

## ESTRUTURA E FUNÇÃO DO SISTEMA AUDITIVO PERIFÉRICO

Lais Vieira Bonaldi  
Sergio Ricardo Marques

### INTRODUÇÃO

O sistema auditivo é constituído por estruturas sensoriais e conexões centrais responsáveis pela audição. Esse sistema pode ser referido em duas porções distintas, inter-relacionadas, definidas como sistema auditivo periférico e sistema auditivo central. A porção periférica compreende estruturas da orelha externa, da orelha média, da orelha interna e do sistema nervoso periférico (nervo vestibulococlear)<sup>1</sup> (Figura 1). O sistema auditivo central refere-se às vias auditivas localizadas no tronco encefálico e nas áreas corticais.<sup>2</sup> (Para maiores informações sobre o assunto, consultar o Capítulo 2, "Sistema auditivo central".)

O sistema auditivo periférico envolve a captação e a transmissão pela orelha e meato acústico externo das vibrações de moléculas em faixas de frequência audível que geram a onda sonora (orelha externa), a transdução do som na membrana timpânica, cadeia ossicular e músculos intratimpânicos (orelha média) e o processamento da informação auditiva na cóclea e porção coclear do nervo vestibulococlear (orelha interna e sistema nervoso periférico).

Nesse processo, a sensibilidade da orelha humana permite a captação de sons cujas frequências variam na faixa entre 20-20.000 Hz, independentemente da presença visual do objeto. As frequências infrassônicas (abaixo de 20 Hz) não são detectadas pela orelha humana, mas são percebidas pelo cérebro via crânio, mandíbula e pele, de-

sempenhando papel importante na percepção musical. As vibrações ultrassônicas (acima de 20.000 Hz) são inaudíveis pela orelha humana, mas são utilizadas por animais como morcegos e golfinhos para ecolocalização de objetos. A audição humana é mais sensível às frequências na faixa de 1.500-4.000 Hz, que envolvem diretamente a fala.<sup>3</sup> (Para maiores informações sobre o assunto, consultar o Capítulo 4, "Biofísica da audição, psicoacústica e bases para a audiológica".)

As estruturas periféricas relacionadas à audição estão localizadas na região temporal da cabeça, constituída pelo osso temporal (termo derivado do latim *tempus*). O osso temporal<sup>4</sup> apresenta relações ósseas com o restante do crânio e pode ser dividido em quatro partes que se destacam: parte escamosa, parte timpânica, parte mastoidea e parte petrosa.

Essas estruturas, quando avaliadas por meio de uma metodologia de projeto axiomático para analisar acoplamentos entre si e verificar se o projeto da orelha humana é um projeto bom (desacoplado) ou ruim (acoplado), revelaram que a orelha humana é um projeto perfeito (estrutura desacoplada) e de baixo custo.<sup>5</sup> Os materiais utilizados para construir o átomo-por-átomo são principalmente carbono, hidrogênio, oxigênio, cálcio e nitrogênio, materiais de custo insignificante que, após a morte, são reciclados pela natureza. Portanto, em termos de desempenho, o projeto da orelha humana se destaca como inspiração para projetos de produtos em ambientes industriais.

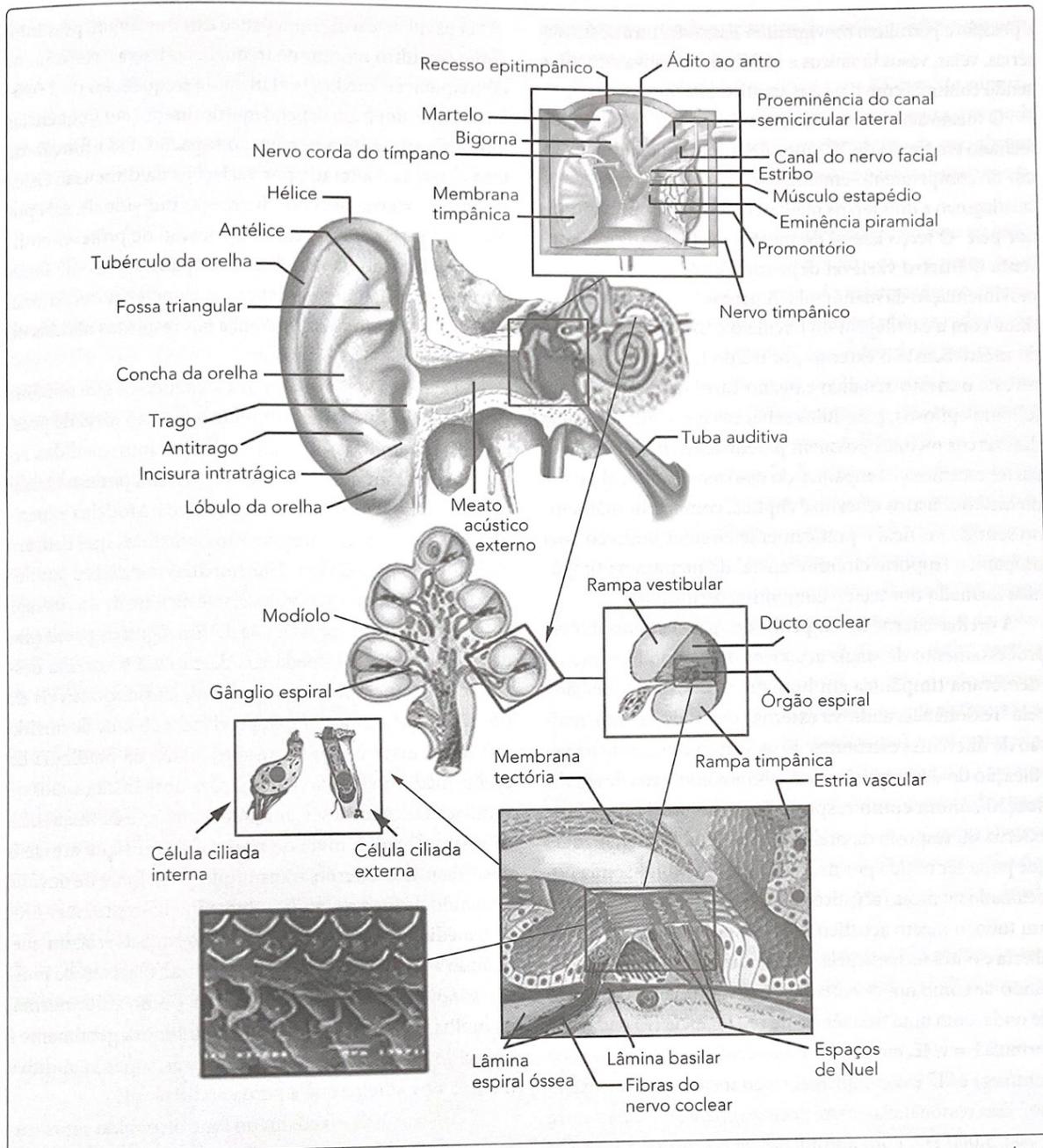


FIGURA 1 Estrutura periférica da audição: orelha externa, orelha média e orelha interna (estruturas cocleares e nervo coclear).  
Fonte: adaptada de Bonaldi et al., 2004.<sup>1</sup>

## ORGANIZAÇÃO PERIFÉRICA DA AUDIÇÃO

### Orelha externa

A orelha externa<sup>1</sup> é constituída pelo pavilhão auricular (orelha) e pelo meato acústico externo (parte cartilaginosa e óssea).

O pavilhão auricular é uma estrutura de cartilagem flexível, com 60-65 mm de altura por 25-35 mm de largura, formada pelas seguintes saliências e depressões: hélice, tubérculo da orelha, concha da orelha, antélice, fossa triangular, escava, trago, incisura antitrágica e lóbulo (porção inferior desprovida de cartilagem e constituída por tecido adiposo recoberto por pele). A lâmina fibrocartilaginosa que forma a orelha é recoberta por pele, ligamentos e músculos que mantêm sua forma

e posição e permitem movimentos. Essa estrutura possui artérias, veias, vasos linfáticos e inervação sensitiva e motora, sendo contínua com o meato acústico externo.

O meato acústico externo,<sup>6</sup> estruturalmente, é um tubo fechado em forma de "S", apresenta aproximadamente 2,8 cm de comprimento em adultos, possui um terço lateral cartilágneo e dois terços mediais ósseos, ambos revestidos por pele. O terço lateral do meato acústico externo apresenta diâmetro variável dependendo de fatores como a movimentação da mandíbula. A parede cartilágnea é contínua com a cartilagem do pavilhão e fixada à parte óssea do meato acústico externo por tecido fibroso. A pele que reveste o meato acústico externo cartilágneo apresenta folículos pilosos, glândulas sebáceas e ceruminosas. Os dois terços mediais possuem parede óssea pertencente às partes escamosa e timpânica do osso temporal. A abertura do meato acústico externo é elíptica, com maior diâmetro no sentido vertical e praticamente circular junto ao anel timpânico (suporte circunferencial da membrana timpânica formado por tecido conjuntivo ossificado).

A orelha externa desempenha um papel importante no processamento de sinais acústicos do campo livre para a membrana timpânica em humanos, função evidenciada pela "ressonância auditiva externa", derivada da contribuição de diferentes estruturas. Essa função é utilizada na verificação do desempenho de aparelhos auditivos de amplificação sonora como resposta de ressonância da orelha externa ou resposta da orelha não ocluída (Reur), medida que pode ser obtida por meio de um microfone-sonda posicionado no meato acústico externo. Por ser essencialmente um tubo, o meato acústico externo tem uma extremidade aberta e outra fechada pela membrana timpânica, comportando-se como um ressonador de comprimento de quarto de onda, com uma frequência de ressonância (F) dada pela fórmula  $F = v/4L$ , em que "v" é a velocidade do som (340.000 mm/seg) e "L" é o comprimento do meato acústico externo.<sup>7</sup> Essa ressonância ocorre principalmente na região entre 2.700-3.000 Hz, com amplitudes entre 10-20 dB, sendo descrita uma segunda ressonância em torno de 5.500 Hz relacionada ao volume da concha e, por vezes, ao comprimento e ao formato do meato acústico externo. Portanto, características anatômicas individuais podem ser impactantes na adaptação de aparelhos auditivos quando consideradas as vantagens nos níveis de pressão sonora que atingem o microfone com e sem a oclusão da concha da orelha. (Para maiores informações sobre o assunto, consultar o Capítulo 34, "Verificação e avaliação de resultados no processo de seleção e adaptação de dispositivos eletrônicos de amplificação sonora".)

O pavilhão e o meato acústico externo atuam, portanto, como um filtro redutor de frequências baixas, ressonador de frequências médias (ênfase em frequências de 2.000-7.000 Hz) e um filtro dependente de direção em frequências altas que aumenta a percepção espacial. Essa função de transferência é alterada por variações na dimensão física da orelha externa, seja por diferenças individuais, seja por obstruções mecânicas, como colocação de próteses auditivas, perfuração da membrana timpânica e uso de fones de ouvido.<sup>8</sup> Qualquer mudança nas características do sinal acústico pode produzir diferença nas respostas obtidas no indivíduo ou entre indivíduos.

Na avaliação clínica da audição, supõe-se que um fone de ouvido produz essencialmente o mesmo nível de pressão sonora em todas as orelhas. No entanto, medidas recentes mostram que variações de pressão podem causar erros nos resultados dos testes auditivos. Modelos experimentais identificam mecanismos acústicos que causam variações de pressão em determinadas condições patológicas e definem que nenhuma classe de fone de ouvido age como uma fonte de pressão ideal.<sup>9</sup> Em algumas patologias de orelha média, a impedância de entrada da orelha desvia-se substancialmente do normal, causando níveis de pressão sonora anormais. Dependendo do fone de ouvido utilizado (inserção ou supra-auricular), da patologia da orelha média analisada (perfurações timpânicas, tubos de ventilação e cavidades de mastoidectomia) e da frequência de estimulação, o nível de pressão sonora que atinge o meato acústico externo, transmitido pelos fones de ouvido, é captado de forma significativamente diferente entre orelhas médias normais e patológicas. Pesquisas relatam que, quando a orelha média não está normal, os níveis de pressão sonora podem diferir em até 35 dB do valor normal da orelha.<sup>10</sup> Como o nível de pressão sonora geralmente é reduzido nessas condições patológicas, a perda auditiva medida seria maior que a perda auditiva real.

A conexão entre o coxim do fone de ouvido supra-auricular e o pavilhão pode não selar efetivamente para frequências abaixo de 250 Hz, e vazamentos acústicos podem causar variações de pressão descontroladas durante os testes auditivos. Os níveis de pressão sonora no meato acústico externo gerados por fones circum-auriculares, supra-auriculares e de inserção também diferem quando acoplados às orelhas adulta e infantil normais. As pressões sonoras geradas por esses diferentes tipos de fones de ouvido dependem das dimensões do meato acústico externo, da impedância da orelha na membrana timpânica e do local do meato acústico externo no qual são medidas (local de saída do fone de ouvido ou membrana timpânica). Com

fonos de ouvido circum-auriculares e supra-auriculares, as diferenças na pressão sonora gerada nas orelhas infantis e adultas são geralmente menores que aquela com o fone de ouvido de inserção, no qual as mudanças nas dimensões do meato acústico externo e a impedância na membrana timpânica têm um efeito maior na carga que o fone de ouvido deve conduzir.<sup>11</sup>

Com o envelhecimento, ocorrem algumas modificações na orelha externa que podem influenciar na avaliação e intervenção auditivas, tais como perda de elasticidade, redução da camada de gordura, fragilidade da pele, estreitamento do meato acústico externo, maior produção de cerume, crescimento capilar no meato acústico externo e aumento do tamanho do pavilhão.

## Orelha média

A orelha média é representada pela cavidade timpânica,<sup>12</sup> um espaço irregular, comparado à forma de um hexágono, escavado no osso temporal, preenchido por ar e revestido pela túnica mucosa timpânica, que transmite o som da orelha externa para a orelha interna. As paredes da cavidade timpânica representam seus limites e apresentam vários detalhes anatômicos<sup>1</sup> (Quadro 1). A parede lateral é representada pela membrana timpânica e a parede medial, principalmente pela janela do vestíbulo (oval) e da cóclea (redonda). Destacam-se ainda relações com a fossa média craniana (parte superior), com a veia jugular (parede inferior), com a artéria carótida interna (parede anterior) e com o antro mastóideo (parede posterior).

A membrana timpânica,<sup>1</sup> sendo a extremidade lateral da cavidade timpânica, separa a orelha externa da orelha média e transmite o som captado pelo pavilhão e meato

acústico externo às estruturas da orelha média e, sequencialmente, à orelha interna.

É uma estrutura translúcida com 85 mm<sup>2</sup> de superfície, 10 mm de diâmetro e 0,1 mm de espessura que pode ser descrita em duas partes: parte flácida da membrana timpânica (*membrana de Shrapnell*) e parte tensa da membrana timpânica.

A parte flácida está fixada diretamente ao osso e é constituída apenas por pele e túnica mucosa. A parte tensa prende-se à extremidade medial do meato acústico externo por meio do anel timpânico e apresenta fibras radiais, circulares, transversas e parabólicas. É formada por três camadas (pele, camada fibrosa e túnica mucosa), sendo responsável pela compliância da membrana e pela transmissão de vibração para a orelha média. A tensão da membrana e consequente transmissão de vibrações sonoras ocorre porque o cabo do martelo encontra-se firmemente aderido às fibras da camada fibrosa, sendo constantemente tracionado por ligamentos e pelo músculo tensor do tímpano.

A membrana timpânica pode ser dividida em quatro quadrantes (posterossuperior, posteroinferior, anterossuperior e anteroinferior) por meio de uma linha vertical imaginária passando pelo cabo do martelo e pelo umbigo da membrana timpânica (local de fixação da extremidade livre do martelo no centro da membrana) e outra perpendicular a essa, também passando pelo umbigo. O arranjo de fibras do quadrante anteroinferior não é tão denso, e, pelo fato de a membrana ser côncava, nessa região aparece uma zona brilhante de aspecto triangular por reflexão dos raios luminosos durante o exame otoscópico, denominada “cone de luz” ou “triângulo luminoso”.

A densidade e a tensão da membrana timpânica variam conforme o local analisado, pois é composta de diferentes

QUADRO 1 Principais detalhes anatômicos da cavidade timpânica

Membranácea (lateral)	Paredes da cavidade timpânica				
	Labiríntica (medial)	Tegmental (superior)	Jugular (inferior)	Carótica (anterior)	Mastóidea (posterior)
Membrana timpânica	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Janela do vestíbulo (selada pela base do estribo).</li> <li>▪ Promontório.</li> <li>▪ Janela da cóclea (fechada pela membrana timpânica secundária).</li> <li>▪ Proeminência do canal facial.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Lâmina óssea que separa a cavidade timpânica da fossa média do crânio (tegme timpânico).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Lâmina óssea sobre a fossa jugular e o bulbo superior da veia jugular interna.</li> <li>▪ Abertura para a passagem do ramo timpânico do nervo glossofaríngeo.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Lâmina óssea entre a cavidade timpânica e a artéria carótida interna.</li> <li>▪ Semicanal para o músculo tensor do tímpano.</li> <li>▪ Semicanal da tuba auditiva.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Ádito ao antro mastóideo (abertura para o antro mastóideo).</li> <li>▪ Fossa para a bigorna (recesso com o ramo curto da bigorna).</li> <li>▪ Eminência piramidal (contém o músculo estapédio).</li> </ul>

camadas, cujo número varia de um lugar para outro, o que torna sua vibração complexa, diferente das vibrações de uma única membrana, como um tambor. Várias abordagens de bioengenharia têm sido aplicadas na modelagem da membrana timpânica, pois alterações em sua estrutura e propriedades mecânicas devido a doenças ou danos na orelha média podem influenciar na transmissão sonora. Estudos obtidos em membranas de cadáver humano demonstram que a pressão da cavidade timpânica e a impedância na membrana timpânica estão relacionadas. A cavidade tem apenas pequenos efeitos sobre o movimento da membrana, mas pode desempenhar um papel mais importante em orelhas que apresentem patologias.<sup>13</sup> Um modelo preciso da membrana timpânica, que simule a transmissão acústico-mecânica, pode auxiliar na intervenção clínica e cirúrgica. Modelos relativamente simples foram propostos para simular vibrações da membrana timpânica.<sup>14,15</sup>

A mobilidade da membrana timpânica pode ser investigada clinicamente por meio da obtenção da curva timpanométrica, pela variação da pressão sonora introduzida na orelha externa cerca de +200 para -300 (daPa). As curvas timpanométricas padrão utilizam um tom de sonda de 226 Hz, pois a orelha média do adulto apresenta rigidez em frequências baixas e ressonância em frequências altas; no entanto, os recém-nascidos e os bebês com menos de 6 meses têm orelhas médias com frequências ressonantes mais baixas, sendo recomendado um tom de sonda de 1.000 Hz. A baixa impedância ocorre quando a pressão do ar em ambos os lados da membrana timpânica é igual, estado referido como compliância máxima, ou seja, a orelha média é teoricamente compatível com o máximo quando o volume equivalente total da cavidade é o volume combinado das orelhas externa e média.<sup>16</sup> (*Para maiores informações sobre o assunto, consultar o Capítulo 12, "Medidas de imitação acústica: timpanometria e reflexos acústicos"*.)

A cavidade timpânica contém os ossículos da audição (cadeia ossicular) articulados entre si e suspensos por ligamentos e músculos.<sup>1</sup>

A cadeia ossicular se estende da membrana timpânica (parede lateral da orelha média) à janela do vestíbulo (parede medial da orelha média) e é constituída por três ossículos: o martelo (8-9 mm), fixado à membrana timpânica; o estribo (3,3 mm, menor osso do corpo humano), fixado à janela do vestíbulo pelo ligamento estapedial anular; e a bigorna (7 mm), posicionada e articulada entre os dois anteriores. A estática dessa cadeia mantém os ossículos suspensos com pesos igualmente distribuídos entre suas extremidades e é determinada por meio de articulações, ligamentos, pregas da túnica mucosa da cavidade timpâ-

nica e músculos, denominados fatores de estática dos ossículos.

As articulações dos ossículos da audição permitem movimentos entre o martelo e a bigorna (incudomaleolar), entre a bigorna e o estribo (incudoestapedial) e entre o estribo e a janela do vestíbulo (sindesmose timpanoestapedial).

Os ligamentos dos ossículos da audição (ligamentos anterior, superior e lateral do martelo; ligamentos superior e posterior da bigorna e ligamento estapedial anular do estribo) mantêm sua fixação nas paredes da cavidade timpânica.

Os músculos dos ossículos da audição são músculos intrínsecos da orelha (intra-auriculares ou intratimpânicos) e os dois menores músculos do corpo humano. O músculo tensor do tímpano é innervado pelo nervo trigêmeo (V par craniano), e o músculo estapédio é suprido pelo nervo facial (VII par craniano). Ambos são compostos por fibras musculares estriadas esqueléticas e lisas, que apresentam contração involuntária durante a estimulação acústica para sons intensos, provocando o enrijecimento da cadeia ossicular como mecanismo de proteção da cóclea mediante estimulação excessiva (70-90 dB acima do limiar mínimo de audibilidade). A contração do músculo tensor do tímpano, inserido no cabo do martelo, produz seu deslocamento medial, tensionando a membrana timpânica, enquanto a contração do músculo estapédio, inserido na cabeça do estribo, resulta no deslocamento lateral da base do estribo em relação à janela do vestíbulo, reduzindo a tensão na endolinfa. Como efeito das contrações e tracionamentos simultâneos, ocorre aumento da rigidez do sistema e restrição do movimento da cadeia ossicular.

Com relação à movimentação do estribo, destacam-se dois tipos de vibração: um movimento de pistão para intensidades moderadas, ao longo do eixo transversal, e um deslizamento ao longo do eixo longitudinal para sons de intensidades elevadas.<sup>1</sup> Avaliando quatro variáveis de resposta medidas com estimulação acústica na membrana timpânica em cadáver humano (velocidade do estribo, pressão sonora da cavidade timpânica, impedância acústica na membrana e cavidade timpânica), obtiveram-se medições de velocidade que sugerem que o movimento de pistão do estribo é predominante para frequências até 2.000 Hz.<sup>13</sup>

A atuação reflexa desses músculos ocorre porque, quando a pressão sonora atinge determinado nível de intensidade limiar, considerando um sistema auditivo normal, um sinal aferente sensorial é enviado ao tronco encefálico, que inicia uma contração ipsilateral e contralateral do músculo estapédio na orelha média. Os valores de medida do reflexo acústico da orelha média (limiar, presença ou ausência)

podem ser obtidos e utilizados na avaliação e no diagnóstico do sistema auditivo por meio da imitanciometria, que também verifica clinicamente a impedância acústica e o volume equivalente da orelha média. *(Para maiores informações sobre o assunto, consultar o Capítulo 12, "Medidas de imitância acústica: timpanometria e reflexos acústicos".)*

A resposta limiar do reflexo ipsilateral é ligeiramente menor que a do reflexo contralateral, e o tempo de início é maior para uma resposta limiar e mais curto para uma resposta supralimiar, ou seja, à medida que a amplitude do estímulo aumenta, a latência diminui. Em alguns aspectos, o som que atinge a cóclea é menos variável que o som que atinge a membrana timpânica devido à "compressão de amplitude" através do reflexo dos músculos dos ossículos da audição.<sup>17</sup> Há uma redução do som na orelha média para a cóclea em uma faixa de sons graves (menor que 1.000 Hz), complementando a atuação do trato olivococlear por meio das fibras do núcleo olivar superior medial (trato olivococlear medial). Ao atenuar frequências baixas, esses músculos reduzem o mascaramento de frequências altas, possibilitando melhora na discriminação da fala no ruído, e, ao contraírem-se na vocalização, reduzem a resposta a estímulos autogerados como a própria voz. Embora o reflexo acústico da orelha média possa oferecer proteção limitada contra a exposição a sons intensos, é improvável que a ação protetora tenha se desenvolvido para esse fim, pois sons fortes o suficiente para desencadear o reflexo são raros na natureza.

Por meio do acoplamento de impedâncias, a cadeia ossicular une meios de densidades diferentes, pois a extremidade lateral da cadeia ossicular está em contato com o ar (membrana timpânica), enquanto a extremidade medial está em contato com os líquidos da orelha interna (janela do vestíbulo). A impedância acústica da orelha média, resistência efetiva à transmissão do som entre esses dois meios, é determinada por três fatores: massa, rigidez e fricção. O ajuste de diferentes impedâncias, permitindo que a reflexão seja mínima e a transmissão, máxima, é estabelecido pelos seguintes sistemas de amplificação:<sup>18</sup> efeito de área, efeito de alavanca e força catenária.

*(Para maiores informações sobre o assunto, consultar o Capítulo 4, "Biofísica da audição, psicoacústica e bases para a audiologia".)*

O efeito de área se evidencia pela redução de tamanho entre a membrana timpânica e a janela do vestíbulo, produzindo um aumento de pressão na mesma proporção (17 x 1,3). No efeito de alavanca, os ossículos formam um sistema de alavanca interfixa que multiplica a força mecânica recebida pelo martelo e transmitida pela bigorna na razão de seus comprimentos (1,3 x 1). A força catenária refere-se

às características da membrana timpânica de convergência de forças para seu centro e apresenta expressão menos quantitativa de amplificação. Ocorre concomitantemente um fenômeno de inversão de fase,<sup>19</sup> no qual fases inversas atingem a janela do vestíbulo e a janela da cóclea, pois ambas estão situadas no mesmo plano com aproximadamente 90 graus entre si. No entanto, a janela da cóclea está livre para se deslocar no sentido inverso ao da base do estribo, permitindo uma redução na resistência do líquido na orelha interna (endolinfa). A soma desses fatores proporciona uma vantagem mecânica produzida pela orelha média humana em torno de 28,5 dB.

Na parede anterior destaca-se a tuba auditiva ou *trompa de Eustáquio*, tubo achatado que se estende da parede anterior da cavidade timpânica (óstio timpânico da tuba auditiva) à parte nasal da faringe (óstio faríngeo da tuba auditiva) e permite a igualdade de pressão do ar nas faces medial e lateral da membrana timpânica.<sup>12</sup> Tem aproximadamente 36 mm de comprimento e apresenta uma parte óssea (terço superolateral) e uma parte cartilaginosa (dois terços inferomediais). A parte óssea da tuba auditiva corresponde ao semicanal da tuba auditiva, possuindo na extremidade uma margem irregular que serve para a fixação da parte cartilaginosa. O diâmetro da tuba auditiva é maior no óstio faríngeo e menor na junção das partes óssea e cartilaginosa, formando o istmo da tuba auditiva, que funciona como uma válvula para entrada de ar na cavidade timpânica.

O revestimento da túnica mucosa da tuba auditiva apresenta epitélio colunar ciliado, semelhante ao epitélio de órgãos respiratórios. A túnica mucosa é delgada na parte óssea, contém glândulas mucosas na parte cartilaginosa e tecido linfático próximo ao óstio faríngeo, formando a tonsila tubária.

A principal função da tuba auditiva, a função ventilatória, é arejar a orelha média e equalizar a pressão do ar externo com a pressão do ar na orelha média, protegendo-a de mudanças rápidas de pressão e mantendo a túnica mucosa íntegra. A função de drenagem da tuba auditiva é representada por um sistema de transporte mucociliar, constituído por células ciliadas e células mucosas secretoras tanto da tuba auditiva como da orelha média. Normalmente a parte cartilaginosa da tuba auditiva está colabada e se abre temporariamente, por meio da contração do músculo tensor do véu palatino, do músculo levantador do véu palatino e do músculo salpingofaríngeo, igualando as pressões se estiverem diferentes por meio de ações que aumentam a pressão da parte nasal da faringe, tais como engolir, bocejar, espirrar e gritar.

A orelha média também apresenta alterações com o envelhecimento. Ocorre redução na elasticidade do tecido muscular, retração da membrana timpânica, alterações artríticas nas articulações entre os ossículos, atrofia e degeneração das fibras musculares e ligamentos dos ossículos, além do declínio da função muscular, que controla a abertura da tuba auditiva. Além disso, algumas alterações relacionadas à percepção auditiva entre idosos podem ser atribuídas a alterações nas características mecânicas das orelhas externa e média. No entanto, estudos relatam que nenhuma alteração na transmissão do som pela orelha média, avaliada pela timpanometria, ocorre com o envelhecimento normal.<sup>20</sup>

### Orelha interna

A orelha interna está contida na parte petrosa do osso temporal, também denominada "rochedo", devido à consistência que apresenta. É formada pelo labirinto ósseo (cápsula ótica circundante e uma série de cavidades escavadas na substância óssea), preenchido por perilinfa (líquido rico em sódio, Na<sup>+</sup>), e pelo labirinto membranoso (bolsas membranáceas comunicantes), preenchido por endolinfa (líquido com alta concentração de potássio, K<sup>+</sup>, e baixa concentração de sódio, Na<sup>+</sup>).<sup>1</sup>

Na parte anterior da orelha interna, encontra-se a cóclea<sup>21</sup> (do grego *kokhlia*, que significa caracol), principal responsável pela função auditiva. A cóclea humana é uma estrutura helicoidal com aproximadamente dois giros completos e mais 2/3 de um giro, medindo cerca de 3,5 mm de altura e 7,5 mm de diâmetro em sua base. A região periférica é constituída pela cápsula óssea, e a região central apresenta um eixo ósseo de forma cônica, o modíolo,<sup>2</sup> com canais para a passagem de ramos nervosos e vasculares, provenientes do meato acústico interno. A base do modíolo corresponde ao fundo do meato acústico interno, onde a área coclear apresenta orifícios (trato espiral foraminoso) pelos quais penetram as fibras do nervo coclear que percorrem condutos (canais longitudinais do modíolo) e se abrem no canal espiral do modíolo (de Rosenthal), que contém o gânglio espiral da cóclea. Do canal espiral emergem condutos contendo fibras nervosas que percorrem uma expansão perpendicular do modíolo, a lâmina espiral óssea, terminando em orifícios na margem livre dessa lâmina. O canal espiral da cóclea é um canal ósseo espiralado, situado ao redor do modíolo, em torno da lâmina espiral óssea, com redução gradativa de diâmetro da base à cúpula da cóclea. O primeiro giro desse canal salienta-se para a cavidade timpânica, formando o promontório.

Esse canal está dividido incompletamente pela lâmina espiral óssea em duas porções, a rampa do vestibulo (superiormente) e a rampa do tímpano (inferiormente), ambas preenchidas por perilinfa e em comunicação no helicotrema, abertura situada na cúpula da cóclea (ápice), onde a lâmina espiral termina, formando o hâmulos. Duas membranas, a lâmina basilar (membrana basilar) e a membrana vestibular (de Reissner), partem da lâmina espiral e se fixam no ligamento espiral, na parede externa do canal espiral da cóclea, formando entre si uma terceira rampa preenchida por endolinfa, o ducto coclear ou rampa média, um tubo fechado, disposto espiraladamente ao longo do canal ósseo espiral da cóclea. A lâmina basilar é a continuação da lâmina espiral óssea, formando o soalho do ducto coclear. A membrana vestibular (teto do ducto coclear) forma um ângulo de 30 graus com a lâmina basilar e é constituída por duas camadas de diferentes tipos de células, uma voltada para a endolinfa e outra voltada para a perilinfa. A parede lateral do ducto coclear é representada pelo ligamento espiral, sobre o qual se situa a estria vascular, uma estrutura vascularizada e de atividade metabólica, envolvida na produção da endolinfa. Na região medial do ducto coclear, a porção superior da lâmina espiral óssea apresenta um espessamento formado por tecido conjuntivo semelhante ao ligamento espiral, denominado limbo espiral, estrutura que contém vasos sanguíneos e faz contato com a rampa do vestibulo e o ducto coclear, sendo-lhe atribuídas as funções de ancorar e manter a membrana tectória.

Ao longo do ducto coclear, sobre a lâmina basilar, situa-se o órgão espiral ou "órgão de Corti", formado pela membrana tectória, pelas células de sustentação e pelas células ciliadas.<sup>22</sup>

A membrana tectória é uma cúpula gelatinosa situada acima das células ciliadas e fixada à lâmina espiral óssea, que entra em contato com os cílios das células ciliadas externas durante as vibrações da membrana basilar.

As células de sustentação diferenciam-se em: células de Claudius, células de Boettcher, células de Hensen (delimitam o sulco espiral), células falângicas externas ou de Deiters, células falângicas internas, células pilares (formam o túnel de Corti) e células marginais.

Uma placa principal de células pilares internas e falanges das células falângicas externas formam a membrana reticular que circunscreve a região apical das células ciliadas.

As células ciliadas são as células sensoriais, destinadas à transformação das ondas sonoras em impulsos nervosos.<sup>23</sup> Podem ser diferenciadas de acordo com sua posição ao longo do ducto coclear em células ciliadas internas e externas (Quadro 2).

QUADRO 2 Caracterização das células ciliadas externas e internas

Células ciliadas externas	Células ciliadas internas
12.000-15.000 células cilíndricas	3.500 células piriformes
100-300 estereocílios por célula	50-70 estereocílios por célula
Cílios dispostos em forma de "V" ou "W"	Cílios com disposição linear
Dispostas em três fileiras	Dispostas em uma fileira
Cílios inseridos na membrana tectória (cílios mais longos das fileiras externas)	Cílios não alcançam a membrana tectória
Fixadas à lâmina basilar, parcialmente fixadas à extremidade basal às células falângicas externas	Sustentadas pelas células falângicas internas
Presença de espaços entre as células	Não apresentam espaços livres ao seu redor
Relacionadas a sons menos intensos	Relacionadas a sons intensos
Possuem proteínas contráteis e sistema de cisternas laminadas que permitem alterações de comprimento	Apresentam seletividade de frequência
Várias sinapses com 5-10% de fibras nervosas aferentes para o nervo coclear	Uma sinapse com 90-95% das fibras nervosas aferentes para o nervo coclear
Sistema amplificador coclear (entrada)	Sistema transdutor sensorial (saída)

A lâmina basilar é formada por fibras cujo comprimento aumenta e o diâmetro diminui da base até a cúpula da cóclea, o que determina uma diminuição gradativa de sua rigidez. Assim, as fibras curtas e rígidas (base) tendem a vibrar em frequências altas, enquanto as fibras longas e flexíveis (cúpula) tendem a vibrar em frequências baixas (teoria das ondas viajantes de Georg Von Békésy).<sup>1,18,24</sup> O deslocamento inicial do estribo na janela do vestíbulo desencadeia uma onda vibratória na base da cóclea que se amplifica ao máximo e se dissipa por completo quando atinge o local da lâmina basilar que tem uma frequência natural de ressonância igual à frequência do som correspondente (organização tonotópica da cóclea). De acordo com o ponto de deslocamento máximo, cada frequência é relacionada a um local específico do ducto coclear, excitando determinadas células sensoriais e fibras nervosas provenientes do órgão espiral dessa região.<sup>25</sup>

Portanto, estímulos gerados por frequências altas e baixas produzem o deslocamento máximo de amplitude, respectivamente, na base e na cúpula da cóclea. As fibras nervosas provenientes dessas determinadas regiões do órgão espiral apresentam uma curva de resposta em função da intensidade e da frequência do som, específica para cada fibra, pois têm uma sensibilidade máxima referente à frequência característica, em decorrência do ponto de vibração máxima na lâmina basilar. As fibras com frequência caracteristicamente mais grave inervam a cúpula, e as fibras com frequência caracteristicamente mais aguda inervam sua base.

A membrana tectória e as células ciliadas estão aderidas à lâmina basilar por meio do limbo espiral e das células de sustentação, respectivamente, e a extremidade superior das células ciliadas externas está fixada à membrana reticular, que é rígida e contínua com os pilares de *Córti* (repousados sobre a lâmina basilar). Assim, quando determinada região da cóclea é estimulada, o movimento da lâmina basilar e seu deslocamento em relação à membrana tectória e à membrana reticular provocam a inclinação dos estereocílios das células ciliadas externas contra a membrana tectória.

A inclinação dos estereocílios unidos por filamentos associados com canais iônicos da célula provoca a abertura de canais de potássio e a despolarização, que produz potenciais microfônicos cocleares, que, por sua vez, determinam contrações rápidas. As células ciliadas têm potencial intracelular negativo em relação à perilinfa e em relação à endolinfa, na superfície superior junto aos cílios. Esse elevado potencial elétrico na célula ciliada provoca a despolarização de sua membrana com pequenos deslocamentos ciliares.<sup>26</sup>

A excitação seletiva de células ciliadas internas e as mensagens enviadas por suas próprias fibras nervosas seria a base da discriminação de frequências.<sup>27,28</sup> No entanto, esse modelo coclear não justifica a percepção de tons combinados (produtos de distorção), o que sugere características de não linearidade, explicadas por meio de um processo ativo, ou seja, um amplificador coclear localizado entre a lâmina basilar e as fibras do nervo coclear, que requer energia. A produção ampla de potenciais microfô-

nicos e de somação pelas células ciliadas externas, sua contribuição com apenas 5% de fibras nervosas aferentes para o nervo coclear<sup>29</sup> e o fato de a destruição seletiva dessas células ocasionar perdas auditivas de até 40 dB sugerem sua participação como amplificador coclear do movimento da lâmina basilar.

As características das células ciliadas externas lhes permitem movimentos que repercutem sobre a lâmina basilar e a estrutura do ducto coclear. Essas células possuem proteínas contráteis como actina, miosina, tropomiosina, agentes moduladores como a calmodulina e um sistema de cisternas laminadas que consiste em um conjunto de sacos ou vesículas membranosas, adjacentes à membrana plasmática lateral, ao longo de todo o comprimento da célula. Esse sistema de cisternas auxilia na manutenção da forma da célula e em sua integridade estrutural e, ainda, funciona como força elástica. Elas se encurtam quando despolarizadas e se estendem quando hiperpolarizadas. Alterações de comprimento, rápidas ou lentas, produzidas por mecanismos moleculares, constituem-se em efeitos cocleares ativos devido à eletromotilidade. Mudanças lentas de comprimento são produzidas possivelmente pela ativação de terminais eferentes em suas bases. Portanto, funcionam como um sistema amplificador coclear, aumentando em até 50 dB a intensidade de um estímulo, com capacidade de seletividade de frequências, pois a contração rápida não requer ATP e cálcio e segue ciclo por ciclo a frequência de estimulação. Essas contrações rápidas são as responsáveis pelas emissões otoacústicas,<sup>30,31</sup> decorrentes da liberação de energia das células ciliadas externas. As contrações lentas são moduladas pelo sistema eferente medial, controlam a tonicidade das células ciliadas externas e as propriedades mecânicas da lâmina basilar, tendo inclusive outras implicações audiológicas. *(Para maiores informações sobre o assunto, consultar o Capítulo 13, "Mecanismos fisiológicos subjacentes à geração de emissões otoacústicas: protocolos clínicos".)*

A ativação da célula ciliada interna é mais complexa do que a ativação das células ciliadas externas. O movimento do líquido dentro do ducto coclear baseia-se na vibração por ressonância tanto da membrana tectória quanto do órgão espiral. Alterações na rigidez das células ciliadas externas modificam a ressonância do órgão espiral e, posteriormente, o movimento do líquido no ducto coclear. As células ciliadas externas alteram a rigidez do órgão espiral por meio de uma proteína motora, prestina, localizada em sua membrana lateral. Essas proteínas variam de forma em resposta às mudanças de tensão. A despolarização das células ciliadas externas faz com que a prestina encurte,

deslocando a membrana basilar, aumentando seus movimentos em relação à membrana tectória e gerando o movimento dos estereocílios, que ativam ou desativam receptores na superfície da célula ciliar. Quando canais de potássio se abrem, o potássio flui para dentro das células ciliadas e as despolariza, causando a abertura de canais de cálcio. A entrada de cálcio resulta na liberação de glutamato das células ciliadas para o nervo coclear, que envia a informação sobre a onda sonora ao cérebro.

O amplificador coclear é, portanto, uma resposta de retorno positivo dentro da cóclea que amplifica a onda viajante. As vibrações dentro do órgão espiral são detectadas, e, em seguida, é gerada uma força em sincronia para aumentar as vibrações. Mecanismos que geram força dentro da cóclea incluem eletromotilidade de células ciliadas externas e movimentos dos estereocílios como um feixe ativo. Esses processos podem ser modulados pela composição iônica intracelular, pelos componentes lipídicos da membrana plasmática e pela estrutura do citoesqueleto da célula ciliada externa.<sup>32</sup>

Portanto, as células ciliadas externas constituem o amplificador coclear, que, por meio da inclinação de seus cílios, amplifica o estímulo para determinar a deflexão dos cílios das células ciliadas internas, unidades receptoras e codificadoras cocleares, que transmitem a informação sonora codificada da cóclea para os núcleos cocleares e destes para o córtex auditivo. *(Para maiores informações sobre o assunto, consultar o Capítulo 2, "Sistema auditivo central".)*

## PROCESSAMENTO AUDITIVO PERIFÉRICO

A orelha humana, responsável pela audição, detecta e analisa o som por um mecanismo de transdução que é o processo de conversão de ondas sonoras em impulsos eletroquímicos. Esse processo não pode ocorrer adequadamente sem condições anatômicas normais. Intervenções e estudos clínicos para a avaliação da orelha interna, tais como a pesquisa de emissões otoacústicas, podem ser influenciados por condições anatômicas da orelha externa e média. Além disso, avaliações eletrofisiológicas e funcionais do processamento auditivo central podem ser limitadas por alterações de orelha interna, média e externa.

A onda sonora inicialmente captada pela orelha é conduzida à membrana timpânica pelo meato acústico externo. Essa transmissão sonora atinge a cóclea por meio da vibração da membrana timpânica e da cadeia ossicular (via aérea) ou pela vibração direta dos ossos do crânio (via óssea).

A oscilação do estribo e consequente vibração de sua platina na janela do vestíbulo é transmitida à perilinfa, rampa do vestíbulo. Como os líquidos da orelha interna são praticamente incompressíveis e a cóclea é limitada por paredes ósseas, a cada compressão na janela do vestíbulo corresponde uma descompressão da membrana timpânica secundária na janela da cóclea. Se o estribo vibra sucessivamente em direção à orelha interna, uma onda provoca vibrações na base da cóclea simultaneamente com o estribo e alternadamente em direção às rampas do tímpano e do vestíbulo, provocando deslocamentos dos quais participam a membrana vestibular e a lâmina basilar. Ao longo desse ducto, sobre a lâmina basilar, situa-se o órgão espiral (membrana tectória, células de sustentação e células ciliadas internas e externas), responsável pela transdução do estímulo sonoro (energia mecânica) em potenciais de ação (impulsos nervosos). A inclinação dos cílios, em consequência desses deslocamentos, produz variações alternadas do potencial elétrico através da membrana das células ciliadas, que estimulam os terminais nervosos do nervo coclear com os quais estão em contato, desencadeando o potencial de ação (registrado nas fibras do nervo coclear). Com a formação de potenciais, ocorrem contrações nas células ciliadas externas, em fase com a frequência sonora estimulante, que amplificam a vibração da lâmina basilar, fazendo os cílios mais longos das células ciliadas internas entrarem em contato com a membrana tectória e inclinarem-se. Essa inclinação, estimulação dos cílios, despolariza as células ciliadas internas e provoca a abertura de canais de potássio, dando origem a potenciais receptores (formados na célula receptora), que levam à liberação de neurotransmissores. Produz-se, então, uma mensagem sonora eletricamente codificada, enviada através do nervo coclear ao sistema nervoso central. Quando ocorre despolarização da lâmina basilar, aumenta o número de potenciais de ação, e, quando ocorre sua hiperpolarização, diminui o número de potenciais de ação nas fibras do nervo coclear, os quais sinalizam a excitação das células ciliadas ao sistema nervoso central. Portanto, os neurotransmissores são responsáveis pela excitação das fibras nervosas aferentes, junto ao polo basal e às superfícies laterais da célula, onde ocorrem sinapses com uma rede de terminações do nervo coclear, ou seja, fibras que se dirigem ao gânglio espiral da cóclea (gânglio coclear), no modíolo, o qual envia axônios pelo nervo coclear ao sistema nervoso central, realizando sinapses nos núcleos cocleares do tronco encefálico. *(Para maiores informações sobre o assunto, consultar o Capítulo 2, “Sistema auditivo central”.)*

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

A perda auditiva pode ser condutiva ou mista, envolvendo estruturas da orelha externa e média, ou neurosensorial, relacionada à orelha interna. A perda neurosensorial é mais comumente associada a deficiências auditivas e muitas vezes resulta da exposição a ruídos intensos, drogas ototóxicas ou processos de envelhecimento. A exposição a ruídos muito intensos faz com que a vibração entre as membranas tectória e basilar aumente, podendo danificar os estereocílios das células ciliadas externas. Quando ocorrem danos às células ciliadas externas, a rigidez do órgão espiral se reduz, aumentando as forças vibracionais nas células ciliadas internas. O dano às células ciliadas externas diminui a proteção das células ciliadas internas e as torna mais sensíveis. Com o tempo, as células ciliadas internas e, conseqüentemente, a audição também serão danificadas. *(Para maiores informações sobre o assunto, consultar o Capítulo 25, “Ruído, efeitos sobre a saúde e estratégias de proteção”.)* Antibióticos (aminoglicosídeos) são um exemplo de drogas ototóxicas, bloqueadoras de canais de potássio. Como tal, elas bloqueiam a capacidade das células ciliadas internas e externas de despolarizar. Esses tipos de drogas também podem alterar a concentração de íons na perilinfa, levando a danos ou à destruição de células ciliadas internas e externas, o que resulta em perdas auditivas permanentes, pois essas células não se regeneram.<sup>33</sup> *(Para maiores informações sobre o assunto, consultar o Capítulo 52, “Ototoxicidade”.)* As causas mais frequentes da perda auditiva neurosensorial são danos ou destruição das células ciliadas, dos neurônios do gânglio espiral ou das sinapses entre eles. Ainda não há terapias curativas para essas perdas auditivas; no entanto, têm sido desenvolvidos estudos com modelos experimentais, como a cultura *in vitro* do órgão espiral de mamífero neonatal, no qual a coleta do órgão espiral permite o estudo dessas estruturas e avalia a sobrevivência das células ciliadas.<sup>34</sup>

Na reabilitação das perdas auditivas, podem ser utilizados aparelhos de amplificação sonora posicionados na orelha externa (próteses auditivas retro ou intra-auriculares) e na orelha média (próteses implantáveis cirurgicamente), ou, em casos de maior grau de perdas auditivas, geralmente perdas auditivas neurosensoriais de grau severo ou profundo, podem ser inseridos eletrodos na cóclea (implantes cocleares). *(Para maiores informações sobre o assunto, consultar os Capítulos 33, 34, 38 e 39 na Seção “Dispositivos eletrônicos de amplificação sonora, implante coclear e próteses auditivas implantáveis”.)*

Devido às características anatômicas do sistema auditivo, podem ocorrer complicações clínico-cirúrgicas, tais

como alterações vestibulares e o surgimento de zumbido no período pós-operatório. O processo cirúrgico deve ser complementado com o diagnóstico por imagens, pois podem estar presentes variações anatômicas, destacando-se a relação da artéria carótida interna e da veia jugular com a cavidade timpânica, cuja lâmina óssea que as separa pode estar ausente. Outras variações individuais podem ocorrer em termos de tamanho e forma da cóclea, tais como o comprimento da parede externa do canal espiral da cóclea, o diâmetro e o comprimento desse canal e a largura da rampa do tímpano no primeiro giro da cóclea, porção ascendente. Essas variações podem ser impactantes na implantação cirúrgica do eletrodo e, conseqüentemente, fatores limitantes nos ajustes sonoros na reabilitação pós-operatória.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bonaldi LV, Angelis MA, Smith RL. Bases anatômicas da audição e do equilíbrio. São Paulo: Livraria Santos Editora; 2004.
- Haines D. Fundamental neuroscience. New York: Churchill Livingstone Inc.; 1997.
- Saladin KS. Anatomy and physiology: the unity and form of function. 9.ed. New York: Mc Graw-Hill; 2021.
- Anson BJ, Donaldson JA. Surgical anatomy of the temporal bone and the ear. 2.ed. Philadelphia: W B Saunders Company; 1973.
- Sundar PS, Chowdhury C, Kamarthi S. Evaluation of human ear anatomy and functionality by axiomatic design. *Biomimetics*. 2021;6(31).
- Ballachanda BB. The human ear canal: theoretical implications and clinical considerations including cerumen management. San Diego: Singular Publishing Group Inc.; 1995.
- Chasin M. The etiology of the REUG: did we get it completely right? *Hear J*. 2005;58(12):22-4.
- Ballachanda BB. Theoretical and applied external ear acoustics. *J Am Acad Audiol*. 1997;8(6):411-20.
- Voss SE, Rosowski JJ, Shera CA, Peake WT. Acoustic mechanisms that determine the ear-canal sound pressures generated by earphones. *J Acoust Soc Am*. 2000;107(3):1548-65.
- Voss SE, Rosowski JJ, Merchant SN, Thornton AR, Shera CA, Peake WT. Middle ear pathology can affect the ear-canal sound pressure generated by audiologic earphones. *Ear Hear*. 2000;21(4):265-74.
- Voss SE, Herrmann BS. How does the sound pressure generated by circumaural, supra-aural, and insert earphones differ for adult and infant ears? *Ear Hear*. 2005;26(6):636-50.
- Bluestone CD. Fisiología del oído medio y de la trompa de Eustaquio. In: Paparella MM, Shumrick DA, Gluckman JL, Meyerhoff WL. *Otorrinolaringología: ciencias básicas y disciplinas afines*. 3.ed. Buenos Aires: Editorial Médica Panamericana; 1994. v.I. p.190-232.
- Voss SE, Rosowski JJ, Merchant SN, Peake WT. Acoustic response of the human middle ear. *Hearing Research*. 2000;150(1-2):43-49.
- Anell EA, Rivas BI. Theoretical and computational analysis of the fixing of ossicular chain. *Revista Electrónica Nova Scientia*. 2008;1(1):107-17.
- Volandri G, Di Puccio F, Forte P, Carmignani C. Biomechanics of the tympanic membrane. *J Biomech*. 2011;44(7):1219-36.
- Beck DL, Speidel DP, Huijnen J, Petrak M. Tympanometry and acoustic reflex: innovation, review, and application. *Hear Rev*. 2009;16(4):20-33.
- Beck DL, Speidel DP. Acoustic middle ear reflexes: simple, understood, and critically important. Why Amer is so important and how you can use it. *Hear Rev*. 2013.
- Kramer S. Functions of the auditory and vestibular systems. In: *Science to practice*. San Diego: Plural Publishing; 2008. p.73-108.
- Kringelbotn M. The equality of volume displacements in the inner ear windows. *J Acoust Soc Am*. 1995;98(1):192-6.
- Stenklev NC, Vik O, Laukli E. The aging ear: an otomicroscopic and tympanometric study. *Acta Otolaryngol*. 2004;124(1):69-76.
- Williams PL. Gray's anatomy: the anatomical basis of medicine and surgery. 38.ed. New York: Churchill Livingstone; 1995. p.901-1397.
- Kelly JP. Hearing. In: Kandel ER, Schwartz JH, Jessell TM. *Principles of neural science*. 3.ed. New York: Elsevier Science Publishing Co; 1991. p.481-99.
- Nadol Jr. JB. Synaptic morphology of inner and outer hair cells of the human organ of Corti. *J Electron Microscop*. 1990;15:187-96.
- von Békésy G. Current status of theories of hearing. *Science*. 1956;123:779-83.
- Nobili R, Mammano F, Ashmore J. How well do we understand the cochlea? *Trends Neurosci*. 1998;21(4):159-67.
- Lippe W. Recent developments in cochlear physiology. *Ear and Hearing*. 1986;7(4):233-9.
- Geisler CD. *Sound to synapse*. New York: Oxford University Press; 1990.
- Kachar B, Brownell WE, Altschuler R, Fex J. Electrokinetic shape changes of cochlear outer hair cells. *Nature*. 1986;322(6077):365-7.
- Bonaldi LV, De Angelis MA, Smith RL. *Hodologia do sistema auditivo: vias auditivas*. In: Pereira LD, Schochat E. *Processamento auditivo central: manual de avaliação*. São Paulo: Lovise; 1997. p.19-25.
- Ryan AF. New views of cochlear function. In: Robinette MS, Glatthar TJ. *Otoacoustic emissions: clinical applications*. New York: Thieme; 1997. p. 22-45.
- Brownell WE. Outer hair cell electromotility and otoacoustic emissions. *Ear and Hearing*. 1990;11(2):82-92.
- Oghalai JS. The cochlear amplifier: augmentation of the traveling wave within the inner ear. *Curr Opin Otolaryngol Head Neck Surg*. 2004;12(5):431-8.
- White HJ, Helwany M, Peterson DC. *Anatomy, head and neck, ear, nose and throat*. StatPearls Publishing LLC; 2021.
- Cortado M, Sauteur L, Lanz M, Levano S, Bodmer D. A deep learning approach to quantify auditory hair cells. *Hearing Research*. 2021;408: