

Marco Marinoni

# ACUSTICA E PSICOACUSTICA MUSICALE

## **Lezione 2. Psicoacustica**

- 2.1 Introduzione alla psicoacustica
- 2.2 Caratteristiche fisiche del suono e sensazioni uditive
- 2.3 L'organo dell'udito
- 2.4 I suoni puri
- 2.5 Sovrapposizione di suoni puri

# 3.1 INTRODUZIONE ALLA PSICOACUSTICA

- Con il termine *musica* si fa generalmente riferimento a un complesso di processi che vanno dalla generazione di pattern sonori fino alla percezione e alla elaborazione del messaggio musicale da parte di un ascoltatore.
- Il processo di produzione e percezione del suono si può schematizzare come una catena di tre sistemi connessi detti *sorgente*, *mezzo* e *ricevitore*

# 3.1 INTRODUZIONE ALLA PSICOACUSTICA

- **SORGENTE**

- Meccanismo di eccitazione

- Fornisce l'energia

- Elemento vibrante

- Determina le caratteristiche del suono fondamentale

- Risonatore

- Converte in variazioni di pressione nell'aria le oscillazioni (onde sonore), determinando le caratteristiche specifiche del suono generato

# 3.1 INTRODUZIONE ALLA PSICOACUSTICA

- **MEZZO**

- Medium proprio

- Permette la propagazione del suono

- Elementi di confine

- Riflessione
    - assorbimento
    - riverberazione

# 3.1 INTRODUZIONE ALLA PSICOACUSTICA

- **RICEVITORE**

- Padiglione auricolare e orecchio esterno

- Conversione delle variazioni di pressione nell'aria in oscillazioni meccaniche (processo equivalente alla ADC digitale)

- Orecchio interno

- Prima suddivisione delle frequenze (analisi spettrale)
- Conversione delle oscillazioni meccaniche in impulsi neurali

- Sistema nervoso

- Processazione, rappresentazione, identificazione, immagazzinamento e trasferimento ad altri centri SNC

# 3.1 INTRODUZIONE ALLA PSICOACUSTICA

- FOCUS sul sistema RICEVITORE
  - Come i suoni vengono elaborati e interpretati dal sistema uditivo e dal cervello

## 3.2 CARATTERISTICHE FISICHE DEL SUONO E SENSAZIONI UDITIVE

- Sentiamo un suono quando il timpano dell'orecchio viene eccitato da un'onda di pressione avente caratteristiche fisiche ben definite (come *intensità* o *periodicità*).
- La conseguenza per noi è una **percezione del fenomeno** costituita da **diverse sensazioni** che ci permettono di distinguere quel suono rispetto ad altri.
- Le tre sensazioni primarie che accompagnano l'ascolto di un suono sono: ***altezza***, ***intensità*** e ***timbro*** (in inglese, rispettivamente ***pitch***, ***loudness*** e ***timbre***).

## 3.2 CARATTERISTICHE FISICHE DEL SUONO E SENSAZIONI UDITIVE

- Queste sensazioni sono il risultato della elaborazione dell'orecchio e del cervello e non sono grandezze misurabili direttamente.
- Sono, invece, misurabili **le quantità fisiche del suono** che sono principali cause di **altezza, intensità e timbro.**

## 3.2 CARATTERISTICHE FISICHE DEL SUONO E SENSAZIONI UDITIVE

- Per suoni periodici (o quasi periodici), il *pitch* è determinato principalmente dalla frequenza fondamentale (si ricorda che la frequenza fondamentale di un suono è il numero di ripetizioni in un secondo del pattern di vibrazione).
- Tra i suoni periodici si distinguono i **suoni puri**, formati cioè da una sola componente sinusoidale.

## 3.2 CARATTERISTICHE FISICHE DEL SUONO E SENSAZIONI UDITIVE

- Visto nel dominio della frequenza, un **suono puro** è rappresentato con una riga in corrispondenza della frequenza della sinusoide.
- Per un **suono composto** da più armoniche (sinusoidi), la frequenza fondamentale è il massimo comune divisore della serie di frequenze che costituiscono lo spettro.

## 3.2 CARATTERISTICHE FISICHE DEL SUONO E SENSAZIONI UDITIVE

- **L'intensità percepita** dipende dal flusso di energia che accompagna la vibrazione.
- Essa è tuttavia dipendente anche da altri fattori quali
  - pitch
  - durata
  - presenza di altri suoni.

## 3.2 CARATTERISTICHE FISICHE DEL SUONO E SENSAZIONI UDITIVE

- Il principale elemento che caratterizza il timbro è lo **spettro di energia**.
- L'evoluzione temporale dello spettro è un elemento fondamentale per il riconoscimento e la caratterizzazione dei suoni strumentali.
- Se un suono viene privato del proprio attacco, viene persa, nella gran parte dei casi, la capacità dell'ascoltatore di riconoscere chiaramente lo strumento acustico.

## 3.2 CARATTERISTICHE FISICHE DEL SUONO E SENSAZIONI UDITIVE

- Oltre alle sensazioni primarie, ne esistono altre importanti nel processo percettivo.
  - La ***direzionalità*** è una sensazione legata alla percezione dei suoni, ed è legata alla differenza di fase con cui il suono giunge alle orecchie (differenza che è dovuta alla direzione di incidenza del suono).
  - ***Consonanza*** e ***dissonanza*** sono infine due sensazioni (indotte, legate cioè al condizionamento culturale) provocate dalla sovrapposizione di due o più suoni e dai battimenti dovuti alla sovrapposizione (si parlerà nel seguito del fenomeno dei battimenti). *Il rapporto fra le frequenze e la frequenza di battimento determinano il grado di consonanza e dissonanza percepito.*

## 3.2 CARATTERISTICHE FISICHE DEL SUONO E SENSAZIONI UDITIVE

- I messaggi musicali sono composti da suoni che si avvicendano nel tempo e da pattern ritmici che si ripetono nel tempo.
- Il **tempo** ha dunque un ruolo determinante nella costruzione di elementi essenziali del messaggio musicale come la melodia ed il ritmo.

## 3.2 CARATTERISTICHE FISICHE DEL SUONO E SENSAZIONI UDITIVE

- Nella tabella [slide 16] si mettono a confronto le sensazioni dell'udito con le scale dei tempi relative alla loro elaborazione e con lo stadio del processo uditivo in cui tali sensazioni sono elaborate.

## 3.2 CARATTERISTICHE FISICHE DEL SUONO E SENSAZIONI UDITIVE

SCALA DEI TEMPI (s)	LUOGO DI ELABORAZIONE	SENSAZIONE	INFLUENZA (Cultura, Ambiente, Stato)
$6 * 10^{-5} \div 6 * 10^{-2}$	orecchio interno	altezza, intensità, timbro	debole
$\sim 0.1$	collegamento nervoso tra orecchio e corteccia	transitori, timbro, direzionalità, identificazione, discriminazione	
$> 0.1$	corteccia cerebrale	ritmo, messaggio musicale	
	emisfero sinistro	breve termine (sequenzializzazione, parlato)	
	emisfero destro	lungo termine (integrazione spaziale (visiva) e temporale (uditiva))	forte

## **3.2 CARATTERISTICHE FISICHE DEL SUONO E SENSAZIONI UDITIVE**

- **L'indagine quantitativa sulle sensazioni è condotta attraverso misure psicofisiche su soggetti umani.**
- **Oggetto delle misure (i cui dati sono trattati solitamente con metodi statistici) sono**
  - **soglie**
  - **soglie differenziali**
  - **eguaglianza**
  - **scale di valori.**

## 3.2 CARATTERISTICHE FISICHE DEL SUONO E SENSAZIONI UDITIVE

- Misure di **soglia** e **soglia differenziale** mirano a stabilire ad es. a quale intensità un suono inizia ad essere percepito o qual'è la minima variazione di frequenza per cui la sensazione di pitch cambia.
- Misure di **uguaglianza** servono a stabilire ad es. quando due suoni a frequenza diversa hanno uguale intensità.
- Misure su **scale di valori** mirano a stabilire ad es. quando due suoni sono percepiti con altezza o intensità doppia o tripla.

## 3.3 L'ORGANO DELL'UDITO

- Il **sistema uditivo umano** ha una struttura complessa e svolge funzioni notevolmente avanzate.
- Non solo è in grado di elaborare un ampio insieme di stimoli, ma può identificare precisamente l'altezza o il timbro di un suono, o la direzione da cui esso proviene.

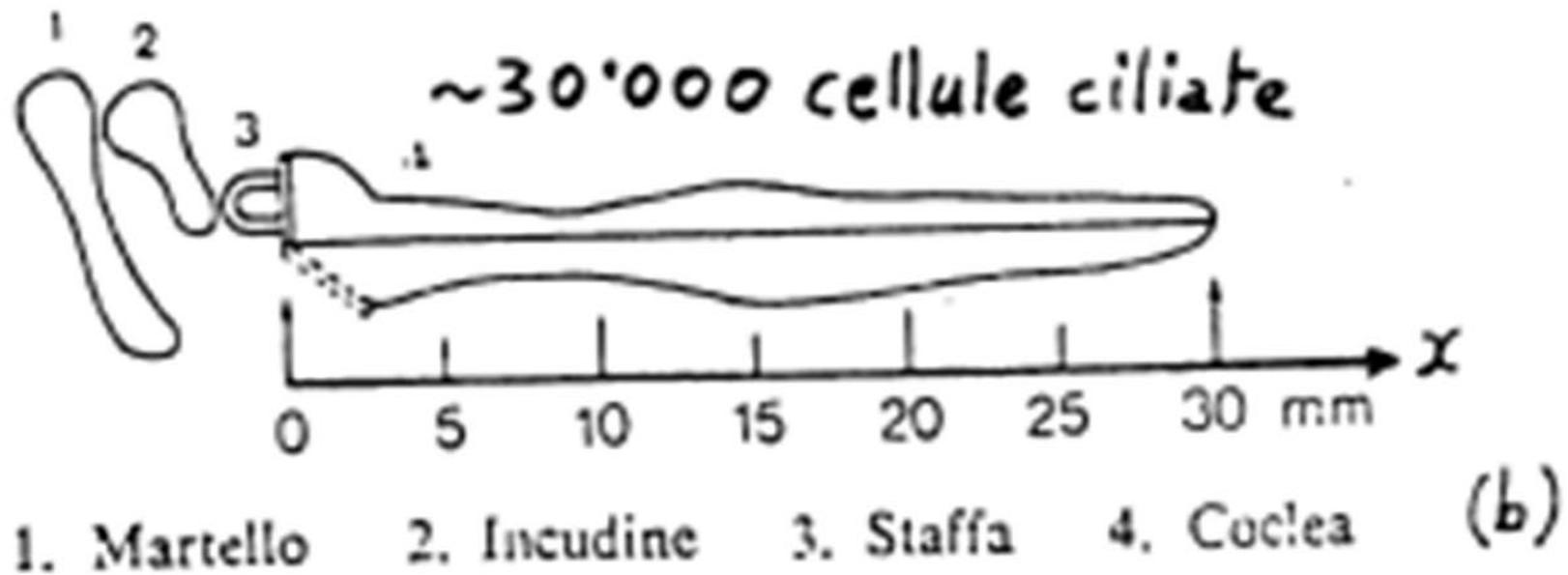
## 3.3 L'ORGANO DELL'UDITO

- Molte funzioni del sistema uditivo vengono svolte dall'organo che chiamiamo *orecchio*, ma grande enfasi di recente viene attribuita alla elaborazione che ha luogo nel sistema nervoso centrale.
- Per semplificarne la descrizione, l'orecchio è spesso diviso in tre parti principali:
  - orecchio ***esterno***
  - orecchio ***medio***
  - orecchio ***interno***.

# 3.3 L'ORGANO DELL'UDITO



## 3.3 L'ORGANO DELL'UDITO



## 3.3 L'ORGANO DELL'UDITO

- L'orecchio esterno è formato dalla *pinna* esterna e dal *canale uditivo (meato)*.
- L'orecchio medio inizia con la membrana del *timpano*, alla quale è attaccato il primo dei tre ossicini (chiamati *martello, incudine e staffa*) che compongono questo stadio.
  - Il compito di questi ultimi è quello di amplificare il moto del timpano (essi formano un sistema di leve) e di trasferirlo ad un'altra membrana, la *finestra ovale*.
- Con la *finestra ovale* inizia l'orecchio interno, formato principalmente dalla *coclea*
  - contiene i meccanismi per **trasformare le variazioni di pressione in corrispondenza del timpano in impulsi nervosi** che vengono interpretati dal cervello come suono.

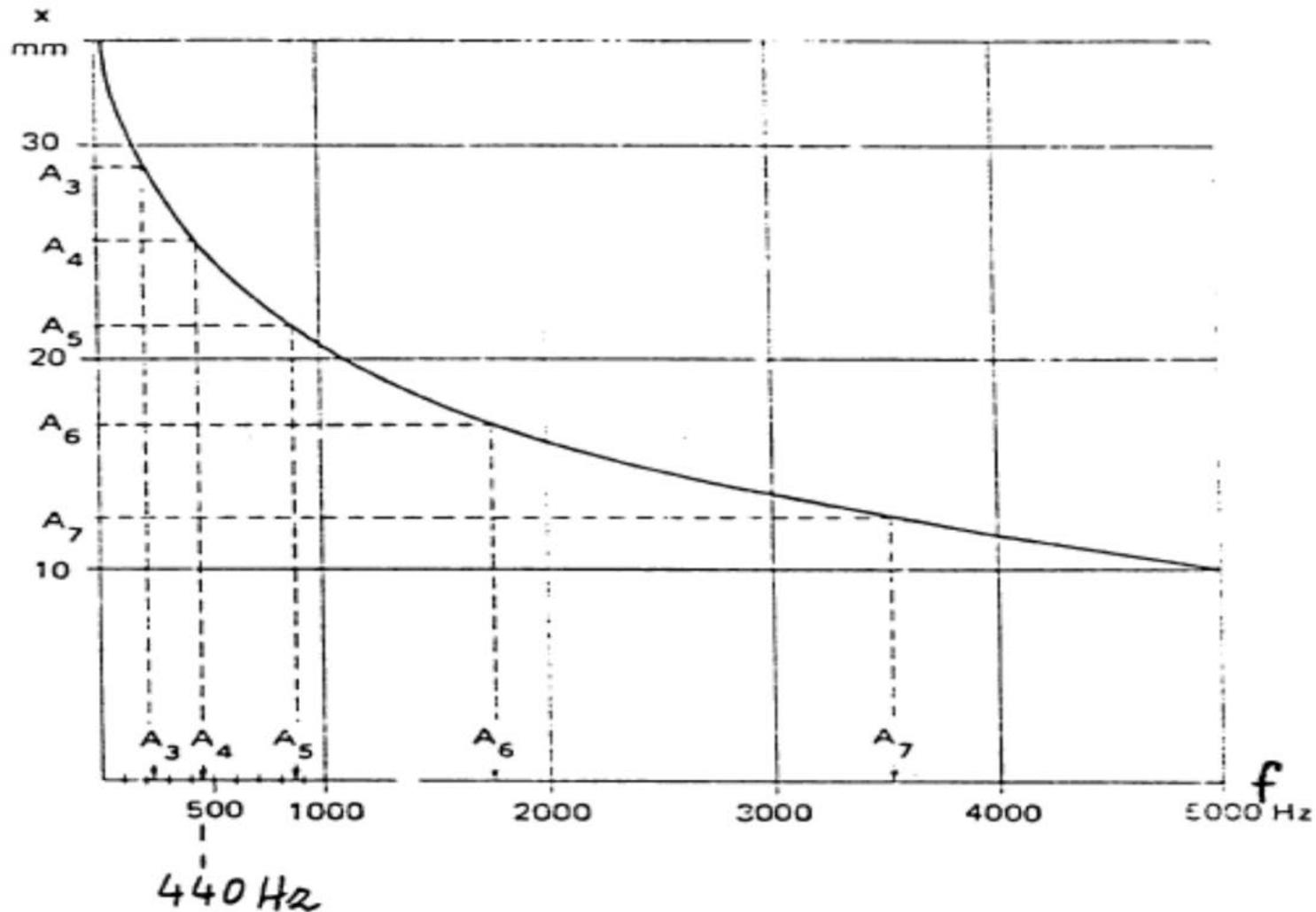
## 3.3 L'ORGANO DELL'UDITO

- **La coclea ci aiuta a percepire l'altezza (pitch) di un suono puro.**
- Questo organo è costituito da una cavità divisa in due da una membrana (**membrana basilare**) e contenente un liquido incompressibile (**perilinfo**) che passa da una parte all'altra della membrana attraverso un'apertura (**elicotrema**).
- Le vibrazioni trasmesse dall'orecchio medio alla finestra ovale si trasmettono al fluido del dotto cocleare, che a sua volta provoca un moto della membrana basilare simile a quello di una bandiera.
- Lungo la membrana basilare, circa 30000 recettori nervosi (**cellule ciliate**) convertono il moto della membrana in segnali a loro volta trasmessi ai neuroni del nervo acustico.

## 3.3 L'ORGANO DELL'UDITO

- A fronte di un suono puro di una data frequenza, il massimo della ampiezza di oscillazione della membrana basilare è localizzato in una regione ben delimitata della membrana.
- La posizione di questa regione dipende dalla frequenza del suono.
- Per ogni frequenza c'è una regione di massima sensibilità della membrana (**regione di risonanza**).
- Più bassa è la frequenza e più la regione di risonanza è prossima all'**Apex** (elicotrema).

# 3.3 L'ORGANO DELL'UDITO



## 3.3 L'ORGANO DELL'UDITO

- In figura [slide 26] si può osservare come la posizione  $x$  (misurata dalla base) della regione di massima risonanza varia al variare della frequenza  $f$  di un suono puro.
- Dalla figura è possibile trarre alcune considerazioni fondamentali:

## 3.3 L'ORGANO DELL'UDITO

- 1. L'estensione di frequenze che va approssimativamente da 20 Hz fino a 4000 Hz copre circa i due terzi dell'estensione della membrana basilare (dai 12 ai 35 mm dalla base).
  - La rimanente porzione della scala di frequenze (4000 - 16000 Hz) è compressa nel rimanente terzo.
  - Il range di frequenze visto corrisponde alle prime 7 ottave musicali, riconosciute come le più importanti in musica.

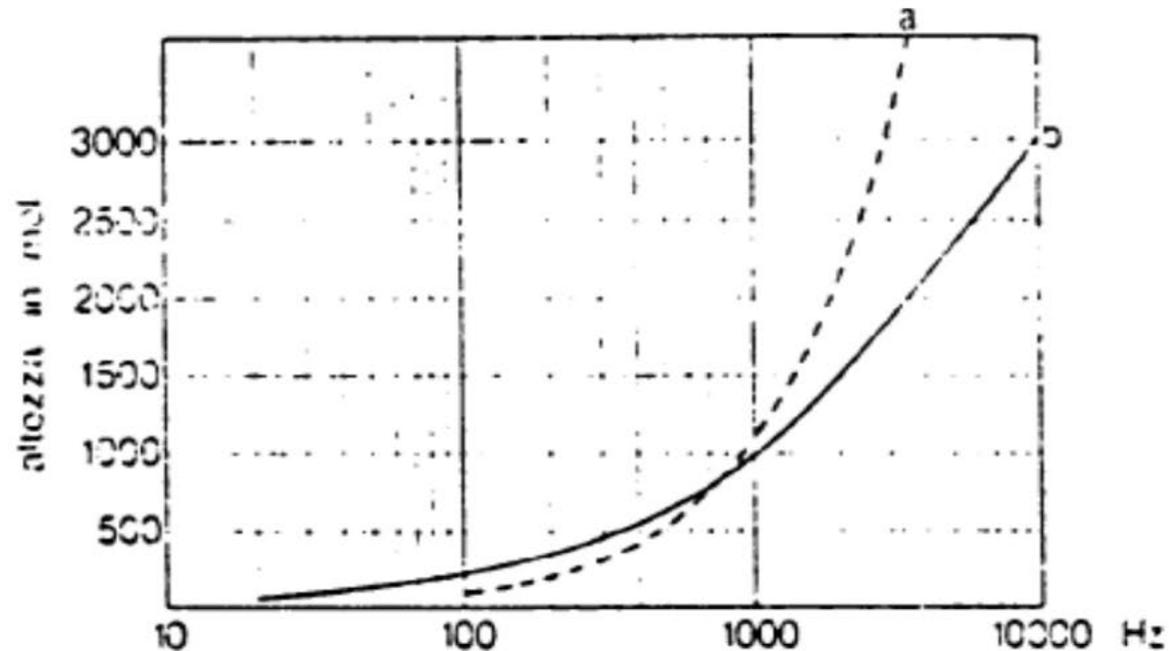
## 3.3 L'ORGANO DELL'UDITO

- 2. A fronte di un raddoppio della frequenza (salto di ottava) dello stimolo sinusoidale la regione di risonanza subisce uno spostamento costante di 3.5-4 mm, indipendentemente dalla frequenza di partenza.
  - In altre parole, **quando la frequenza  $f$  è moltiplicata per un dato valore, la posizione del massimo di risonanza viene traslata di una certa quantità seguendo una legge di tipo logaritmico.**

## 3.4 I SUONI PURI

- *Il pitch è una sensazione soggettiva.*
- In molte scale musicali si tende a considerare l'ottava come unità fondamentale: note giudicate essere l'una l'ottava dell'altra hanno frequenze l'una il doppio dell'altra, anche se il rapporto di 2:1 non sempre è esatto.
- **Tuttavia esiste una discordanza, particolarmente evidente al di sopra dei 1000 Hz, fra la frequenza reale del suono puro e l'altezza mediamente percepita dall'ascoltatore**

## 3.4 I SUONI PURI

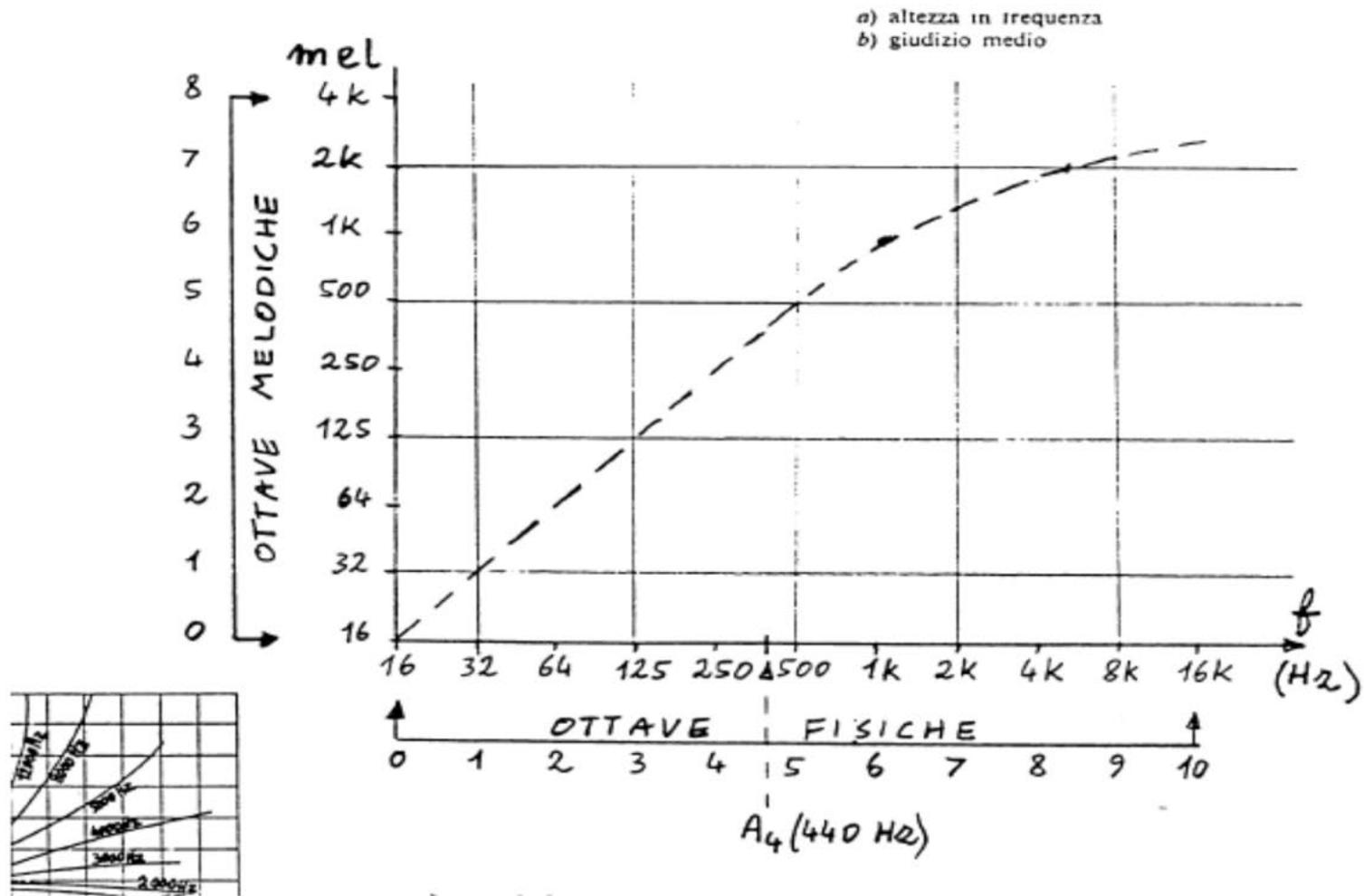


- La linea tratteggiata descrive l'andamento dell'altezza in frequenza mentre la linea continua il giudizio medio

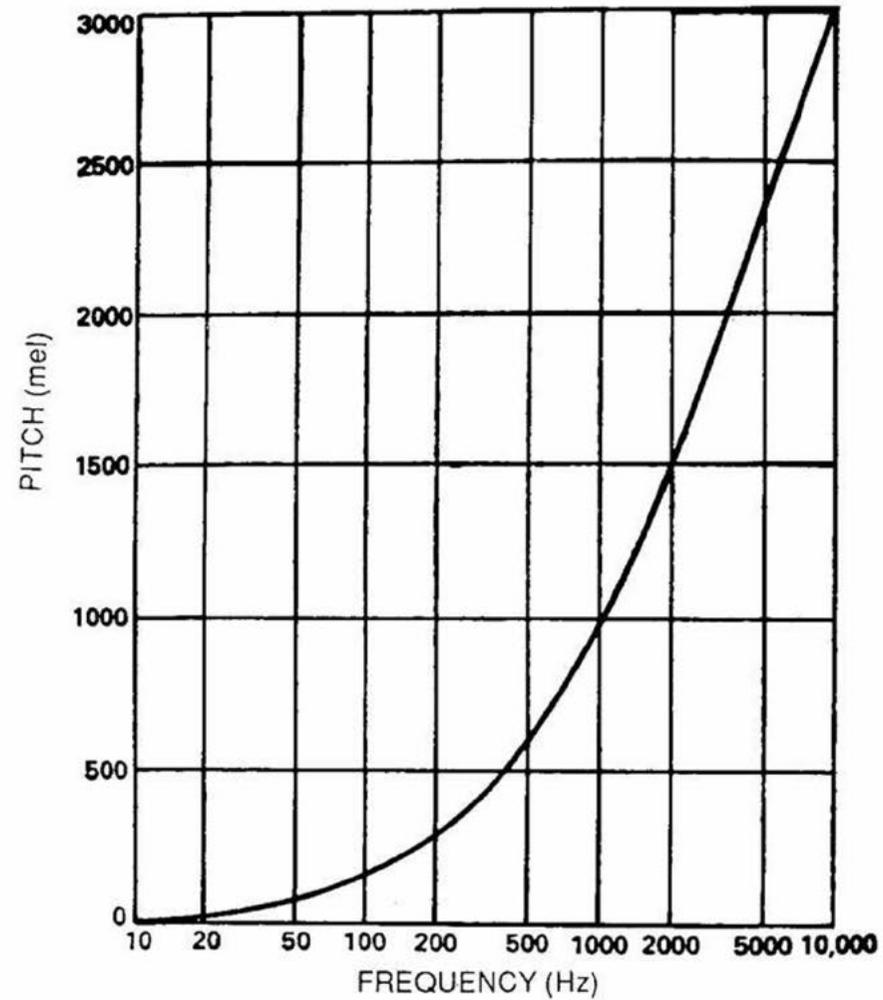
## 3.4 I SUONI PURI – scala *mel*

- Allo scopo di avere per il pitch una scala coerente con la curva di percezione dell'altezza, è stata introdotta la scala *mel* (figura [slide 30]).
- Per definizione, infatti, a 1000 Hz corrispondono 1000 mel (con pressione sonora 60 db sopra la soglia di udibilità a 1000 Hz) e **ad ogni ottava i mel si raddoppiano (o si dimezzano)**.
- La scala *mel* è una **scala psicofisica del pitch**.

# 3.4 I SUONI PURI – scala *mel*



## 3.4 I SUONI PURI – scala *mel*



## 3.4 I SUONI PURI - *jnd*

- La capacità di distinguere tra due stimoli pressoché uguali è spesso caratterizzata, negli studi psicofisici, da una misura di minima differenza apprezzabile (***just noticeable difference, jnd***).
- *Due stimoli sono giudicati uguali se differiscono per meno del jnd.*
- In psicoacustica si incontrano misure di jnd per molte delle sensazioni uditive.

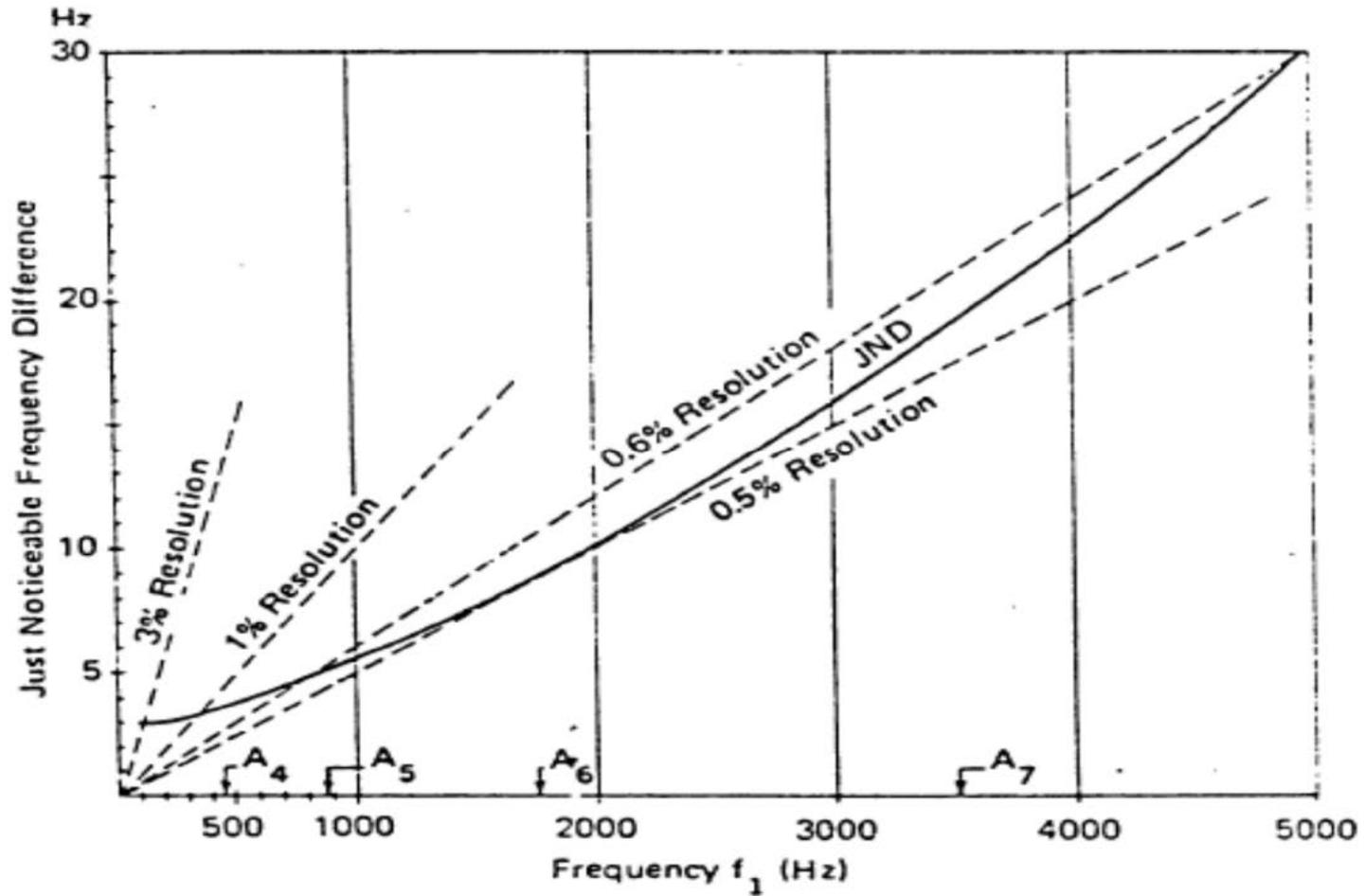
## 3.4 I SUONI PURI - *jnd*

- Gli studi sulla percezione del pitch hanno mostrato che il *jnd* di frequenza dipende, oltre che dal *valore di frequenza iniziale dello stimolo*, anche da
  - *intensità sonora*
  - *durata*
  - *velocità di variazione della frequenza* (per cambiamenti improvvisi le soglie si abbassano anche di 30 volte)

## 3.4 I SUONI PURI - *jnd*

- La figura [slide 36] mostra il *jnd* medio per suoni puri al variare della frequenza. Si può notare che la risoluzione di frequenza (definita come  $jnd/fc$  con  $fc$  frequenza centrale) è massima intorno ai 2000 Hz e raggiunge il suo minimo alle basse frequenze.

## 3.4 I SUONI PURI - *jnd*



## 3.4 I SUONI PURI - teoria della localizzazione

- La descrizione del meccanismo di discriminazione delle frequenze (noto come ***teoria della localizzazione***) cerca di spiegare il fenomeno della percezione del pitch attraverso la conversione di una vibrazione temporale in una vibrazione nello spazio ad opera della coclea.
- Questa teoria spiega alcuni fenomeni, ma non fornisce una spiegazione completa del funzionamento della percezione dell'altezza.

## 3.4 I SUONI PURI - teoria della localizzazione

- Non spiega perchè percepiamo suoni complessi come una sola entità avente una altezza ben definita, pur risuonando la membrana basilare in corrispondenza di ogni componente del suono.
- Non spiega perchè percepiamo l'altezza corretta anche in suoni complessi nei quali la componente fondamentale sia stata eliminata (fenomeno noto come ***ricostruzione della fondamentale***).

## 3.4 I SUONI PURI - teoria della localizzazione

- Si vedrà in seguito come alla **teoria spaziale** ne venga affiancata un'altra, detta **teoria temporale** o **della periodicità**, per cercare di spiegare questi fenomeni

## 3.4 I SUONI PURI – pitch e intensità

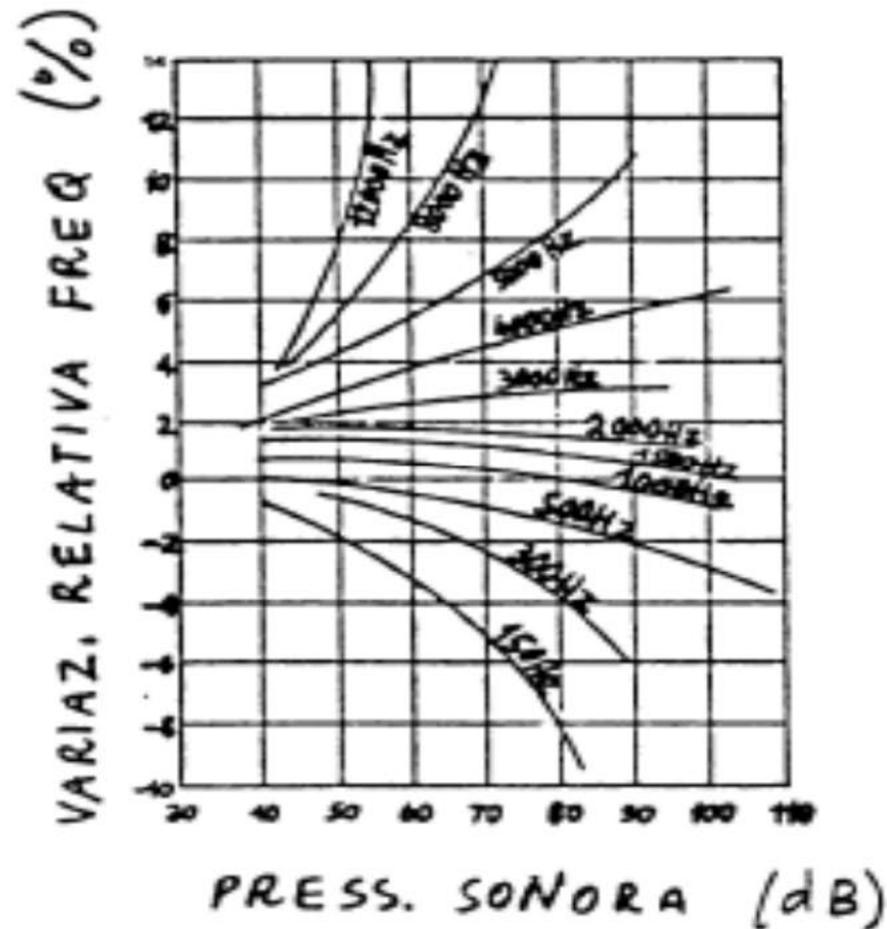
- La frequenza dello stimolo sinusoidale risulta essere il parametro fondamentale nella determinazione della sensazione di altezza.
- Tuttavia, esso non è il solo.

## 3.4 I SUONI PURI – pitch e intensità

- Gli esperimenti di **Stevens (1937)** hanno mostrato che al crescere dell'intensità dello stimolo da 40 a 90 db, per frequenze al di sopra dei 1000 Hz il pitch percepito subisce un incremento, mentre per frequenza al di sotto dei 1000 Hz esso subisce un decremento rispetto all'intensità iniziale.
- Per frequenze intorno ai 1000 Hz, la variazione è quasi nulla.

## 3.4 I SUONI PURI – pitch e intensità

- Questi dati sono riassunti nel diagramma di Stevens e Wolkmann



## 3.4 I SUONI PURI – pitch e intensità

- **Diagramma di Stevens e Wolkmann**
  - Variazione del pitch di una sinusoide in funzione dell'intensità  $s$ .
  - Una sinusoide di 150 Hz passando da 45 a 90 dB scende in pitch del 12%, circa di due semitoni.
  - Una curva discendente implica che la frequenza del suono deve essere aumentata per avere la stessa sensazione di pitch.

# 3.5 SOVRAPPOSIZIONE DI SUONI PURI

- **Effetti del primo ordine**
  - Battimenti
  - Bande critiche
  - Consonanza sensoriale
  - Suoni di combinazione
- **Effetti del secondo ordine**
  - Battimenti del secondo ordine
  - Rintracciamento della fondamentale

## 3.5 SOVRAPPOSIZIONE DI SUONI PURI

- Si vuole vedere adesso quali sono gli effetti prodotti dalla sovrapposizione di due suoni puri, ovvero due sinusoidi.
- *Due famiglie di effetti*
  - **Primo ordine**
    - Elaborati nell'orecchio interno
      - Elaborazione meccanica
  - **Secondo ordine**
    - Elaborati in uno stadio successivo
      - Elaborazione neurale

## 3.5 SOVRAPPOSIZIONE DI SUONI PURI

- Effetti del primo ordine emergono quando lo stimolo uditivo è costituito da due suoni puri con stessa frequenza e fase, e **la frequenza di uno dei due stimoli viene fatta crescere (o decrescere) gradualmente.**

## 3.5 SOVRAPPOSIZIONE DI SUONI PURI

- Battimenti del primo ordine
  - Sia  $f_1$  la frequenza del primo suono e  $f_2$  quella del secondo e sia inizialmente  $f_1 = f_2$ .
  - Finche' i due suoni presentano stessa frequenza e stessa fase iniziale, la membrana basilare presenta una eccitazione in corrispondenza della posizione relativa alla frequenza comune, di **ampiezza pari alla somma delle ampiezze dei due stimoli**.

# 3.5 SOVRAPPOSIZIONE DI SUONI PURI

- Battimenti del primo ordine
  - Quando la frequenza di uno dei due stimoli comincia a crescere ( $f_2 = f_1 + f$ ) e fino a quando  $f$  non supera un certo valore  $f_d$ , l'ascoltatore percepisce un unico suono a frequenza  $f = (f_1 + f_2)/2$  e modulato in ampiezza.
  - Es.  $f_1 = 850$  Hz;  $f_2 = 855$  Hz;  $f = (850 + 855) / 2 = 852.5$  Hz
  - Questa modulazione di ampiezza è chiamata ***battimento del I ordine***.

# 3.5 SOVRAPPOSIZIONE DI SUONI PURI

- **Battimenti del primo ordine**

- La frequenza di battimento del primo ordine e` pari a  $f_b = ( f_2 - f_1 ) = \Delta f$ .
- l'altezza del suono è data da  $f = ( f_1 + f_2 ) / 2 = f_1 + \Delta f / 2$
- Il periodo  $T_b$  del battimento è  $1 / \Delta f$

# 3.5 SOVRAPPOSIZIONE DI SUONI PURI

- Battimenti del primo ordine
  - $f_b = ( f_2 - f_1 ) = 855 - 850 = 5 \text{ Hz} = \Delta f.$
  - Altezza del suono  $f = ( f_1 + f_2 ) / 2 = f_1 + \Delta f / 2$   
 $= ( 855 + 850 ) / 2 = 852.5 = 850 + ( 5 / 2 ) = 852.5 \text{ Hz}.$
  - Il periodo  $T_b = 1 / \Delta f = 1 / 5 = 0.2 \text{ s}$ 
    - [File battimenti\_850\_855.wav]
    - [File battimenti da 850 a 920.wav]
    - [File battimenti primo.maxpat]

## 3.5 SOVRAPPOSIZIONE DI SUONI PURI

- **Bande critiche**

- All'aumentare del modulo di  $\Delta f$  oltre i 15 Hz, la sensazione di battimento scompare, lasciando il posto a una sensazione sgradevole di **ruvidità (*roughness*)**.
- Quando il modulo di  $\Delta f$  supera la grandezza  $f_D$  (*soglia di discriminazione*) i due suoni risultano distinguibili, pur esistendo ancora la sensazione di ruvidità del suono.

# 3.5 SOVRAPPOSIZIONE DI SUONI PURI

- **Bande critiche**

- Solo quando il modulo di  $\Delta f$  supera una seconda soglia  $\Delta f_{CB}$ , la sensazione dei due suoni distinti risulta netta e piacevole.
- La grandezza  $2\Delta f_{CB}$  è chiamata **banda critica**.

# 3.5 SOVRAPPOSIZIONE DI SUONI PURI

- **Bande critiche**

- La discriminazione del pitch  $\Delta f_D$  e la banda critica  $2\Delta f_{CB}$  **dipendono dalla frequenza centrale.**
- Alcuni intervalli musicali sono consonanti o dissonanti a seconda della frequenza centrale
  - semitono, tono e terza minore hanno rapporti di frequenza rispettivamente pari a 16/15, 9/8 e 6/5.
- L'intervallo di mezzo tono è dissonante su tutta l'estensione delle frequenze
- L'intervallo di terza minore risulta dissonante solo al di sotto dei 600 Hz circa.

## 3.5 SOVRAPPOSIZIONE DI SUONI PURI

- **Bande critiche**

- Si può notare, infine, che fra JND e bande critiche vale la relazione approssimata:  $\Delta f_{CB} = 30JND$
- Una banda critica corrisponde a circa 1.3 mm di membrana basilare e a circa 1300 ricettori.

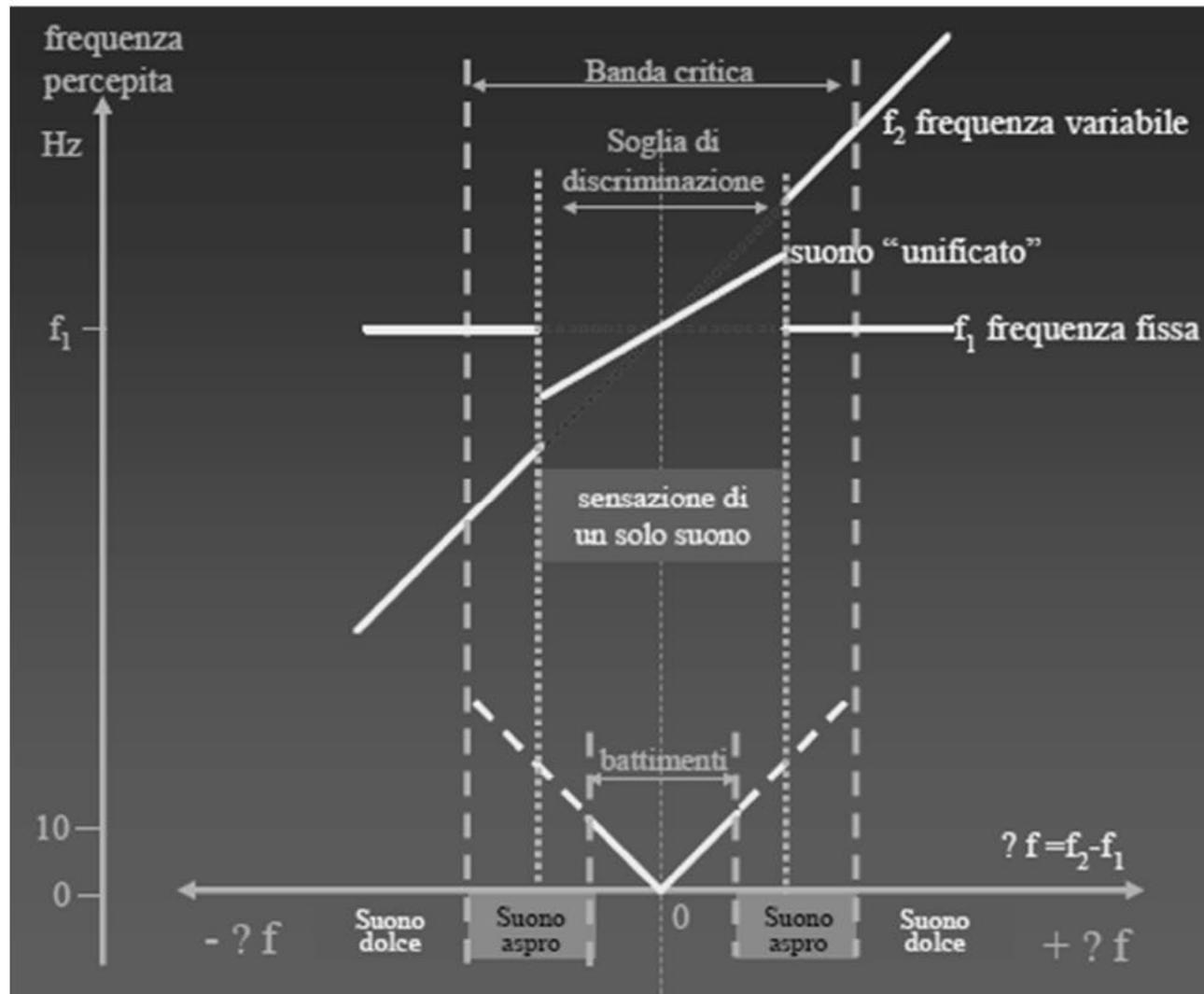
# 3.5 SOVRAPPOSIZIONE DI SUONI PURI

- **Bande critiche**

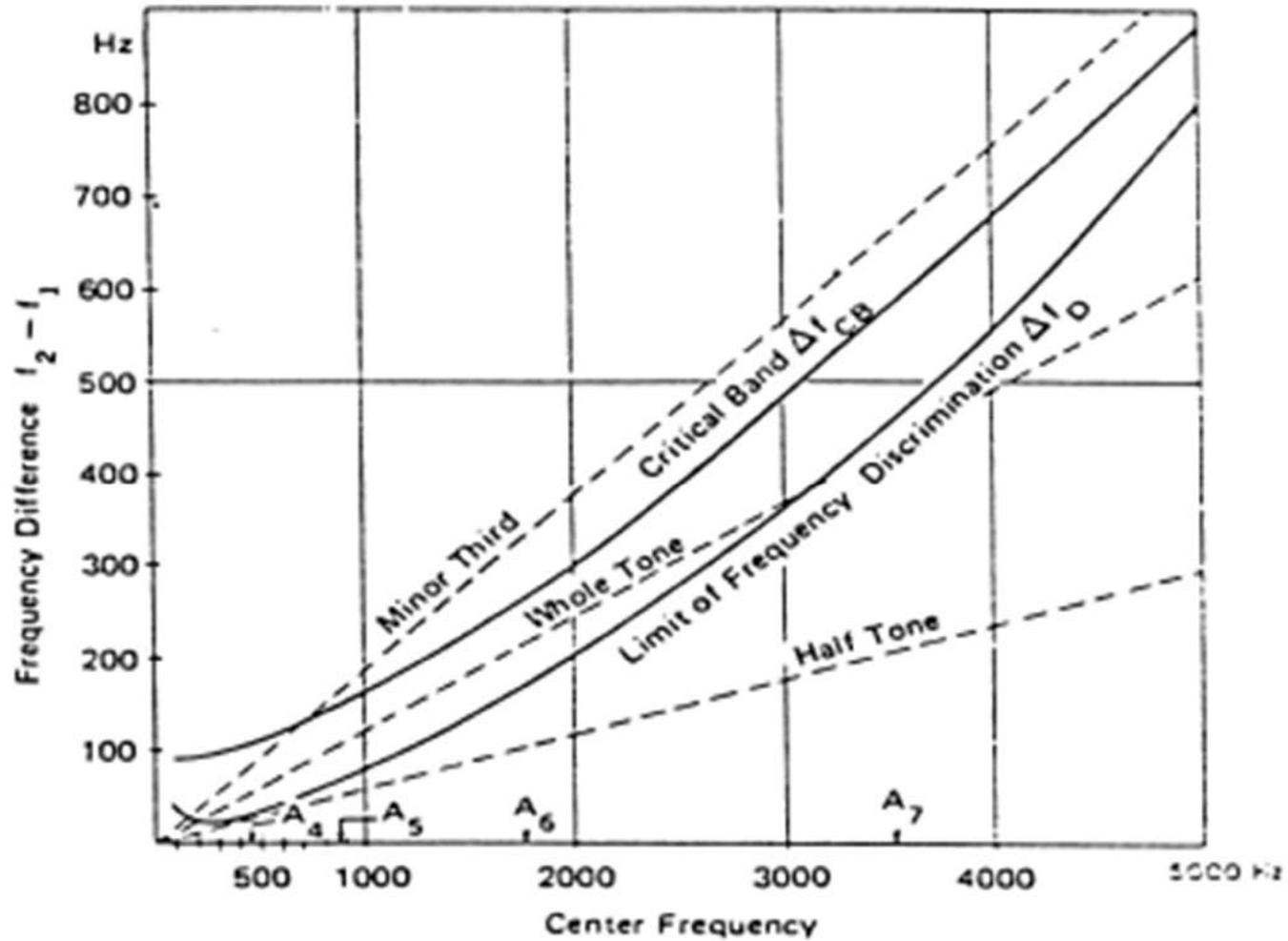
- Relazione tra frequenza centrale ( $f_c$ ) e larghezza della banda critica ( $2\Delta f_{CB}$ )

Banda n.	1	2	3	4	5	6	7	8
Fc Hz	50	150	250	350	450	570	700	840
BW	100	100	100	100	100	120	140	150
Banda n.	9	10	11	12	13	14	15	16
Fc Hz	1000	1170	1370	1600	1850	2150	2500	2900
BW	160	190	210	240	280	320	380	450
Banda n.	17	18	19	20	21	22	23	24
Fc Hz	3400	4000	4800	5800	7000	8500	10500	13500
BW	550	700	900	1100	1300	1800	2500	3500

# 3.5 SOVRAPPOSIZIONE DI SUONI PURI



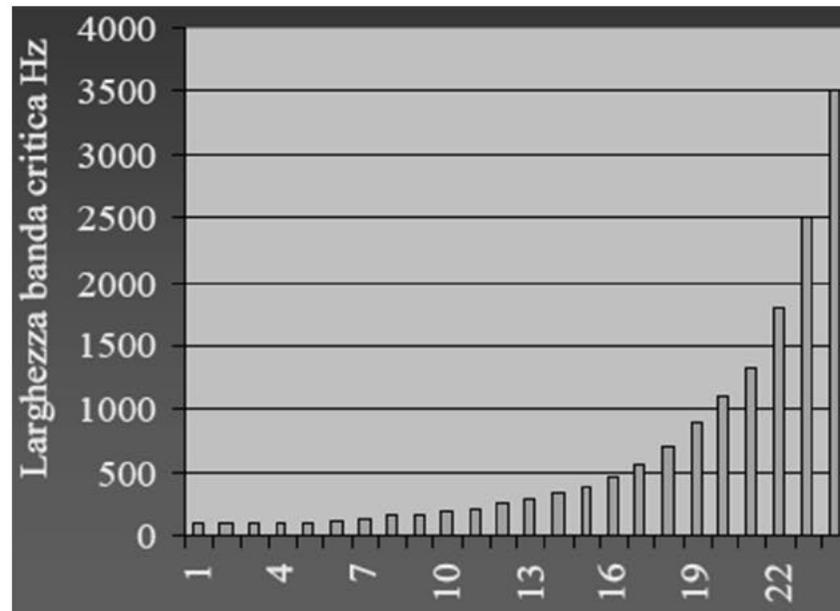
# 3.5 SOVRAPPOSIZIONE DI SUONI PURI



# 3.5 SOVRAPPOSIZIONE DI SUONI PURI

- **Bande critiche**

- La larghezza di banda ( $2\Delta f_{CB}$ ) cresce in maniera esponenziale



# 3.5 SOVRAPPOSIZIONE DI SUONI PURI

- Semitono (rapporto 16/15)
  - Es. 1 (a2-a#2) [File semit a2.wav]
  - Es. 2 (a5-a#5) [File semit a5.wav]
- Tono (rapporto 9/8)
  - Es. 1 (a2-b2) [File tono a2.wav]
  - Es. 2 (a5-b5) [File tono a5.wav]
- Terza minore (rapporto 6/5)
  - Es. 1 (a2-c3) [File terzamin a2.wav]
  - Es. 2 (a5-c6) [File terzamin a5.wav]
- [File battimenti secondo.maxpat]
  - $F_c = 840 \text{ Hz}$  (banda n.8)
  - $BW = 150 \text{ Hz}$  ovvero  $765 \text{ Hz} \div 915 \text{ Hz}$
  - $JND = 150 / 30 = 5 \text{ Hz}$