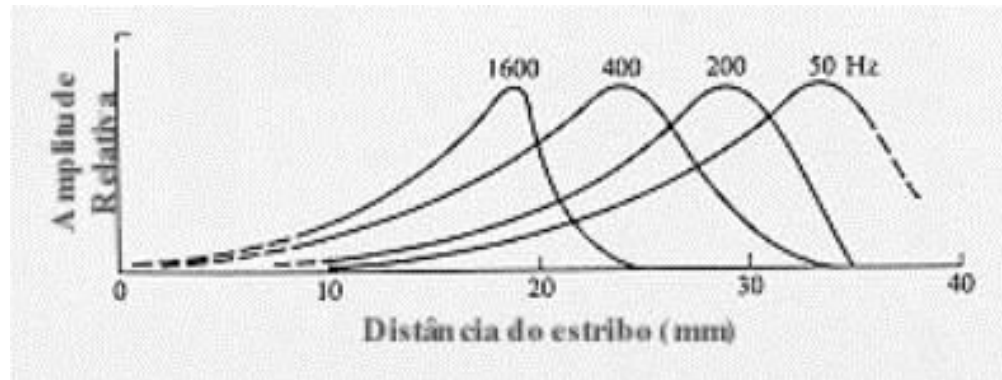
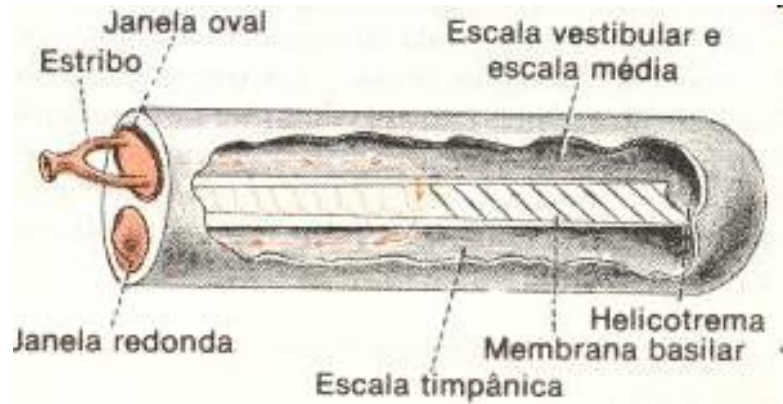


A despolarização da célula ciliada é baseada na abertura mecânica dos canais catiônicos, provavelmente localizados no topo dos cílios.

As ligações superiores permitem uma abertura rápida, de forma sincronizada, para todos os cílios, quando estes são curvados na direção da *stria vascularis*.

Devido à alta concentração de potássio (K+) na endolinfa, este penetra na célula e despolariza a sua membrana.

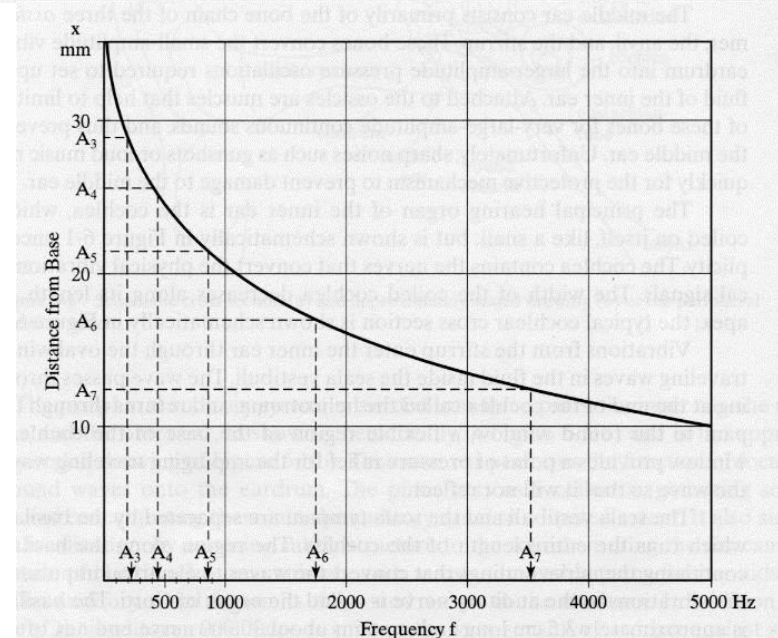
# Estrutura do Ouvido - Membrana Basilar



A membrana basilar é uma estrutura ressonante, ou seja, determinadas zonas da membrana basilar têm uma resposta mais acentuada em uma pequena gama de frequências, fazendo com que ela se desloque mais.

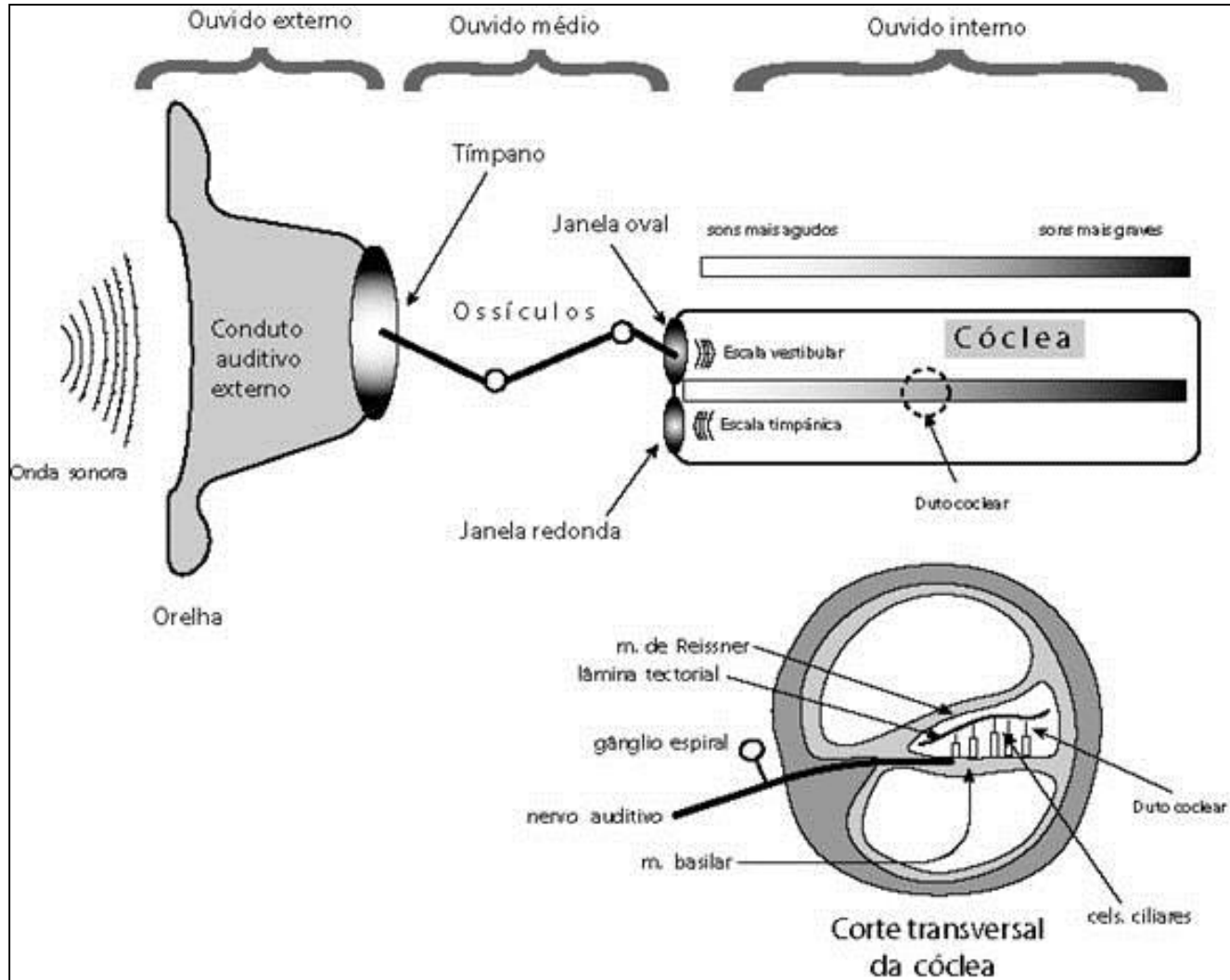
Perto da janela oval os sons agudos sofrem o efeito de ressonância e apresentam uma maior amplitude, isto aonde a membrana basilar se apresenta mais estreita e rígida.

Por outro lado os sons graves apresentam picos de pressão mais acentuados perto da janela redonda, no final do canal timpânico, onde a membrana basilar é mais larga e frouxa.



**Figure 6-3** Position of the resonance maximum on the basilar membrane for a pure tone of frequency  $f$  (after von Békésy, 1960). (From *The Physics and Psychophysics of Sound* by Juan G. Roederer, Figure 2.8, page 25, © 1995 by Springer-Verlag, New York. Used with permission.)

# Estrutura do Ouvido - Síntese



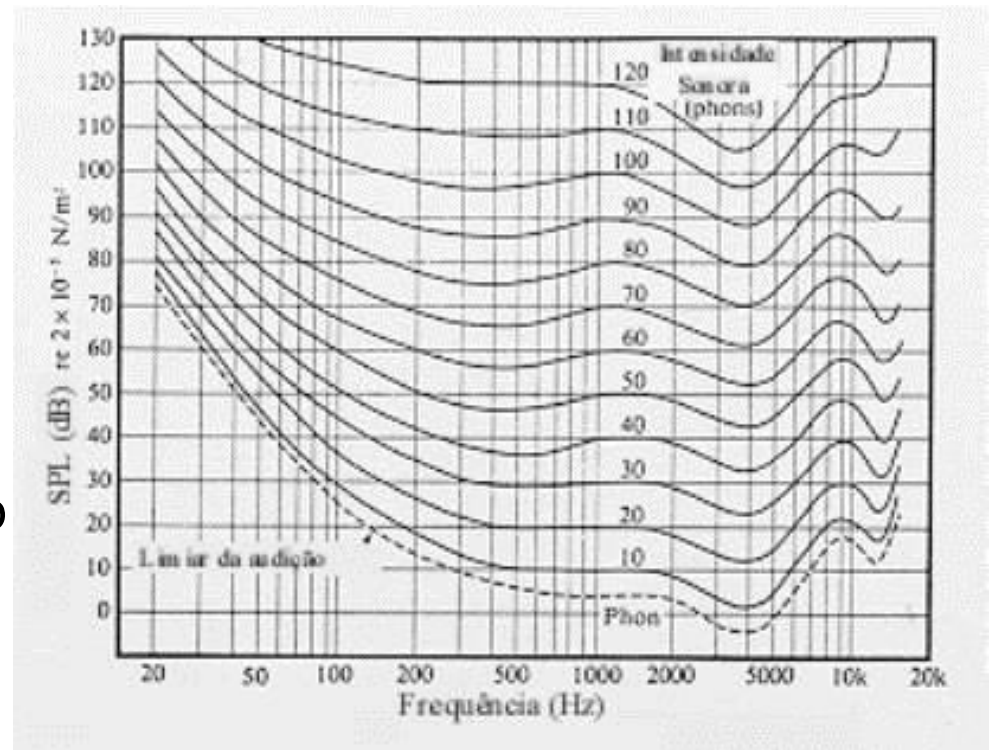


# Processamento do sinal no sistema auditivo

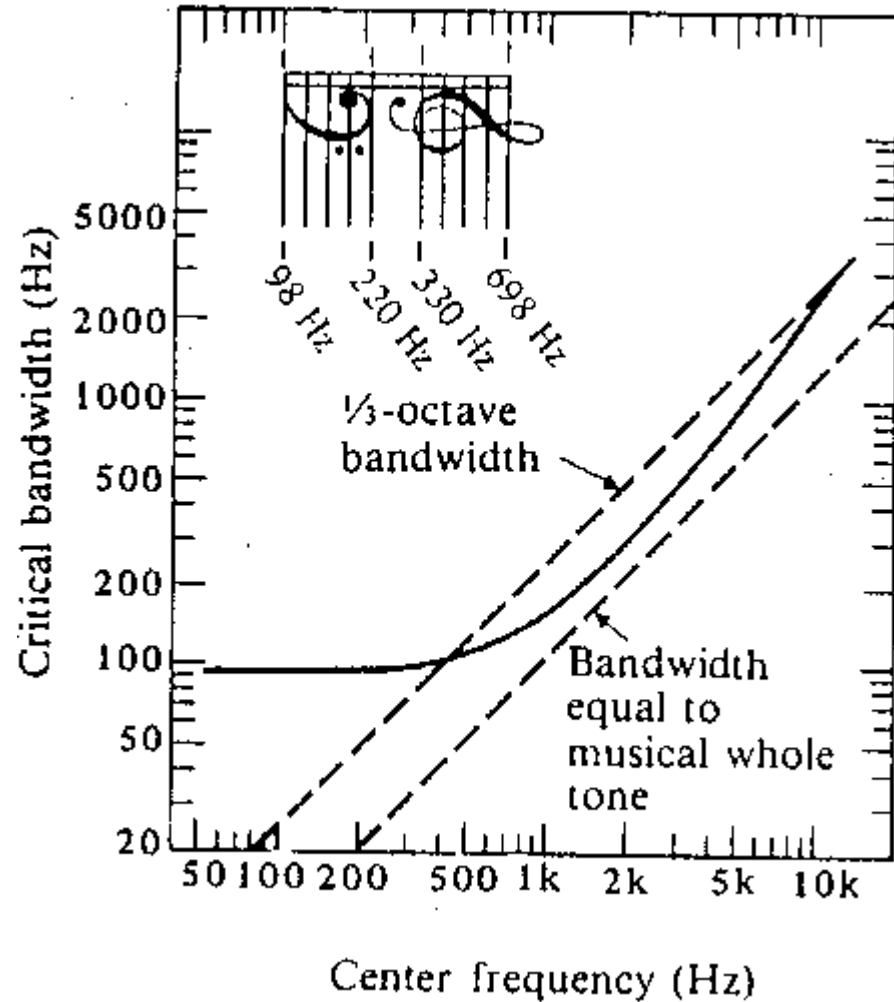
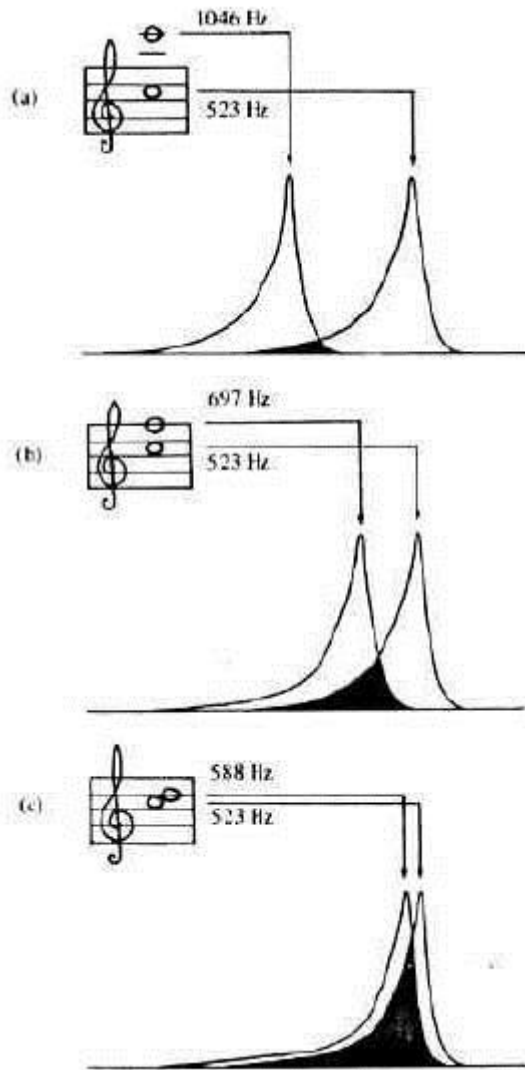
Sistema Auditivo Periférico  
(Ouvido)

Sistema Nervoso Auditivo  
(Cérebro)

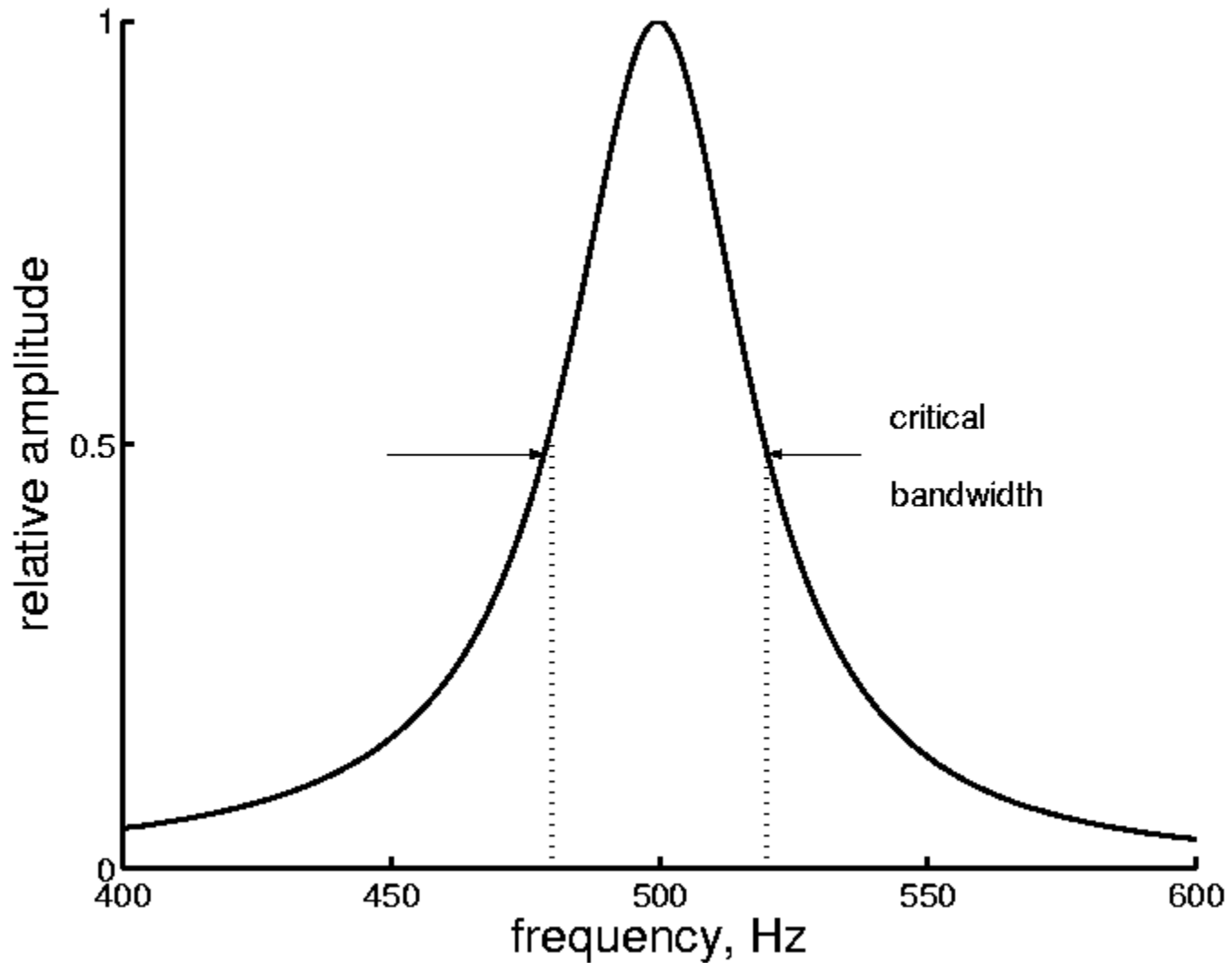
Cada fibra nervosa auditiva responde por um certo intervalo de frequências e pressões sonoras



# Bandas Críticas

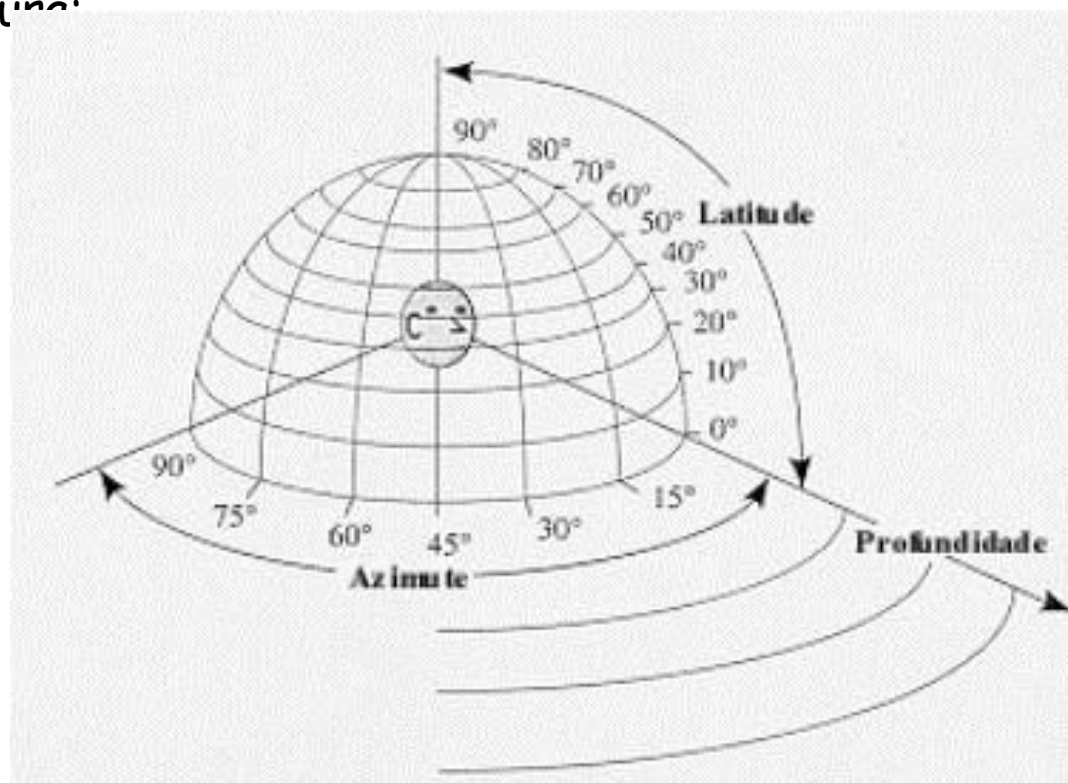


# Bandas Críticas

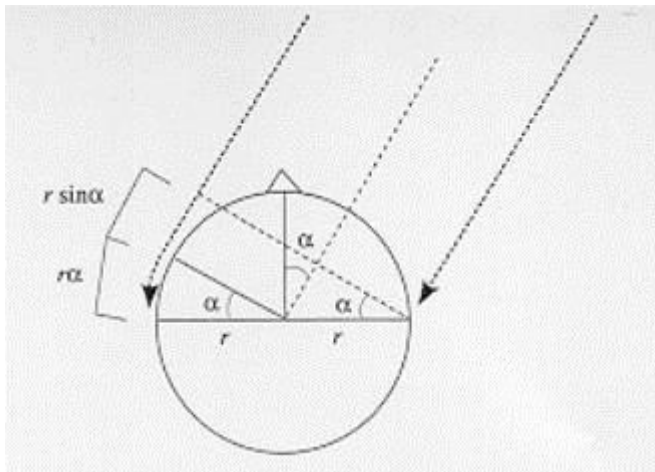


# Localização Espacial

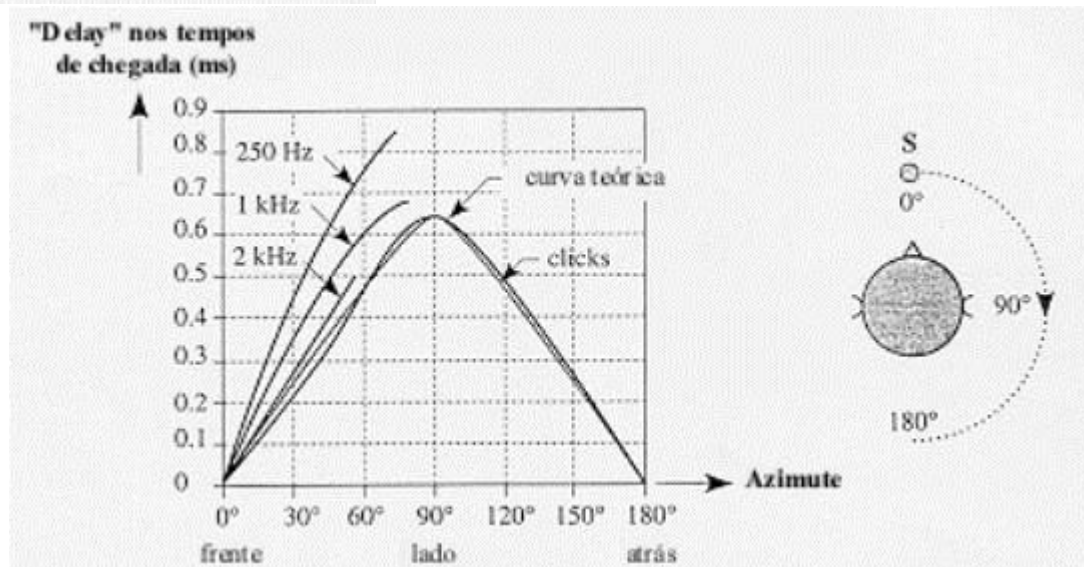
A percepção espacial de um som ou seja a sua localização consiste em descobrir o azimute (ou duração), a latitude (ou elevação) e a profundidade (ou distância), tendo como referência o ouvinte, como mostra a figura:



# Localização Espacial



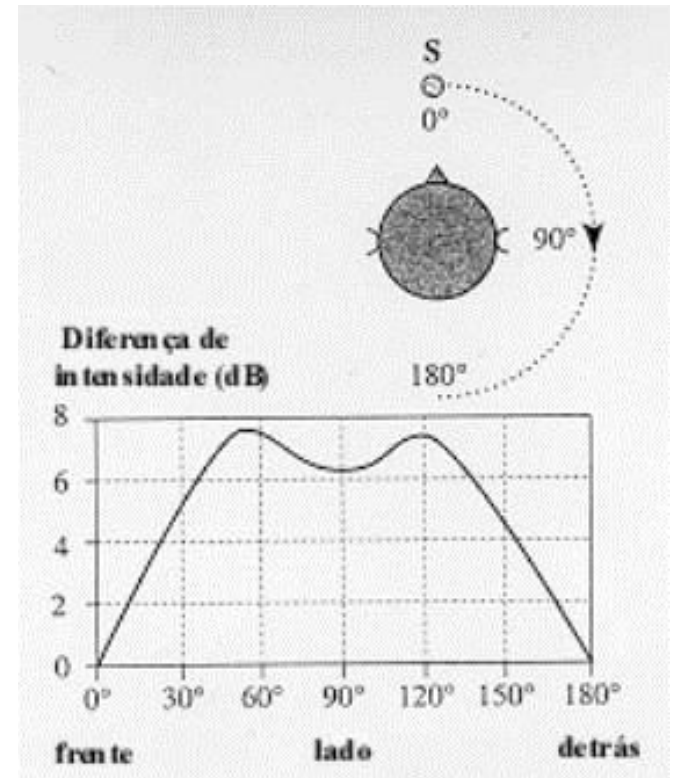
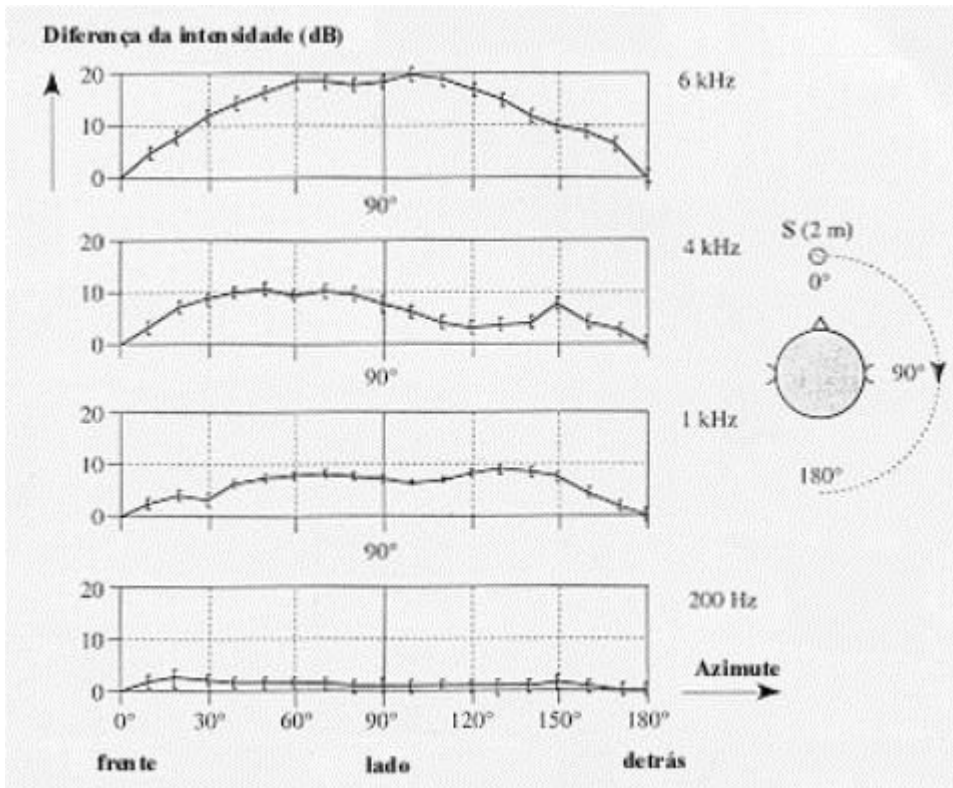
$$\Delta t = \frac{r(\alpha + \sin \alpha)}{c}$$





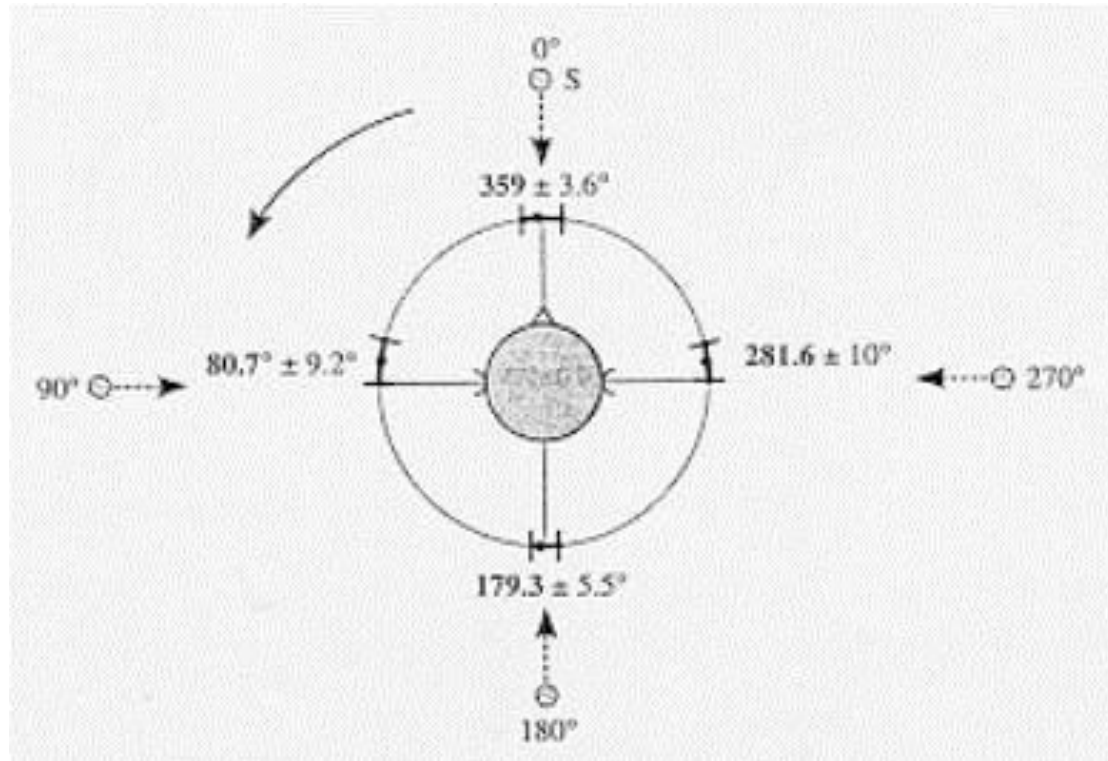
# Localização Espacial

A nossa cabeça, bem como as orelhas, o pavilhão auditivo, o canal auditivo e o tímpano constituem um obstáculo ao som, causando difração e absorção do som e funcionando como um filtro que depende da posição da fonte sonora relativa à cabeça e aos ouvidos.

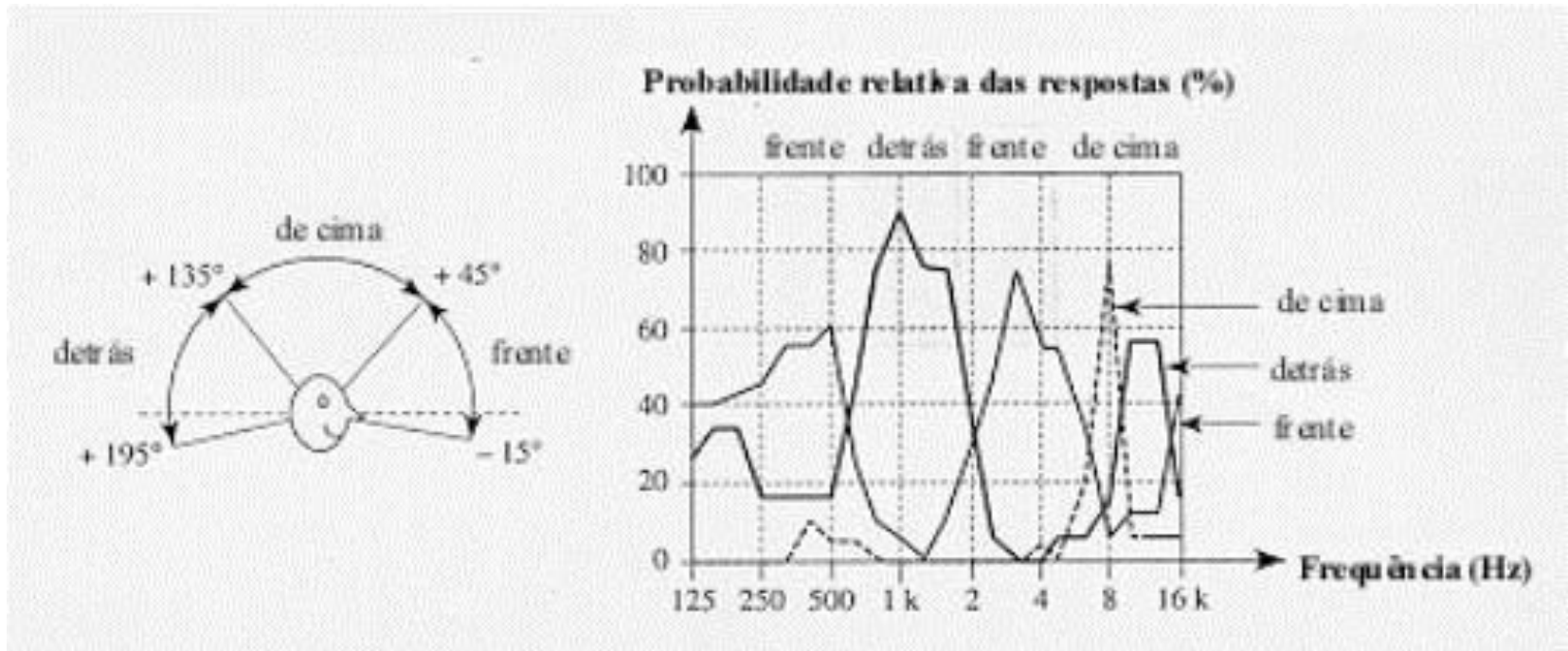


# Localização Espacial

Zonas de incerteza no plano horizontal



# Localização Espacial



A localização no plano vertical é menos precisa do que a horizontal, sendo que os únicos fatores que intervêm neste processo são algumas assimetrias do corpo humano e dos auriculares. A incerteza da localização situa-se entre os 15° e os 20° para uma fonte situada acima da cabeça.

# Atributos Subjetivos do Som

	Qualidade Subjetiva			
Parâmetro Físico	Loudness	Pitch	Timbre	Duração
Pressão	+++	+	+	+
Frequência	+	+++	++	+
Espectro	+	+	+++	+
Duração	+	+	+	+++
Envelope	+	+	++	+