



Universidade do Minho  
Escola de Ciências

# III - Audição

António Mário Almeida

Departamento de Física

Universidade do Minho

# Sumário

---

- Sistema auditivo humano
- Audição
- O ouvido externo
- O ouvido médio
- O ouvido interno

# Sistema auditivo humano

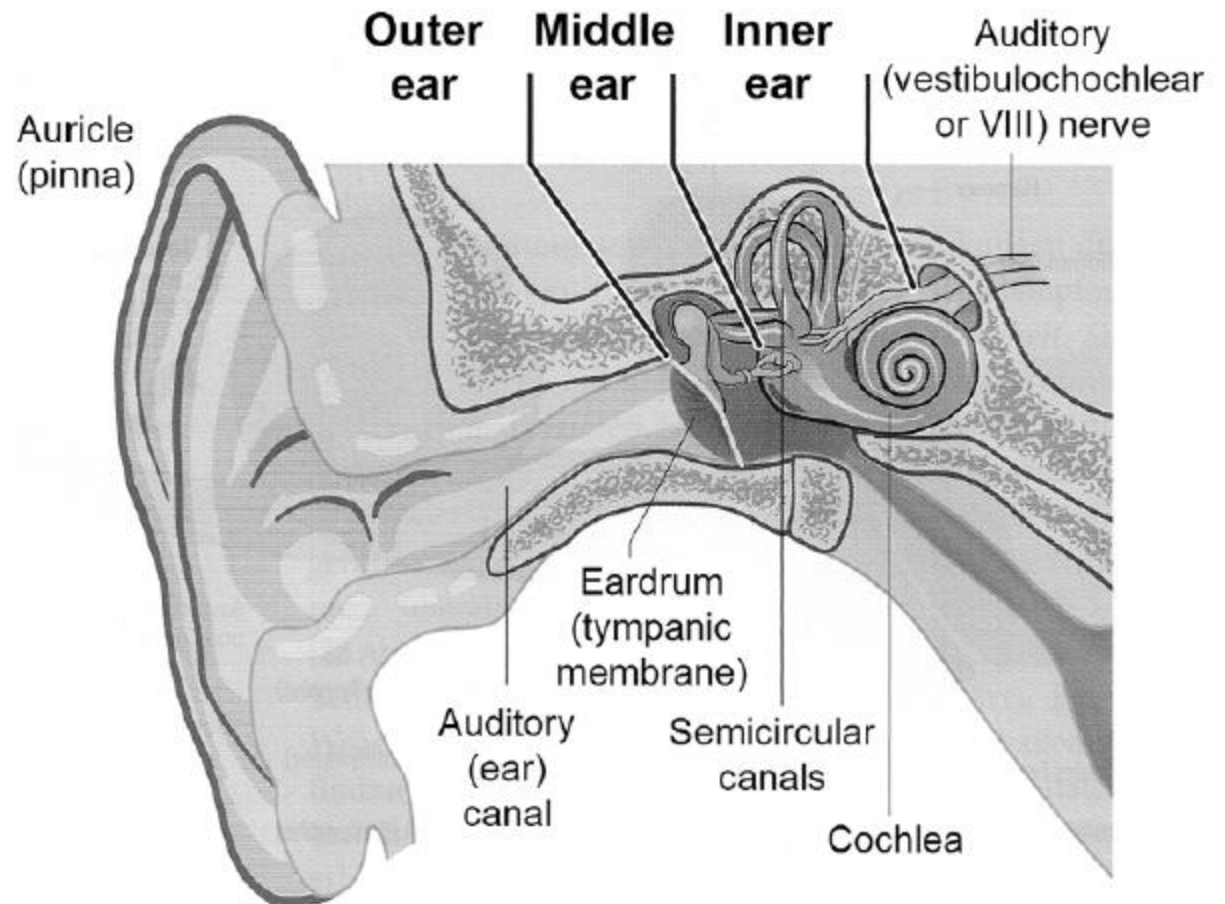
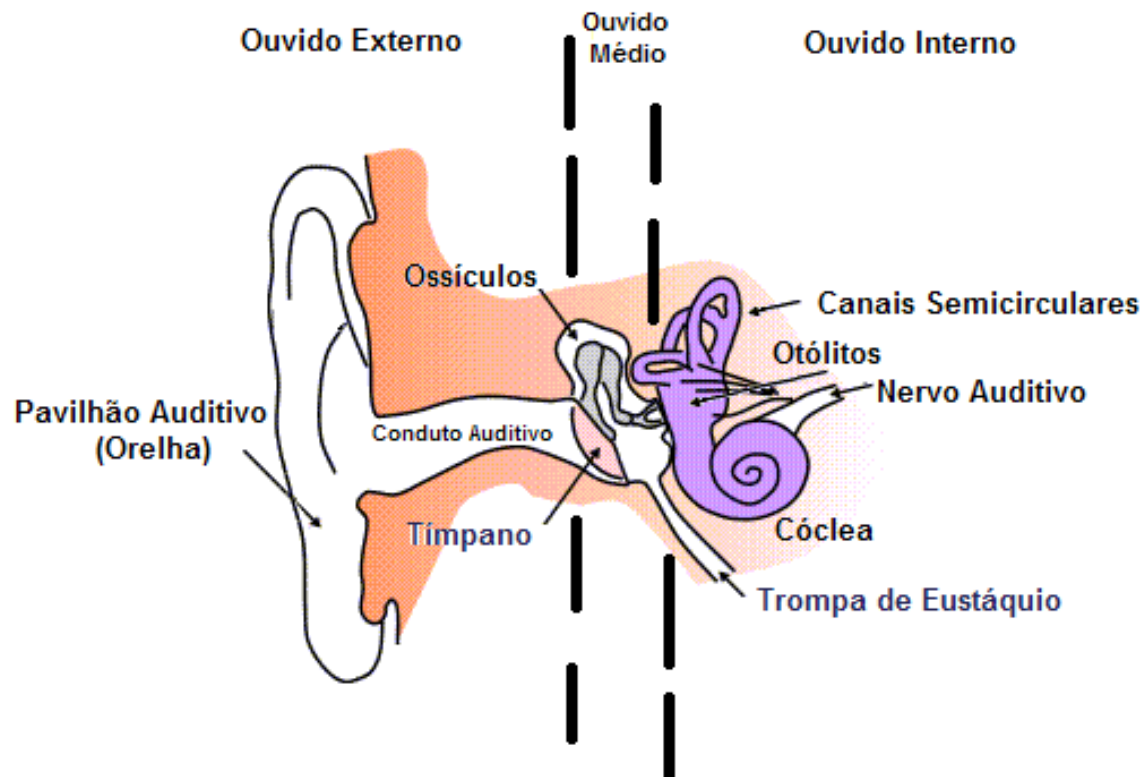


Fig. 10.26. Diagram of the outer, middle, and inner ear. (From [497])

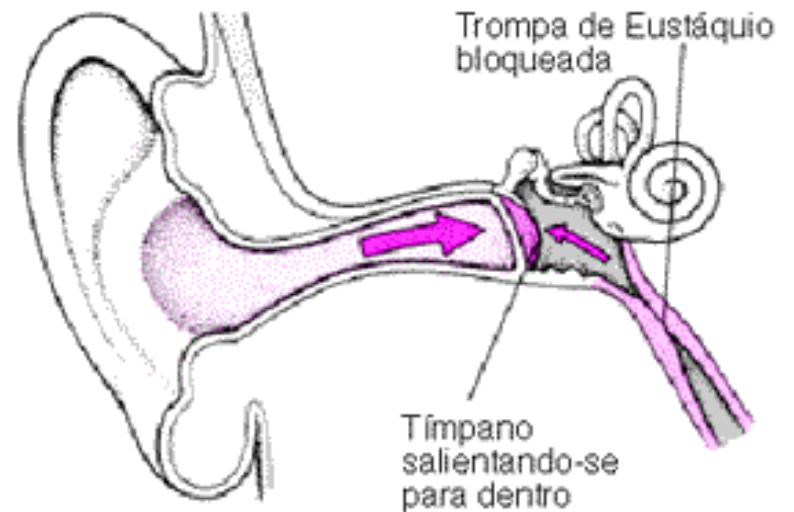
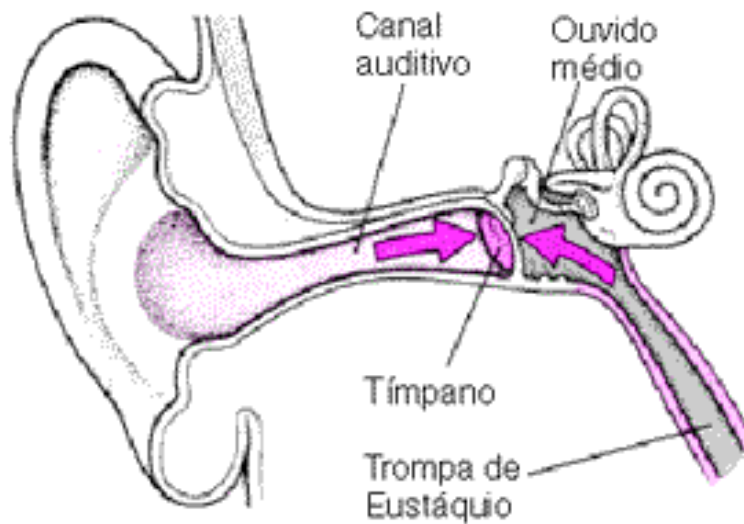
# Sistema auditivo humano

- Ouvir
- Localizar a fonte sonora (audição binaural)
- Órgãos do equilíbrio

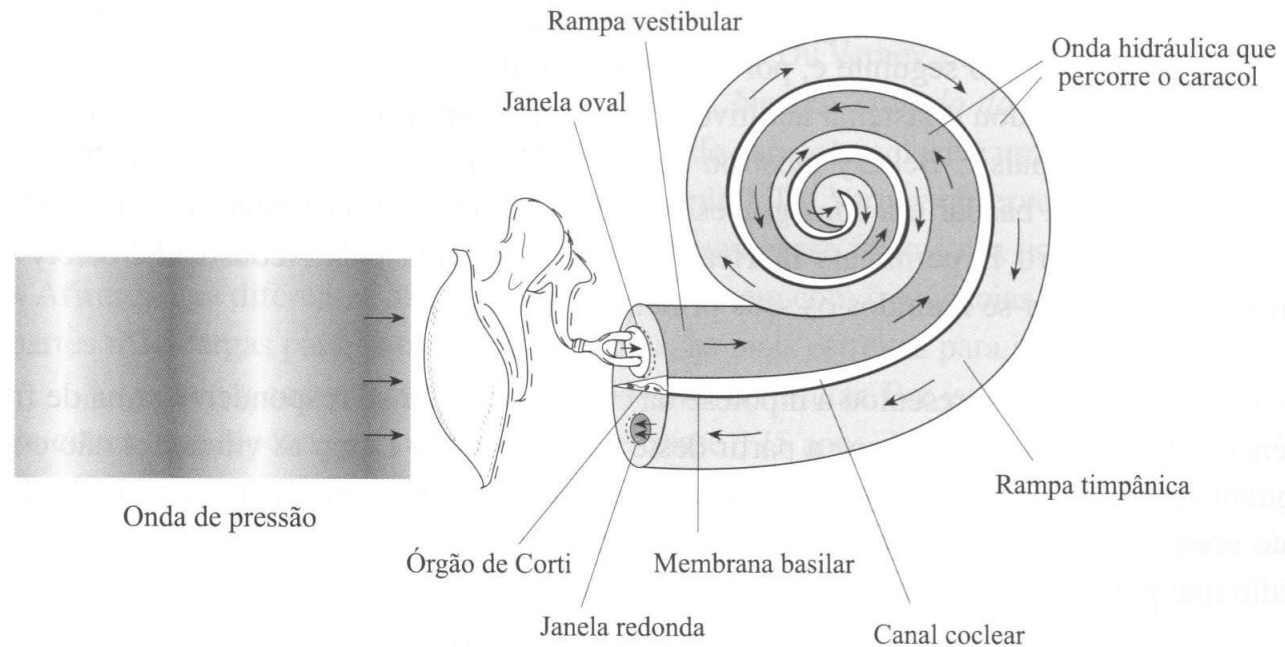
# Sistema auditivo humano



# Sistema auditivo humano



# Audição



[http://telecom.inescn.pt/research/audio/cienciaviva/index\\_audicao.htm](http://telecom.inescn.pt/research/audio/cienciaviva/index_audicao.htm)

There are four steps in the hearing process within the ear.

- (1) The sound wave enters the outer ear.
- (2) The movement of the tympanic membrane is transferred by conduction through the ossicles to the oval window of the cochlea.
- (3) The movement of the oval window generates a compressional (sound) wave in the fluid of the cochlea.
- (4) This wave moves the basilar membrane upon which the primary auditory receptors (the hair cells) are located, and the electrical signals generated by the hair cells are sent to the brain.

There are four steps in the hearing process within the ear.

(1) The sound wave enters the outer ear.

(2) The movement of the tympanic membrane is transferred by conduction through the ossicles to the oval window of the cochlea.

(3) The movement of the oval window generates a compressional (sound) wave in the fluid of the cochlea.

(4) This wave moves the basilar membrane upon which the primary auditory receptors (the hair cells) are located, and the electrical signals generated by the hair cells are sent to the brain.

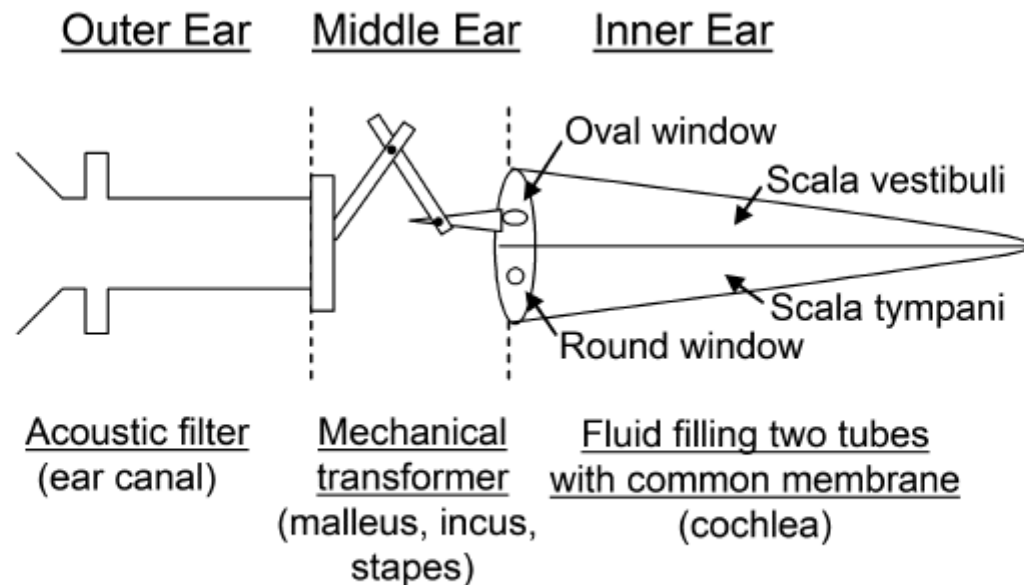


Fig. 10.28. Mechanical analogs of the outer, middle, and inner ear. (Based on [473])



# O ouvido externo

O ouvido externo constitui a parte visível, sendo composto pelo pavilhão auditivo (orelha) e pelo canal auditivo externo, separado do ouvido médio pelo tímpano.

O pavilhão auricular apenas se encontra nos mamíferos. Alguns anfíbios e répteis têm ouvidos externos visíveis, mas não têm pavilhão auricular, sendo apenas uma membrana que parece o topo de um tambor.

O pavilhão auricular é uma cartilagem elástica de forma irregular coberta de pele, que se projeta lateralmente a partir da cabeça com a qual faz um ângulo de aproximadamente  $30^\circ$  e apresenta uma forma complexa constituída por saliências, reentrâncias e dobras.

# O ouvido externo

Na parte central do pavilhão auricular situa-se a concha, que é a cavidade mais profunda. A concha afunila e liga-se à abertura do canal auditivo externo, que é uma coluna de ar que tem cerca de 20 a 30 mm de comprimento e estreita ligeiramente da abertura para o tímpano que tem 8 mm de diâmetro médio no caso de um adulto, 1/3 deste canal é em cartilagem, e os restantes 2/3 são formados por tecido ósseo revestido de uma fina pele esticada.

No canal auditivo externo existe uma penugem e cerúmen, secreção produzida pelas glândulas sebáceas e ceruminosas.

# O ouvido externo

Uma função do ouvido externo é aumentar a intensidade dos sons captados.

O aumento da intensidade resulta da ressonância do canal auditivo externo.

A frequência de ressonância depende do comprimento do canal auditivo externo, que funciona como ressoador e comporta-se como um tubo sonoro aberto-fechado.

Na realidade o canal auditivo externo não funciona exatamente como um tubo fechado, por ser tapado pela membrana do tímpano que é elástica e embora reflita as ondas, transmite energia para o ouvido médio.

O seu comportamento gera um efeito de grande amortecimento, o que altera o seu comprimento e faz com que ressoe a uma banda de frequências bastante larga.

# O ouvido externo

É através do pavilhão auricular que é possível distinguir se um som provem da frente, de trás, de cima ou de baixo.

O pavilhão auricular amortece determinados componentes do som e amplifica outros, em função da localização da fonte sonora. As curvas e dobras características do interior do pavilhão auricular permitem atenuar e dispersar sons e a penugem e o cerúmen ajudam a tornar o sistema mais amortecido.

Uma das funções do ouvido externo é proteger a membrana timpânica de possíveis danos exteriores e manter constante a temperatura e o grau de humidade.

Os mamíferos que ouvem frequências relativamente altas têm mobilidade dos pavilhões auriculares, como é o caso dos cavalos, coelhos, morcegos, gatos e cães.

No homem, os pavilhões auriculares são praticamente imóveis e têm a função de ajudar a captar e localizar os sons de alta frequência, direcionando-os para o canal auditivo externo até à membrana timpânica.

# O ouvido externo

Uma outra função do ouvido externo é aumentar a intensidade dos sons captados. O aumento da intensidade resulta da ressonância do canal auditivo externo e a ressonância do pavilhão auricular.

The external canal in the outer ear is about 9mm high, 6.5mm wide, and about 2.5–3.5 cm long.

It is open on one side (the outside) and terminated on the other side by the eardrum.

Even though it is curved, we will model it as a straight tube, a tube open on one side and closed on the other (Fig. 10.28).

*With  $L = 2.5$  cm, the fundamental mode has wavelength  $= 4L = 10$  cm.*

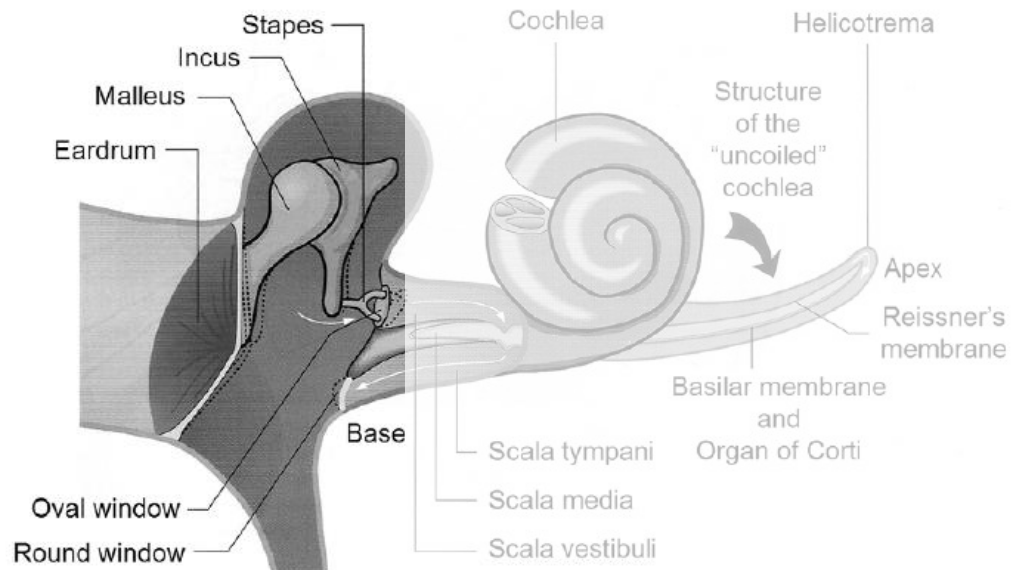
*The fundamental frequency  $f = v_s/4L$ , and with  $v_s = 343$  m/s for air, we see that  $f = (330 \text{ m/s})/10\text{cm} = 3, 430$  Hz.*

This is very close to the peak auditory sensitivity of humans, which is near 3,000 Hz (Fig. 10.29).

# O ouvido médio

O ouvido médio, também chamado caixa do tímpano, é uma cavidade óssea contendo ar, que possui no seu interior a cadeia ossicular formada por martelo, bigorna e estribo, os ossos mais pequenos do nosso corpo, que estão articulados uns nos outros.

Do ouvido médio parte um canal, a trompa de Eustáquio, que faz ligação à cavidade nasal.



**Fig. 10.27.** Middle ear in detail and visualization of partial and total uncoiling of the cochlea. The cut in the partially uncoiled cochlea shows the cross-section of the tubes, which is seen in more detail in Fig. 10.32. (From [497])

# O ouvido médio

O tímpano é uma membrana muito fina de tecido fibroso, recoberta externamente por pele e internamente por uma membrana mucosa.

O tímpano tem a forma de cone achatado, é côncavo e oblíquo relativamente ao canal auditivo externo.



<https://en.wikipedia.org/wiki/Ear>

A membrana do tímpano é mais espessa na periferia do que no centro, formando um anel de fibras e cartilagens que se prende numa fenda da parede óssea chamada sulco timpânico, o que permite ao tímpano manter-se na sua posição.

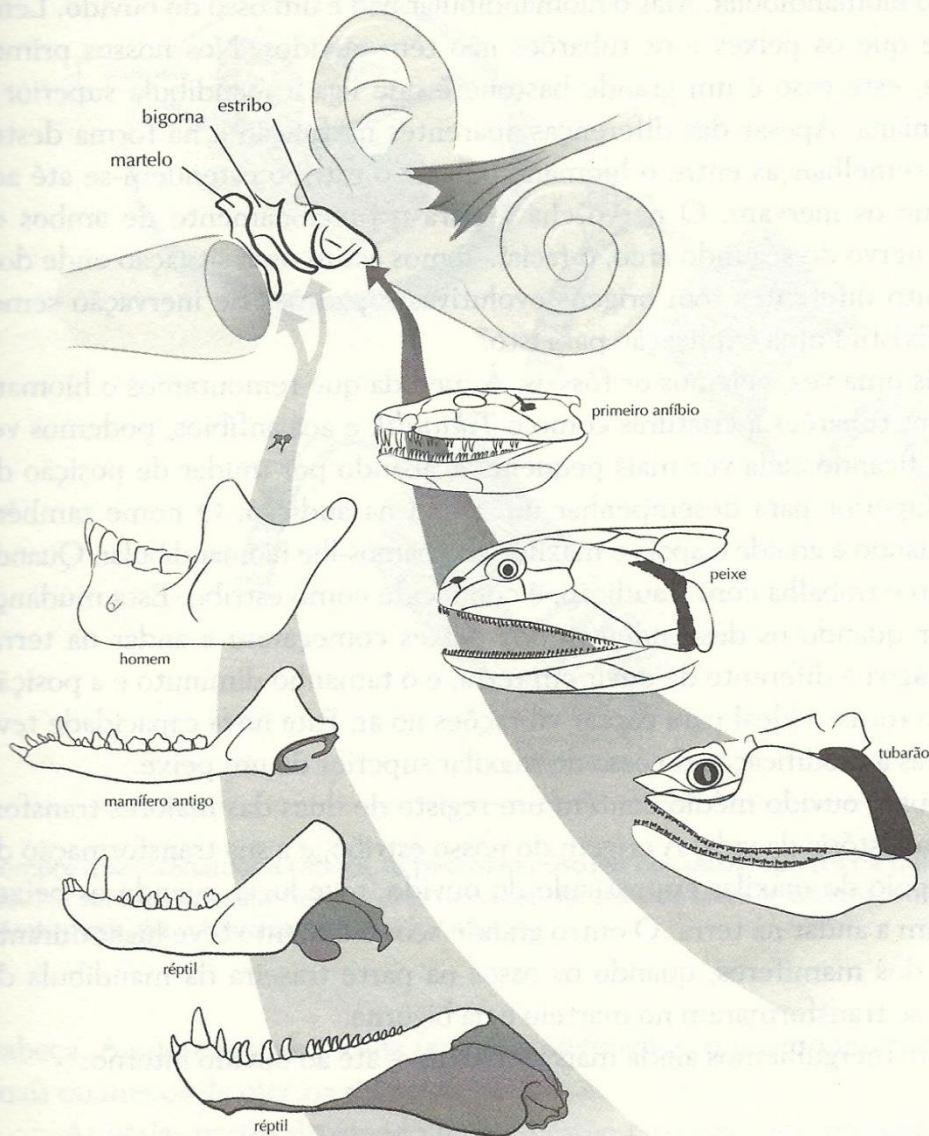
The eardrum is tilted at an angle of about  $55^\circ$  to the ear canal. It has an average thickness of about 0.074 mm, and is a bit taller ( $\approx 9\text{--}10\text{ mm}$ ) than it is wide ( $\approx 8\text{--}9\text{ mm}$ ).

# O ouvido médio

Osso	Dimensão (mm)	Massa (mg)
Martelo	8-9	25
Bigorna	7	30
Estribo	3.5 Platina $\sim 3.2\text{mm}^2$	3-4







Uma curiosidade relativamente aos

ossículos do ouvido médio:

os mamíferos têm três ossos, ao passo que os répteis [, as aves] e os anfíbios têm apenas um e os peixes não têm nenhum.

O nosso ouvido médio contém um registo de duas das maiores transformações na história da vida.

Os ossos da parte traseira da mandíbula que eram utilizados originalmente pelos répteis para mastigar evoluíram nos mamíferos para auxiliar a audição, transformando-se no martelo e na bigorna.

A origem do nosso estribo, e a sua transformação de osso de apoio do maxilar em ossículo do ouvido, teve lugar quando os peixes começaram a andar na terra. Ouvir na água é diferente de ouvir em terra, e o tamanho diminuto e a posição do estribo torna-o ideal para captar vibrações no ar.

Quando éramos peixes – Neil Shubin, 2008

Podemos remontar os ossos dos ouvidos até aos arcos branquiais, primeiro durante a transição dos peixes para os anfíbios (direita) e mais tarde durante a mudança de répteis para mamíferos (esquerda).

# O ouvido médio

## Para que serve?

In direct conduction most of the incident sound would be reflected, and very little would be transmitted for analysis by the cochlea.

Acoustically, the oval window and the cochlear fluid can be approximated as being the same as water.

[...] the fraction of sound intensity transmitted into the cochlea is  $\sim 0.11\%$ .

$10 \log_{10}(I_{\text{coupled}}/I_{\text{in}}) = 10 \log_{10} 0,011 = 10 \times 2.95 = 29.5 \text{ dB}$ , or about a 30 dB loss – which is very big indeed.

**Em pessoas com ausência das estruturas do ouvido médio, a perda de audição é de cerca de 30 dB.**

# O ouvido médio

## Para que serve?

One mechanism of middle ear conduction is the transmission of the force on the large area eardrum

(of total area  $\sim 85\text{mm}^2$ , of which only  $2/3$  of the area vibrates, so its effective area is  $A_e \sim 55\text{mm}^2$ ) to the stapes, which has a smaller area ( $A_s \sim 3.2\text{mm}^2$ ) in contact with the oval window.

The force on the eardrum is  $F_e = P_e A_e$ , where  $P_e$  is the sound pressure on it.

If this force is directly transmitted to the stapes then

$$F_e = P_e A_e = F_s = P_s A_s$$

$$P_s = A_e / A_s P_e = 55 / 3.2 P_e = 17 P_e$$

# O ouvido médio

Para que serve?

Mas

the ossicular chain [...] is such that the chain acts as a lever, in which torques – and not forces – are actually transmitted to the oval window.

With the first lever arm being  $L_1$  and the second  $L_2$ , torque balance gives

$$F_e L_1 = F_s L_2 \text{ and } P_e A_e L_1 = P_s A_s L_2$$

or

$$P_s = \frac{A_e}{A_s} \frac{L_1}{L_2} P_e = (17)(1.3) P_e = 22 P_e,$$

These two mechanisms in the middle ear improve conduction of sound by  $20 \log_{10}(P_s/P_e) = 20 \log_{10} 22 = 27 \text{ dB}$ .

**This is roughly equal to the 30 dB loss that is incurred by reflection losses from air to the cochlea;  
this near-equality may just be a coincidence of nature.**

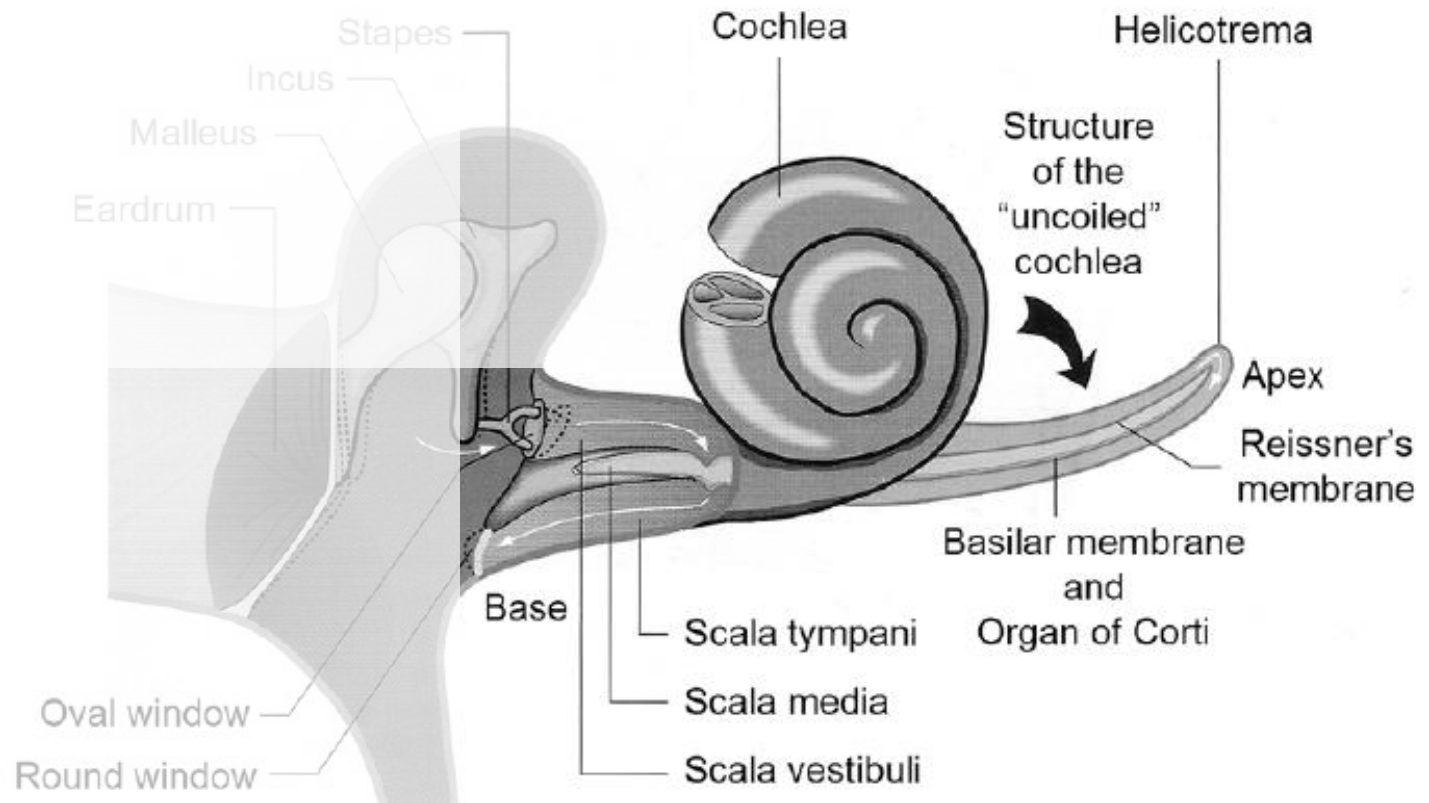
# O ouvido interno

O ouvido interno é uma estrutura muito complexa e está dividida em três partes: a cóclea ou caracol, o vestíbulo e os canais semicirculares. É constituído por dois labirintos, um ósseo e outro membranoso, ambos contendo líquido. Os canais semicirculares, estão ligados ao sentido do equilíbrio, e a cóclea, faz a transdução dos impulsos de pressão ou energia mecânica em sinais elétricos que são enviados ao cérebro através do nervo auditivo.

O contacto entre o ouvido médio e o interno é feito por duas membranas que são as janelas oval e redonda.

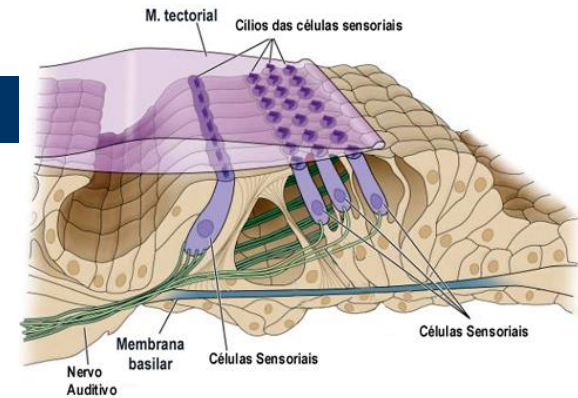
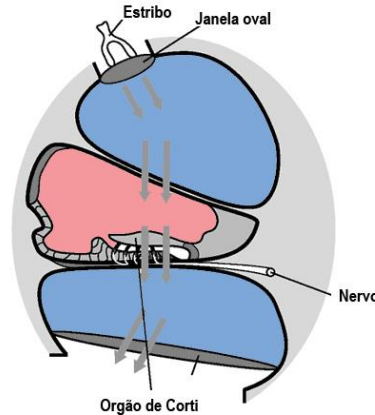
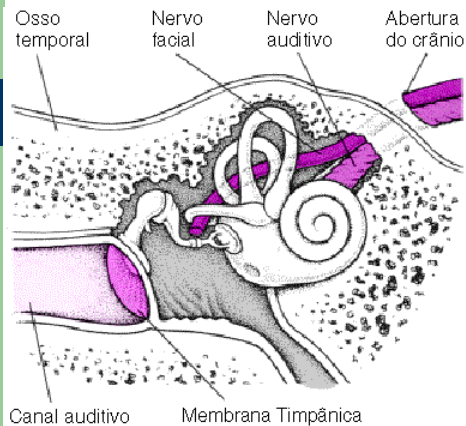


# O ouvido interno

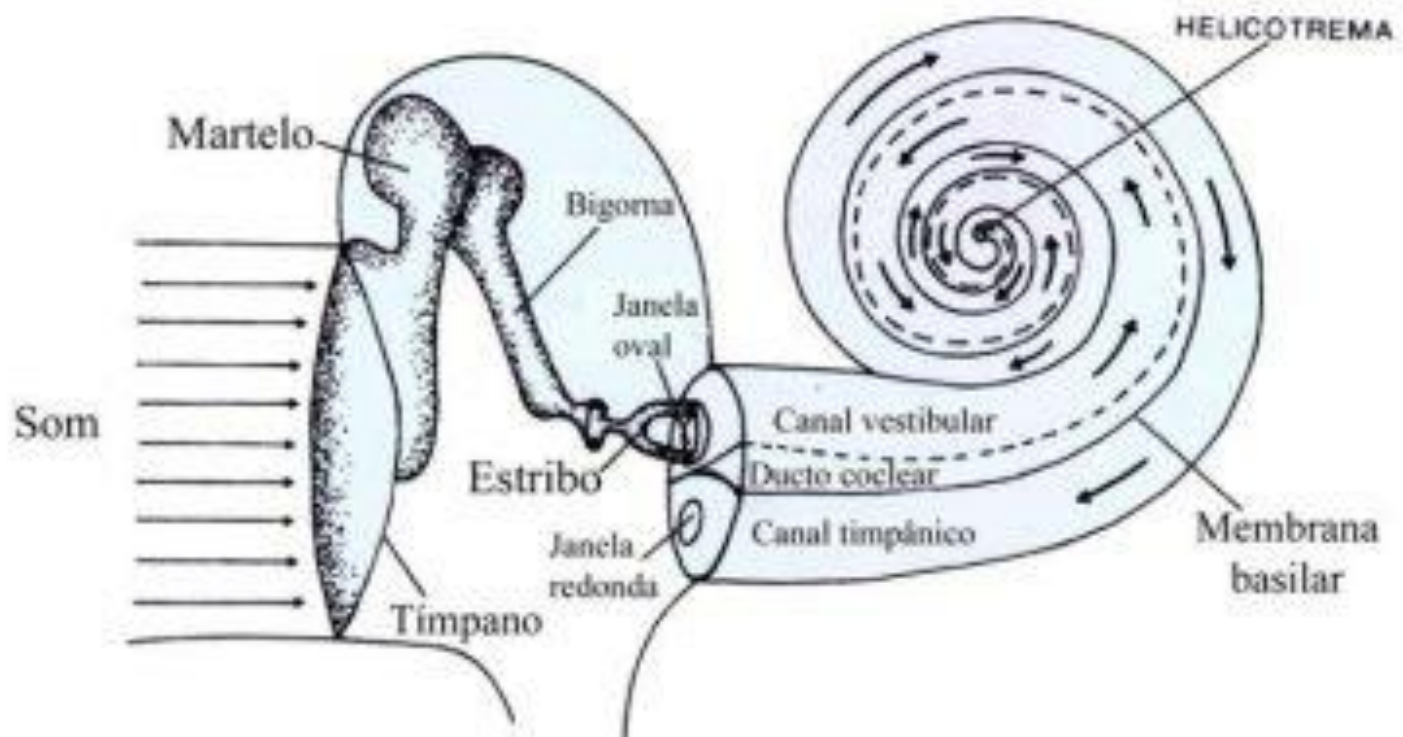


**Fig. 10.27.** Middle ear in detail and visualization of partial and total uncoiling of the cochlea. The cut in the partially uncoiled cochlea shows the cross-section of the tubes, which is seen in more detail in Fig. 10.32. (From [497])





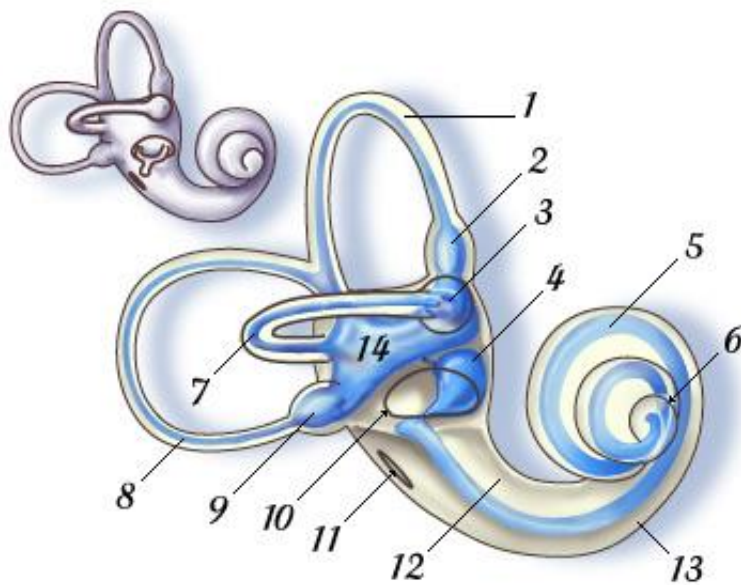
O ouvido interno é um órgão extremamente frágil e por isso está alojado na porção petrosa do osso temporal, ficando assim protegido contra perturbações exteriores e possíveis traumatismos.





# O ouvido interno

a cóclea ou caracol, o vestíbulo e os canais semicirculares.



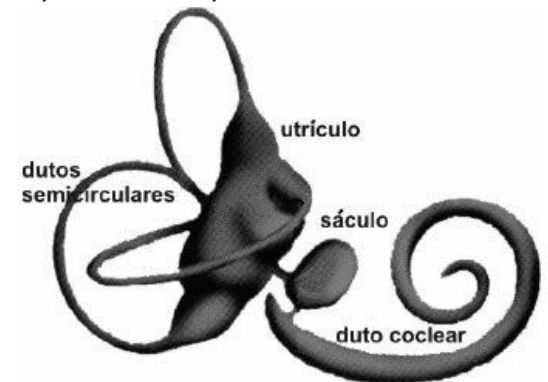
© S. Blatrix/CRIC 99

1. Anterior semicircular canal
2. Ampulla (superior canal)
3. Ampulla (lateral canal)
4. Sacculus
5. Cochlear duct
6. Helicotrema
7. Lateral (horizontal) canal
8. Posterior canal
9. Ampulla (posterior canal)
10. Oval window
11. Round window
12. Vestibular duct (scala vestibuli)
13. Tympanic duct (scala tympani)
14. Utricule

O **labirinto ósseo** tem uma forma muito complexa constituída por canais, túneis e cavidades que estão ligados entre si. A grande vantagem da complexidade da forma do labirinto ósseo, parece ser a de evitar a ressonância a uma determinada frequência, o que poderia destruir o ouvido interno.

O labirinto ósseo está dividido em três partes: o vestíbulo, os canais semicirculares e a cóclea ou caracol.

O **labirinto membranoso** é constituído por: utrículo, sáculo, ducto coclear e os três ductos semicirculares.



# O ouvido interno

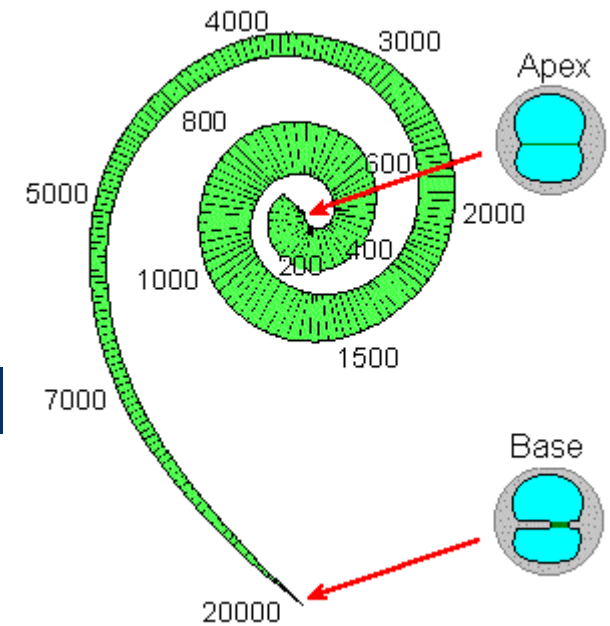
[http://telecom.inescn.pt/research/audio/cienciaviva/index\\_audicao.htm](http://telecom.inescn.pt/research/audio/cienciaviva/index_audicao.htm)

### Mecanismo do ouvido interno:

Uma vez que o martelo se encontra solidário com o tímpano, a onda sonora de compressão/rarefação, ao colocar o tímpano em movimento vai transmitir esse movimento à cadeia ossicular.

O estribo movimenta-se e como se encontra preso à membrana da janela oval transmite a onda através dos líquidos do ouvido interno, percorrendo todo o caracol começando na rampa vestibular e acabando na rampa timpânica. A onda que percorre o caracol é designada de onda hidráulica.

A onda acaba por se dissipar na membrana da janela redonda que funciona como amortecedor evitando assim a sua reflexão.



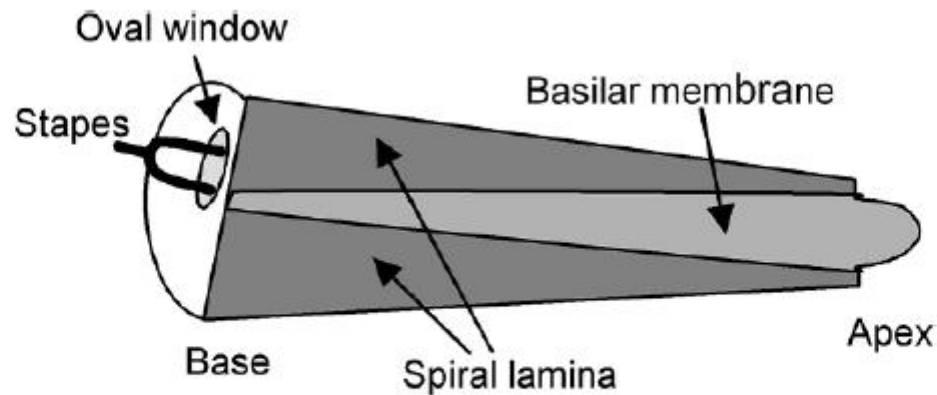
<http://www.cs.indiana.edu/~port/teach/641/hearing.for.linguists.html>

A cóclea vai-se tornando mais estreita desde a janela oval para o helicotrema e a membrana basilar vai tornando-se mais larga, mais flácida e menos tensa. O tipo de vibração da membrana basilar depende da elasticidade e dimensões.

Quanto ao estreitamento progressivo da membrana basilar ver figura 20.19 do Henrique e ainda figura 10.35 de Herman.

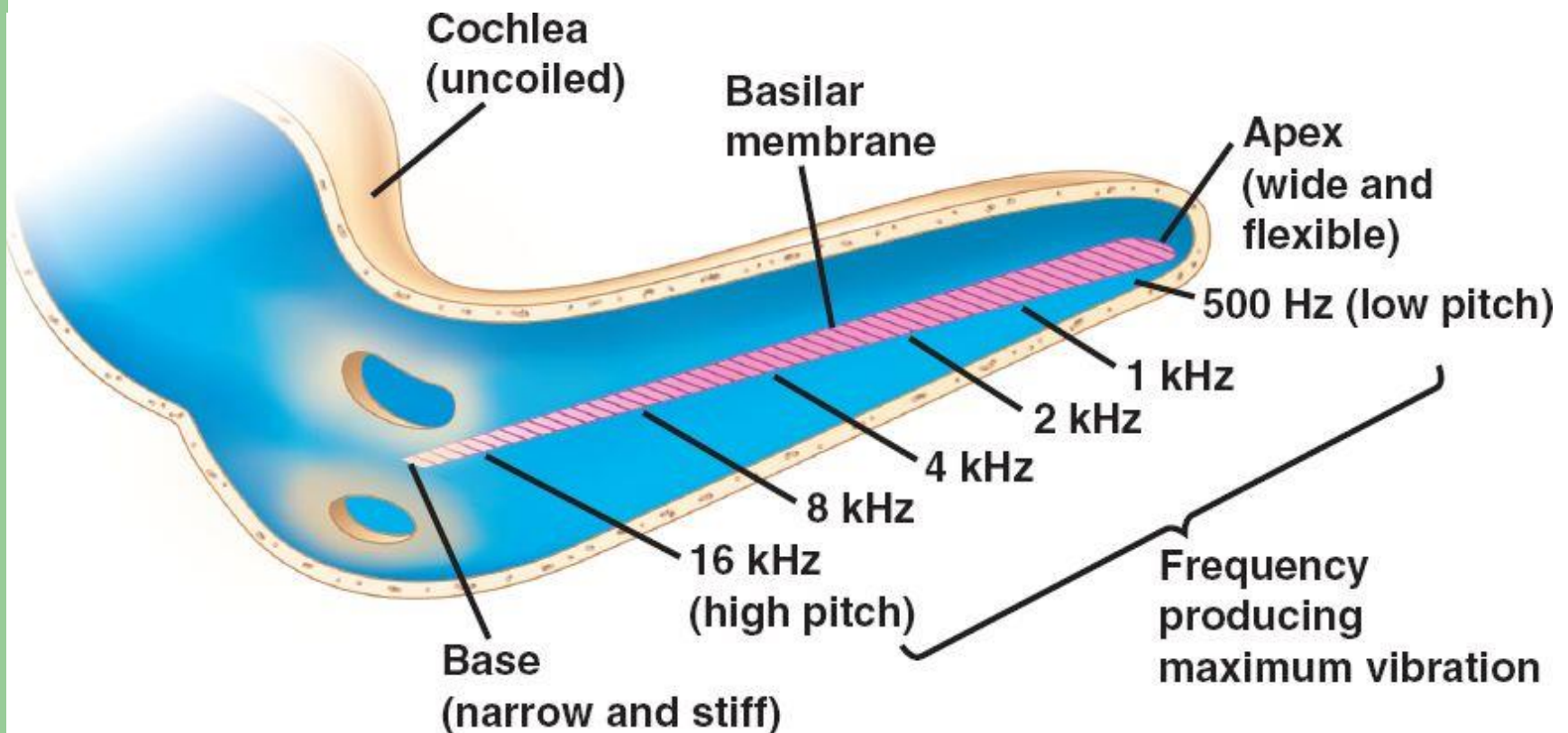
A frequência própria de vibração da membrana basilar diminui da janela oval para o helicotrema devido às suas características de massa e rigidez, pois quanto maior for a massa de um corpo menor será a sua frequência própria de vibração e daí a membrana basilar responder melhor a grandes frequências junto à base e a pequenas frequências no helicotrema.

# O ouvido interno

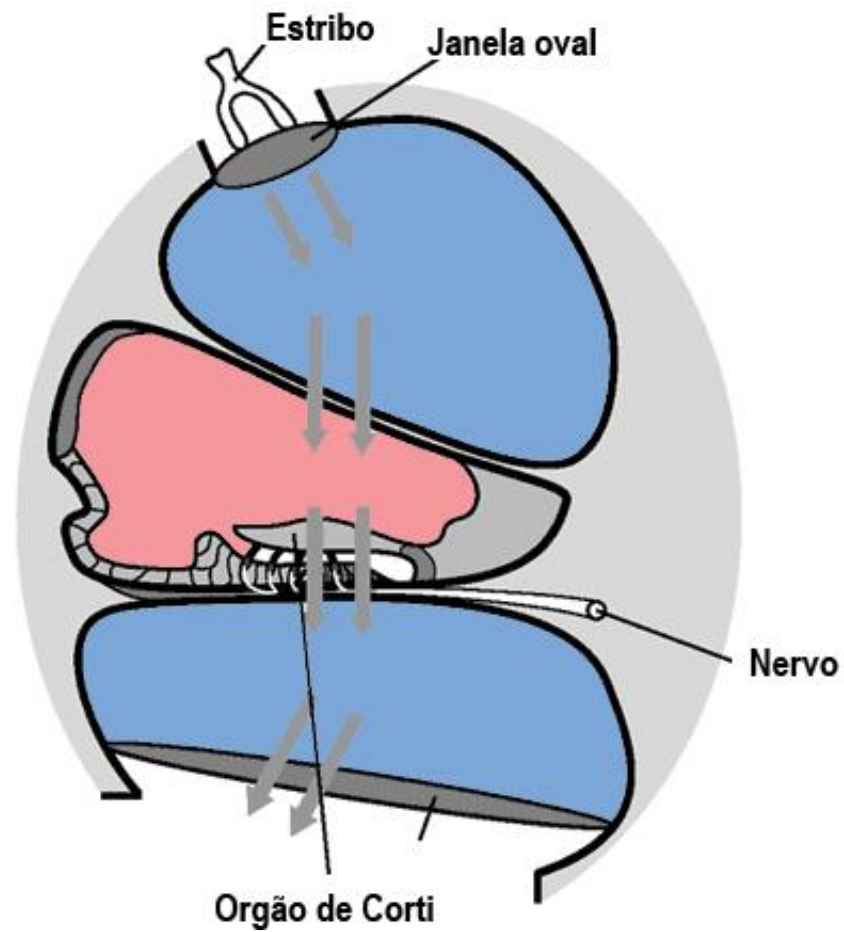


**Fig. 10.35.** The uncoiled cochlea gets narrower from the base at the stapes to the apex, as the basilar membrane gets wider. (Based on [472, 498])

<http://bio1151b.nicerweb.net/Locked/media/ch49/basilar.html>

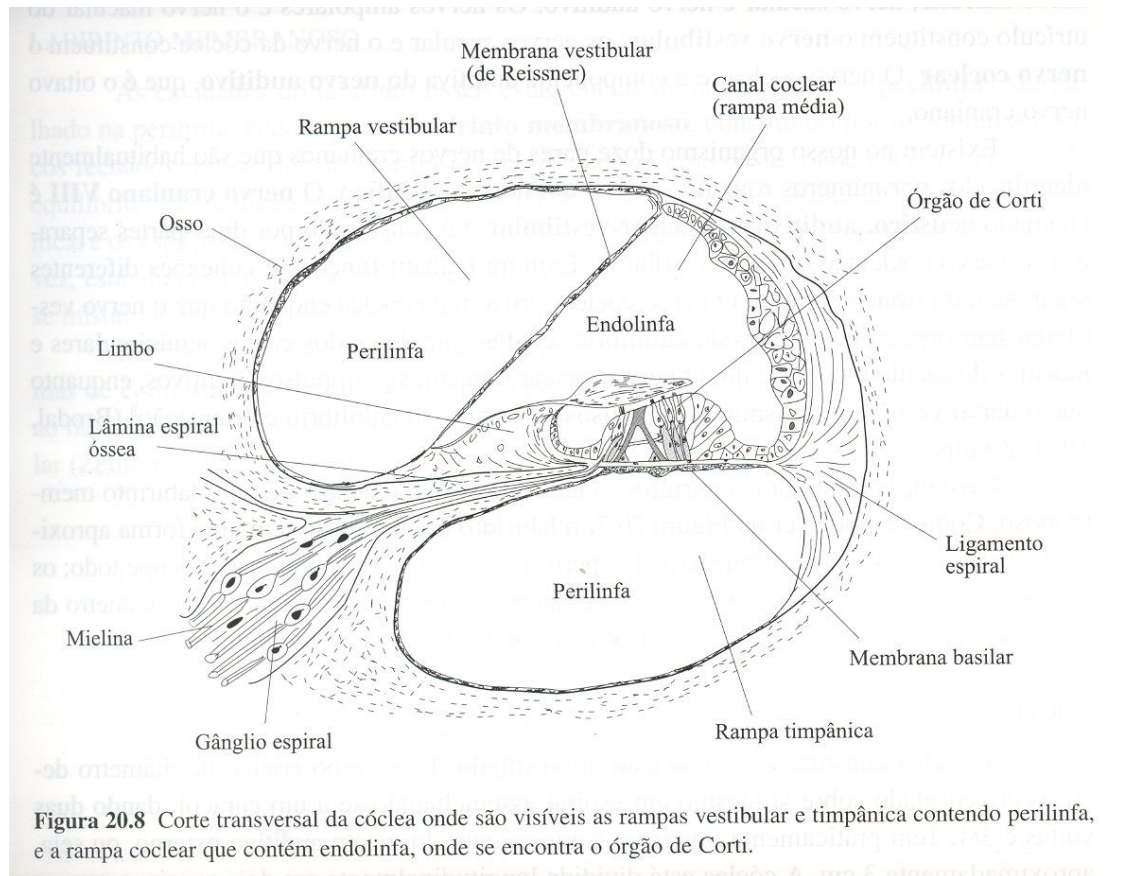


# O ouvido interno

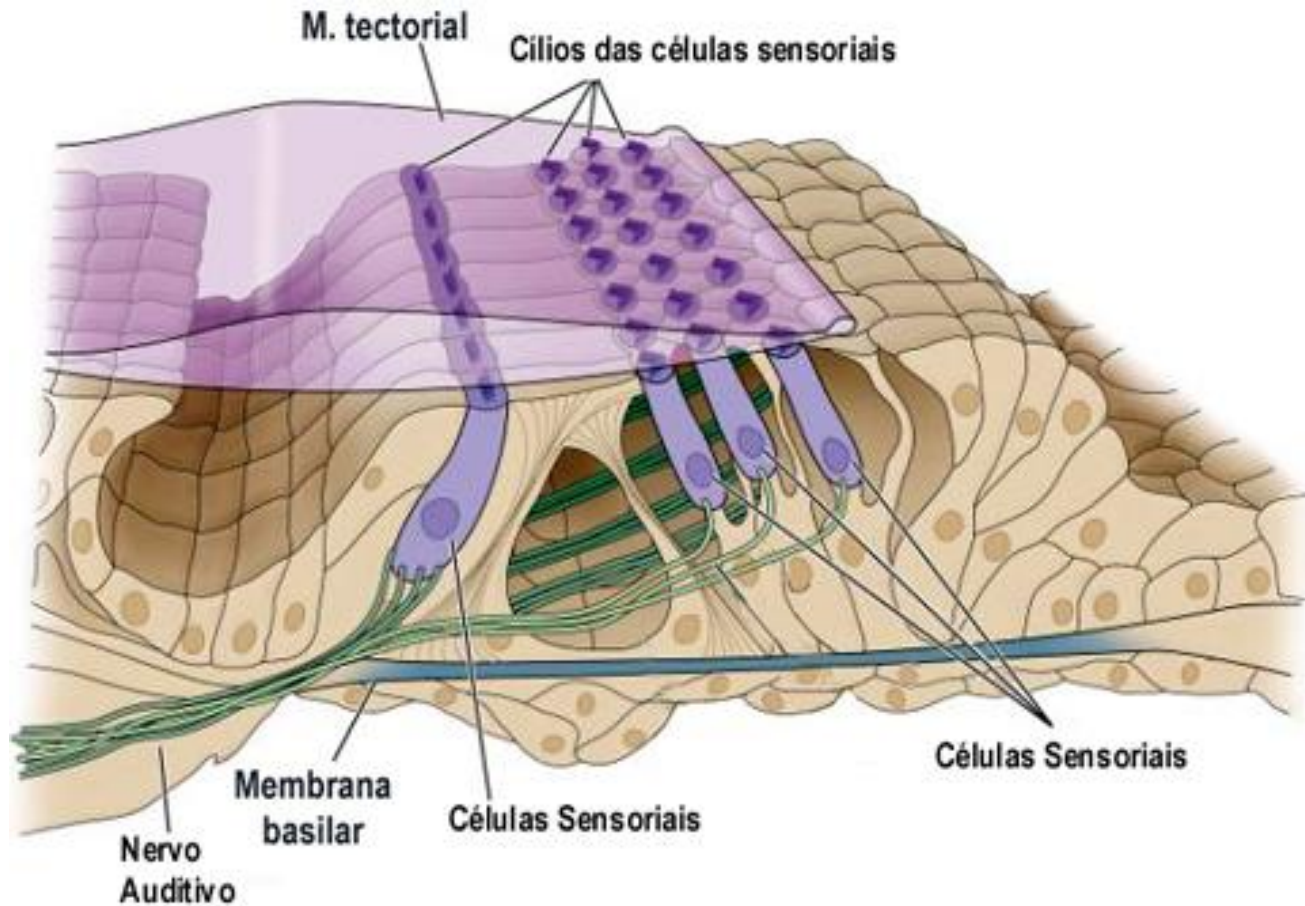




# O ouvido interno

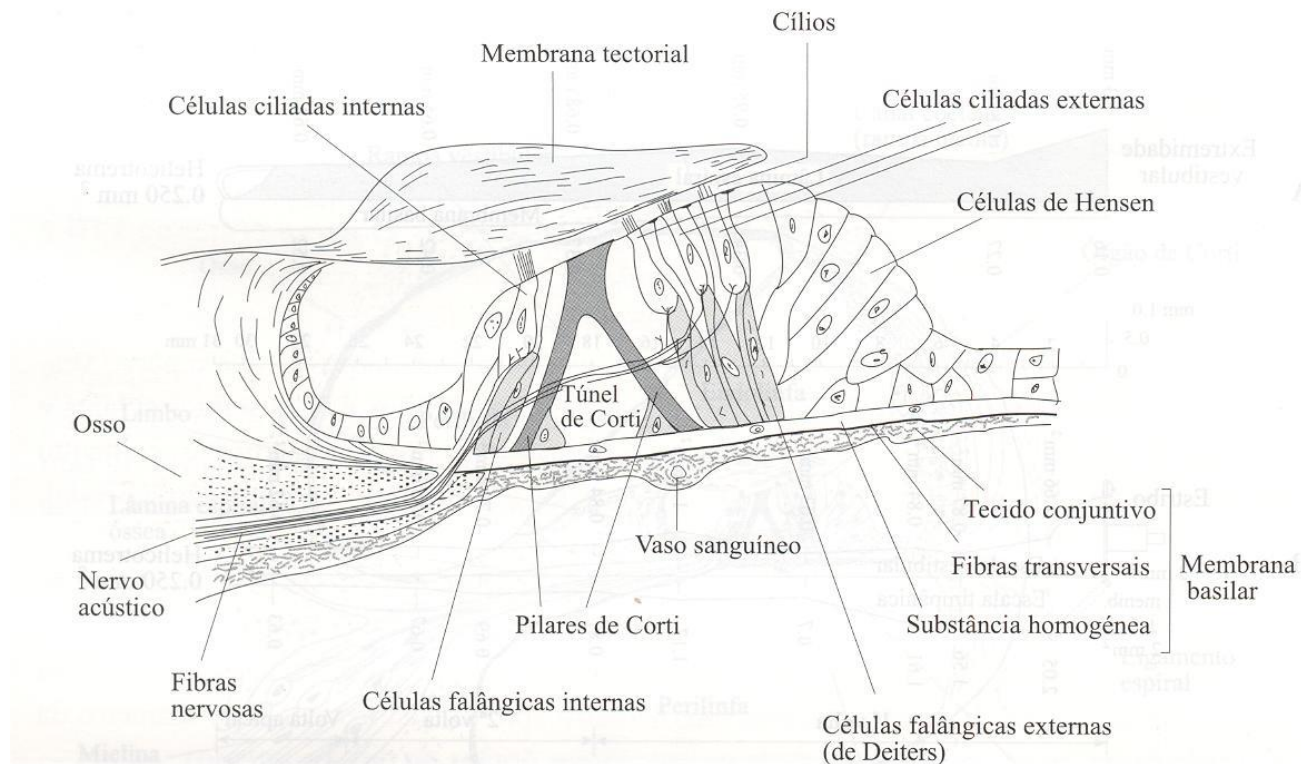


# O ouvido interno



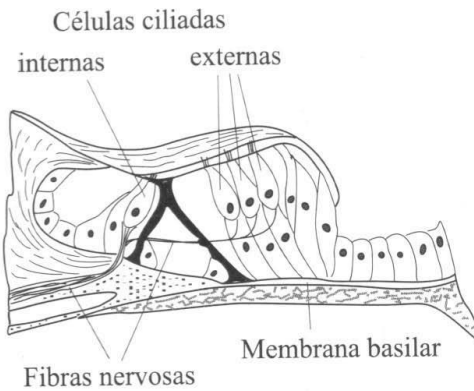
# O ouvido interno

(Zemlin, 1988).

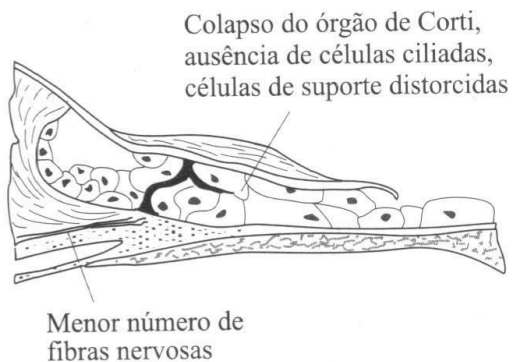
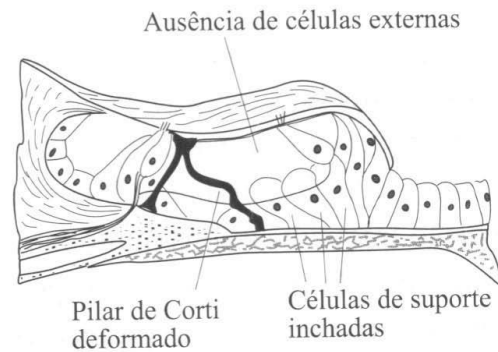


**Figura 20.10** Órgão de Corti e estruturas associadas contidas no canal coclear.

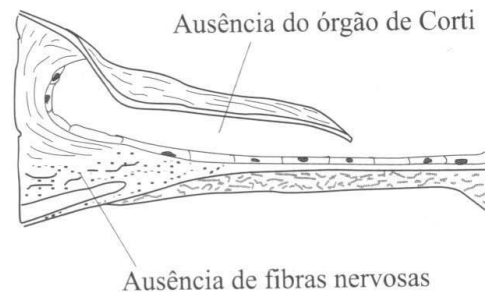
# O ouvido interno

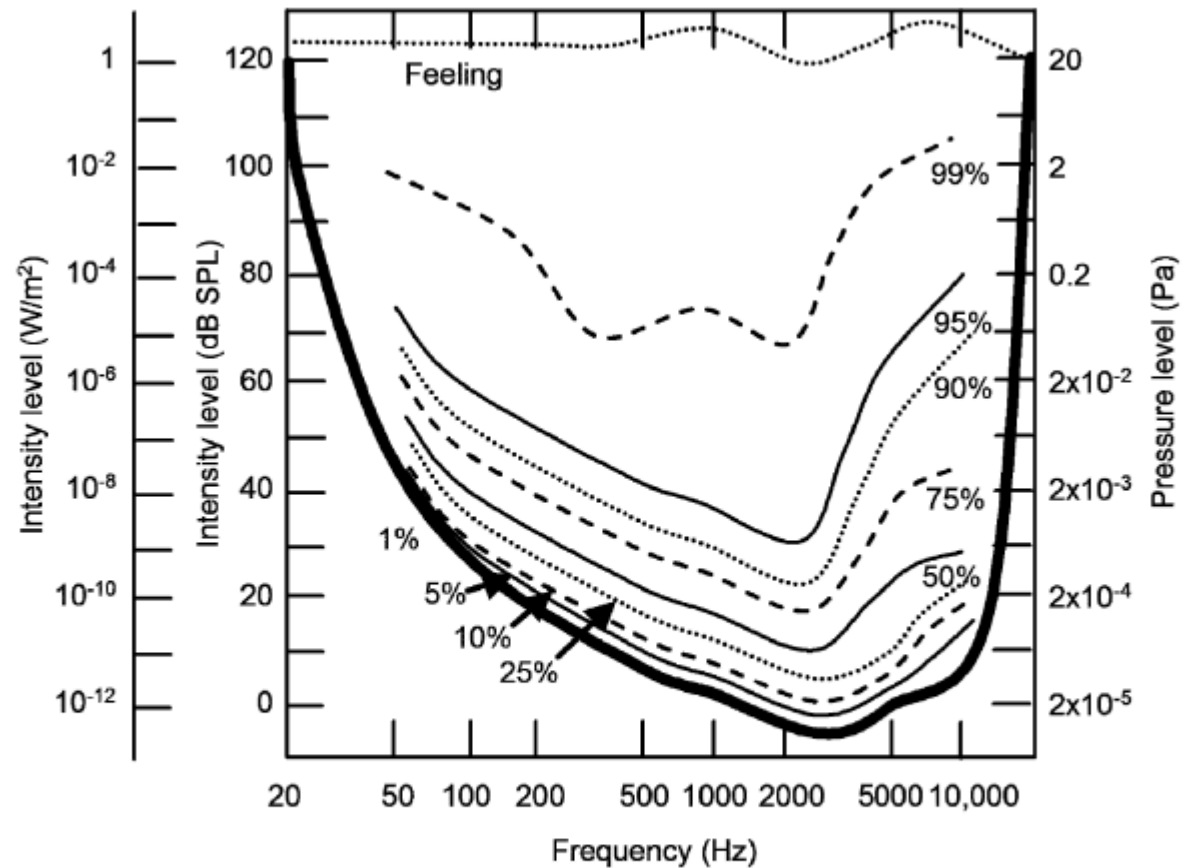


B



D





**Fig. 10.29.** Absolute auditory threshold for typical US residents. The curves show the percentage of people who could hear sounds below the level of the curve; the top curve shows the threshold for “feeling” in the ear. (Based on [461])