

ACUSTICA E PSICOACUSTICA MUSICALE

Lezione 1. Oscillazioni e onde

1. Suoni periodici
2. Suoni reali
3. Frequenza, ampiezza e forma d'onda
4. Inviluppo

1. OSCILLAZIONI E ONDE

- Il suono corrisponde a variazioni di pressione nell'aria.
- Le proprietà di queste variazioni determinano le proprietà del suono percepito.
- Molti suoni musicali presentano variazioni regolari di pressione.
 - la regolarità implica che un determinato andamento della pressione si ripeta nel tempo.
- Viene definita ***forma d'onda*** la ripetizione di tale andamento.

1. OSCILLAZIONI E ONDE

- Se la forma d'onda di un suono si ripete invariata nel tempo, il suono è detto **periodico** e la durata della singola forma d'onda è detta **periodo**, indicato con il simbolo **T** e misurato in secondi
- Se la funzione **$p(t)$** indica l'andamento nel tempo della pressione in un punto dello spazio, per un suono periodico si ha la relazione:

$$p(t) = p(t + T)$$

1. OSCILLAZIONI E ONDE

- Nel caso opposto, in cui l'andamento della pressione è privo di qualsiasi regolarità, il segnale associato viene percepito come ***rumore***.
- Il rumore può essere diviso di due classi principali:
 - ***rumore impulsivo***
 - ***rumore stazionario***

1. OSCILLAZIONI E ONDE

- **rumore impulsivo:**
 - è determinato da rapide variazioni di pressione circoscritte nell'arco di pochi millisecondi.
 - Un tipico esempio di rumore impulsivo si ha quando **un corpo rigido viene percosso.**
 - Il rumore impulsivo viene regolarmente generato durante la produzione di suoni musicali (**es. 1** – nel suono di chitarra è chiaramente percepibile il rumore prodotto dal plettro sulla corda; **es. 2** – nel suono di pianoforte è fondamentale per il riconoscimento del timbro il rumore prodotto dal martelletto sulla corda).

1. OSCILLAZIONI E ONDE

- **rumore stazionario**:
 - ha generalmente una elevata estensione temporale ma è privo di regolarità.
 - Tipici esempi di rumore stazionario sono il rumore prodotto dal vento o quello proveniente da uno schermo televisivo in assenza di segnale (***effetto neve***).
 - Per questo genere di segnali audio si ricorre generalmente ad una descrizione statistica dell'andamento della pressione.

1. OSCILLAZIONI E ONDE

- I **suoni periodici** sono alla base della musica occidentale e di molti altri repertori, per cui a questi verrà posta particolare attenzione.

1.1 I SUONI PERIODICI

- Ogni funzione che genera un segnale periodico può essere suddivisa nella somma di funzioni elementari (**es.** funzioni sinusoidali) (*teorema della scomposizione in serie di **Fourier***).
- In campo musicale si è soliti descrivere un suono periodico in termini di **frequenza**, usualmente indicata con il simbolo ***f*** e misurata in **Hertz (Hz)**. Il legame tra periodo ***T***, misurato in **secondi (s)** e frequenza ***f*** è descritto dalla formula

$$f = \frac{1}{T}$$

1.1 I SUONI PERIODICI

- La scomposizione di un suono periodico di frequenza f in forme d'onda elementari, indica che queste avranno rispettivamente frequenze f , $2f$, $3f$, $4f$ ecc.
- La sinusoide di frequenza f , pari alla frequenza del suono periodico di partenza, è detta ***fondamentale*** mentre le sinusoidi di frequenza multipla intera di f vengono dette ***parziali***.
- Si fa riferimento alle forme d'onda elementari che costituiscono un suono con il termine ***armoniche***.

1.1 I SUONI PERIODICI

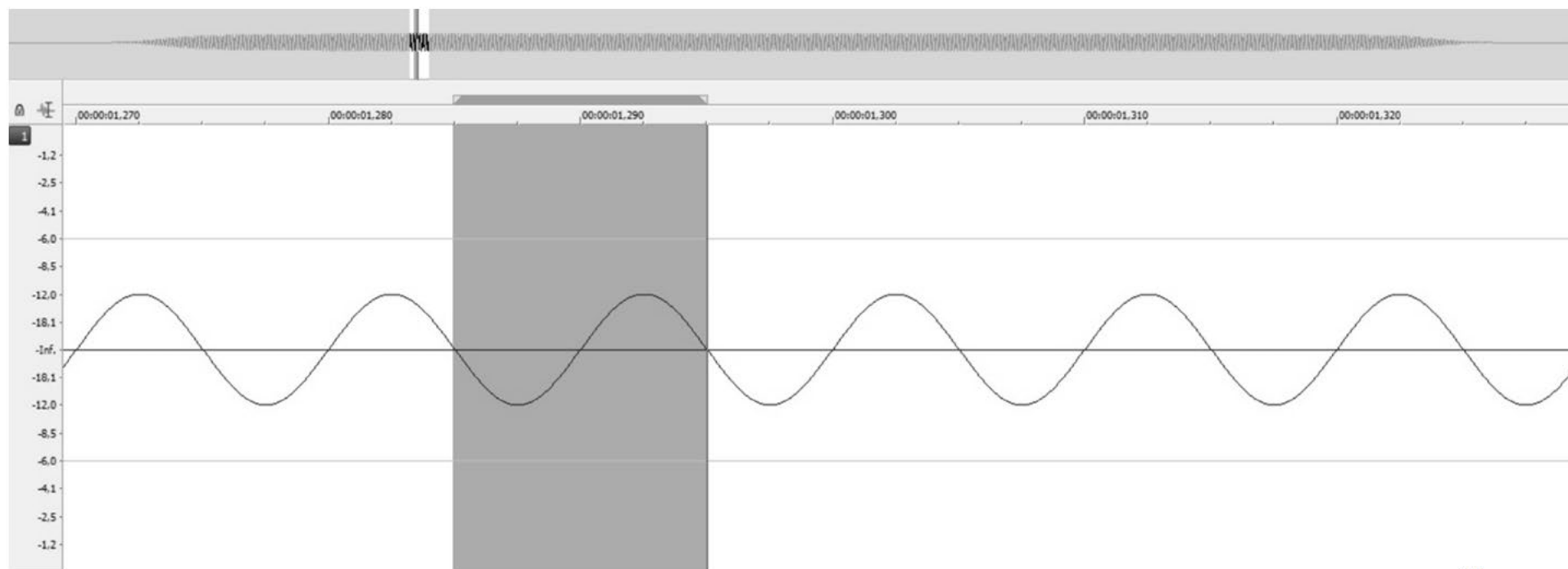
- La **frequenza** è associata alla sensazione di altezza (***pitch***) di un suono
- Maggiore è la frequenza, maggiore risulta l'altezza del suono, in altre parole il suono risulta **più acuto**.

1.1 I SUONI PERIODICI

- Andamento nel tempo di un segnale sinusoidale



- ***Es. $f = 100 \text{ Hz}$, $T = ?$***



1.1 I SUONI PERIODICI

- Andamento nel tempo di un segnale periodico (somma di 4 sinusoidi)



- ***Es. somma progressiva 4 sin f_0
= 100 Hz, ratio = 2, 3, 4***

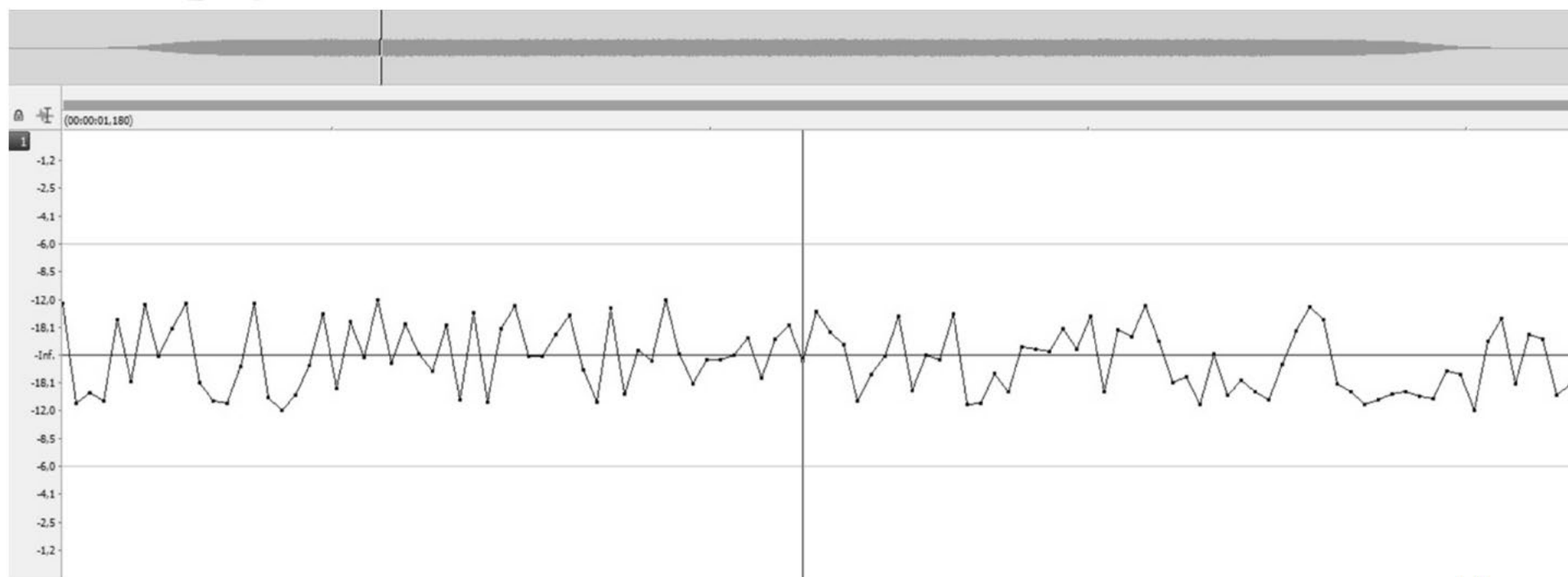


1.1 I SUONI PERIODICI

- Andamento nel tempo di un segnale aperiodico



- ***Es. white noise***



1.1 I SUONI PERIODICI

- Gli **esseri umani** sono in grado di percepire suoni nell'intervallo di frequenze da circa 20 Hz a circa 16 kHz, talvolta fino a 20 kHz.
- L'estensione di un **pianoforte**, così come l'estensione di un'**orchestra sinfonica**, va da 27.5 Hz a 3729.3 Hz.
- Al di sotto di 15 Hz, le variazioni di pressione non vengono più percepite come un singolo suono ma come una **rapida successione di impulsi (treno di impulsi)**.
- Frequenze al di sopra della soglia di udibilità (**ultrasuoni**) non vengono percepite, quindi il filtraggio del segnale audio al di sopra dei 20 kHz non ne altera la qualità percepita.

1.1 I SUONI PERIODICI

- ***TEOREMA DI SHANNON E NYQUIST***

- E' sempre possibile riprodurre digitalmente un segnale analogico a patto che la frequenza di campionamento del segnale digitale ecceda il doppio della frequenza più acuta del segnale analogico che viene riprodotto.
- In base a questo teorema la frequenza di campionamento dei Compact Disc (44.1 kHz) e' sufficiente per una perfetta ricostruzione del segnale analogico originario dal punto di vista percettivo.
- In realtà non è proprio così.

1.2 I SUONI REALI

- La sinusoide è la più semplice forma d'onda perché non è ulteriormente scomponibile.
- I suoni prodotti dagli strumenti musicali acustici non hanno però mai un andamento così semplice.
- I **suoni naturali** infatti sono sempre costituiti da serie di armoniche, che contribuiscono a dare ricchezza ai suoni musicali.

1.2 I SUONI REALI

- La forma d'onda di un suono prodotto da una corda è la risultante di un insieme di sinusoidi a frequenza multipla di una frequenza fondamentale.
- Analogamente, considerando i modi di vibrazione di un tubo acustico, si può dimostrare che un tubo aperto da entrambe le estremità può vibrare alle frequenze:

$$f_i = \frac{i\pi c}{L}$$

- dove c è la velocità del suono in aria e L è la lunghezza del tubo. La lettera i indica il numero del parziale ($i = 1 \rightarrow$ freq. fondamentale)

1.2 I SUONI REALI

- Una delle tecniche più efficaci per l'analisi dei suoni è l'**analisi di Fourier**, ovvero la scomposizione dei suoni prodotti dagli strumenti musicali acustici in elementi fondamentali (le sinusoidi).

1.2 I SUONI REALI

- In realtà, i suoni prodotti dagli strumenti musicali non hanno mai un comportamento così regolare.
- Innanzitutto le armoniche hanno un rapporto che solo approssimativamente può essere espresso come rapporto tra interi.
- Ad esempio la corda reale si differenzia dalla corda ideale principalmente a causa di questa **inarmonicità**:
 - le parziali risultano avere dei rapporti leggermente maggiori dei numeri interi previsti dalla teoria (si dice in questo caso, usando il lessico musicale, che le parziali sono **crescenti** rispetto alla fondamentale).

1.2 I SUONI REALI

- Alcuni suoni reali inoltre sono caratterizzati proprio a causa dell'assenza di armonicità.
- E' il caso delle **campane**, nelle quali non è nemmeno presente il termine relativo alla fondamentale e le armoniche hanno rapporti solo approssimativamente armonici.

1.2 I SUONI REALI

- Una seconda caratteristica dei **suoni reali** è che questi non sono mai esattamente periodici: le forme d'onda si ripetono nel tempo assumendo degli andamenti simili, ma non del tutto uguali.
- L'orecchio percepisce quindi un andamento approssimativamente periodico, ma percepisce anche le variazioni nella forma d'onda, che contribuiscono a dare dinamicità al suono prodotto.
- Infatti una delle caratteristiche dei **suoni di sintesi** è appunto l'eccessiva regolarità del loro sviluppo temporale.
- Questo spesso si traduce nella percezione di un suono che rapidamente diventa poco interessante per l'ascoltatore.

1.3 FREQUENZA, AMPIEZZA E FORMA D'ONDA

- **Frequenza, ampiezza e forma d'onda** sono tre parametri fondamentali del suono. Ognuno di questi parametri influenza nell'ascoltatore la percezione sonora, in particolare:
 - a) la possibilità di distinguere un suono grave da uno acuto (**frequenza**)
 - b) la possibilità di distinguere un suono di forte intensità da uno di intensità minore (**ampiezza**)
 - c) la possibilità di distinguere diversi timbri (**forma d'onda**)

1.3 FREQUENZA, AMPIEZZA E FORMA D'ONDA

- corrispondenze fra caratteristiche fisiche del suono, parametri musicali e sensazione sonora

CARATTERISTICA	PARAMETRO MUSICALE	SENSAZIONE
Frequenza	Altezza	Acuto ↔ Grave
Ampiezza	Intensità	Forte ↔ Piano
Forma d'onda	Timbro	(Chiaro ↔ Scuro Armonico ↔ Inarmonico etc.)

TABELLA A : corrispondenza fra caratteristiche del suono, parametri musicali e sensazione sonora

1.3 FREQUENZA, AMPIEZZA E FORMA D'ONDA

- **Frequenza**

- è il parametro fisico che determina l'altezza di un suono
- Infrasuoni → gamma udibile → ultrasuoni
- Gamma udibile: 20 – 20000 cicli al secondo (Hz)
- **Suono**
 - quel fenomeno meccanico dato da una perturbazione di un mezzo di trasmissione (in genere l'*aria*) che abbia caratteristiche tali da essere percepito dall'orecchio umano

1.3 FREQUENZA, AMPIEZZA E FORMA D'ONDA

- Le compressioni e le espansioni si propagano poi con una certa velocità attraverso l'aria circostante in tutte le direzioni, dando luogo a **onde sferiche**

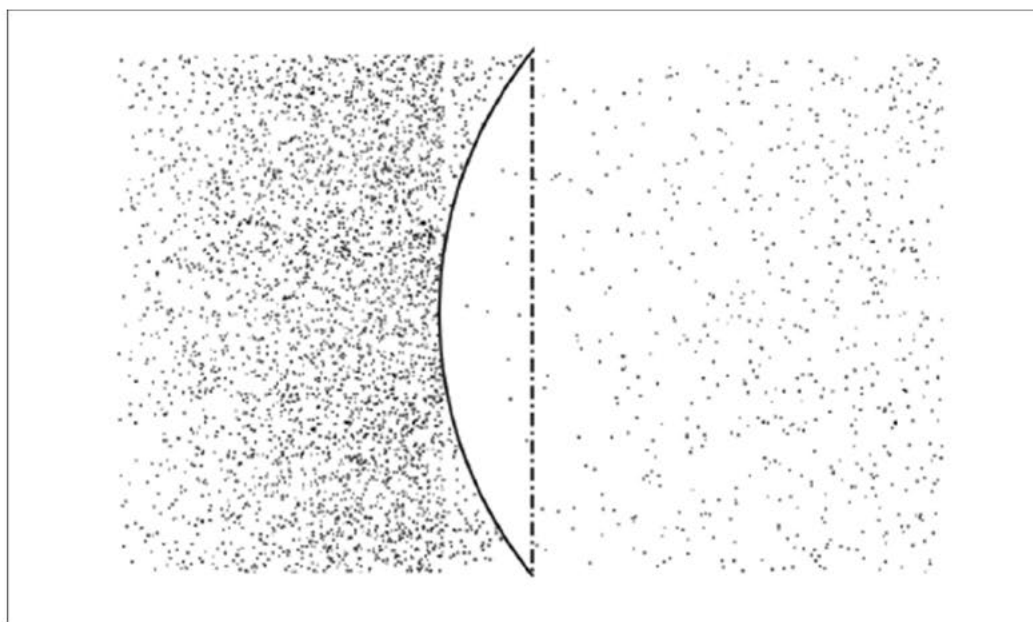


fig. 1.6: vibrazione di una corda

1.3 FREQUENZA, AMPIEZZA E FORMA D'ONDA

- Inizialmente la densità delle molecole d'aria è costante, cioè in ogni unità di volume (per esempio in un cm^3) vi è lo stesso numero di molecole.
- Questa densità può essere espressa da un valore di ***pressione***.
- Quando l'aria viene perturbata, il valore di pressione non è più costante, ma varia da punto a punto: aumenta dove le molecole sono compresse, diminuisce dove le molecole sono espanse

1.3 FREQUENZA, AMPIEZZA E FORMA D'ONDA

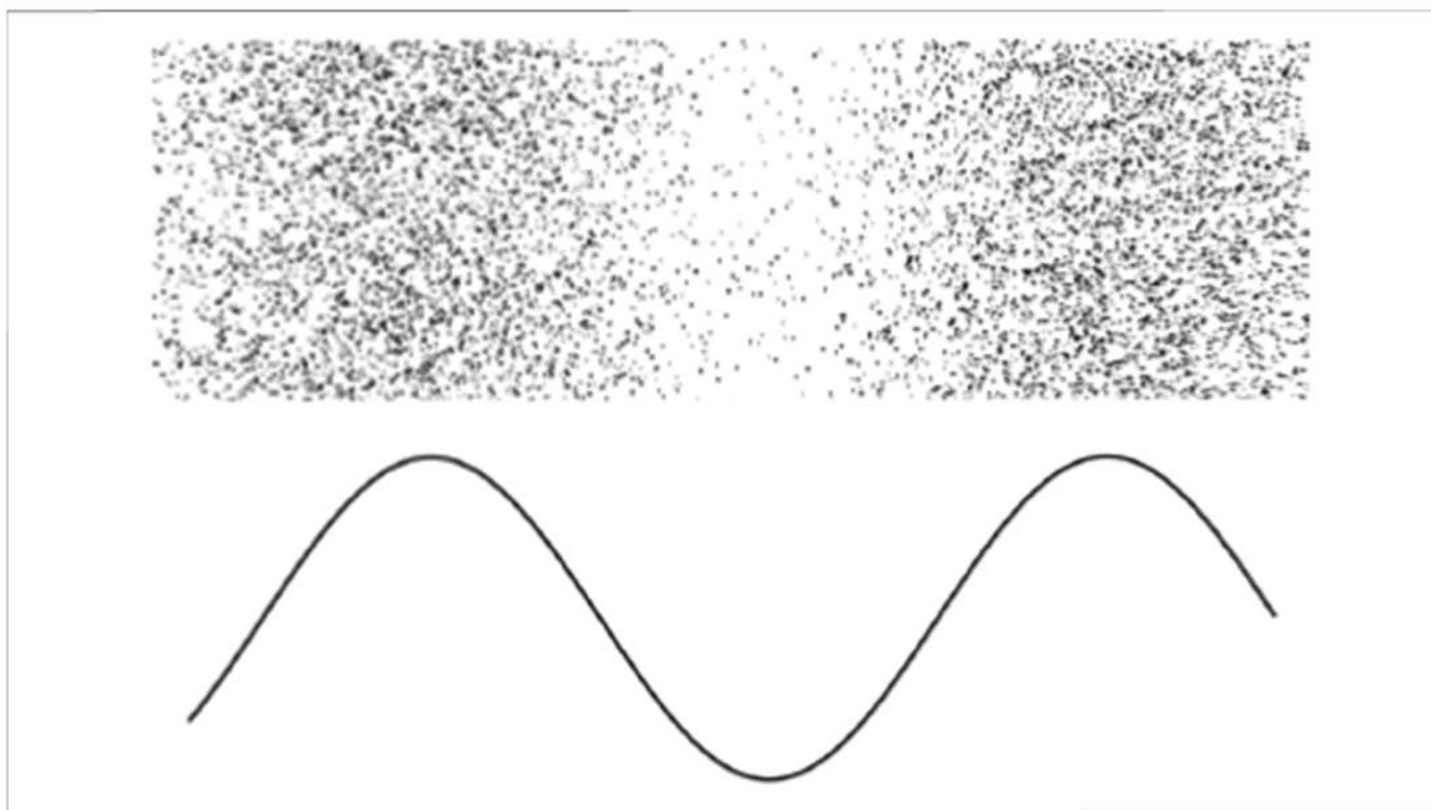


fig.1.7: compressione e rarefazione delle molecole dell'aria

1.3 FREQUENZA, AMPIEZZA E FORMA D'ONDA

- Il fenomeno può essere studiato
 - dal punto di vista dello **spazio** (osservando il valore della pressione nei vari punti in un determinato istante)
 - dal punto di vista del **tempo** (misurando il valore della pressione in uno stesso punto in funzione del tempo)
- se immaginiamo di trovarci in un determinato punto, assisteremo a una successione di compressioni ed espansioni dell'aria

1.3 FREQUENZA, AMPIEZZA E FORMA D'ONDA

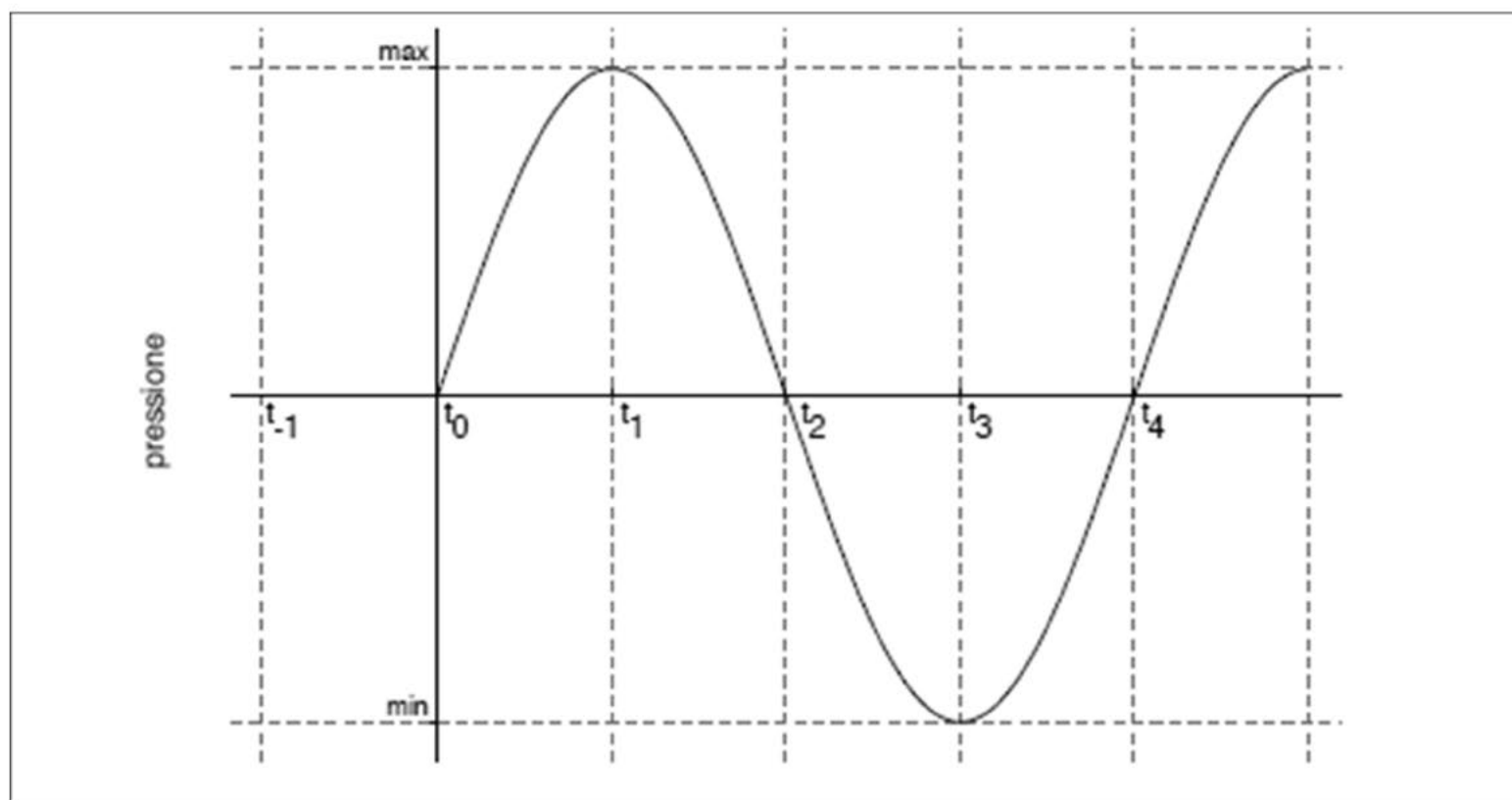


fig.1.8: rappresentazione grafica di compressione e rarefazione

1.3 FREQUENZA, AMPIEZZA E FORMA D'ONDA

- All'istante **t-1**, ovvero prima dell'istante **t0** la pressione dell'aria è al suo valore normale, dato che la perturbazione non è ancora giunta al nostro punto di osservazione
- All'istante **t0** la perturbazione giunge al nostro punto di osservazione, la pressione inizia a crescere, giunge al massimo all'istante **t1**, poi decresce fin a tornare al valore normale all'istante **t2**, continua a decrescere e giunge al minimo all'istante **t3**, per poi risalire fino al valore normale all'istante **t4**, e così via
- Questo è **un ciclo** del fenomeno

1.3 FREQUENZA, AMPIEZZA E FORMA D'ONDA

- Se un **ciclo** si ripete sempre allo stesso modo il fenomeno si dice periodico.
- Il tempo necessario al completamento di un ciclo si dice **periodo**
 - si indica con il simbolo **T**
 - si misura in secondi (**s**) o in millisecondi (**ms**).
- L'inverso del periodo, cioè il numero di cicli che vengono completati in un secondo, si dice **frequenza**, si indica con la lettera **f** e si misura in Hertz (**Hz**) o cicli per secondo (**cps**)

1.3 FREQUENZA, AMPIEZZA E FORMA D'ONDA

- Es. un'onda sonora ha periodo $T=0.01$ s (cioè 1/100 di secondo) la sua frequenza sarà di: $1/T = 1/0.01 = 100$ Hz (o 100 cicli al secondo)

1.3 FREQUENZA, AMPIEZZA E FORMA D'ONDA

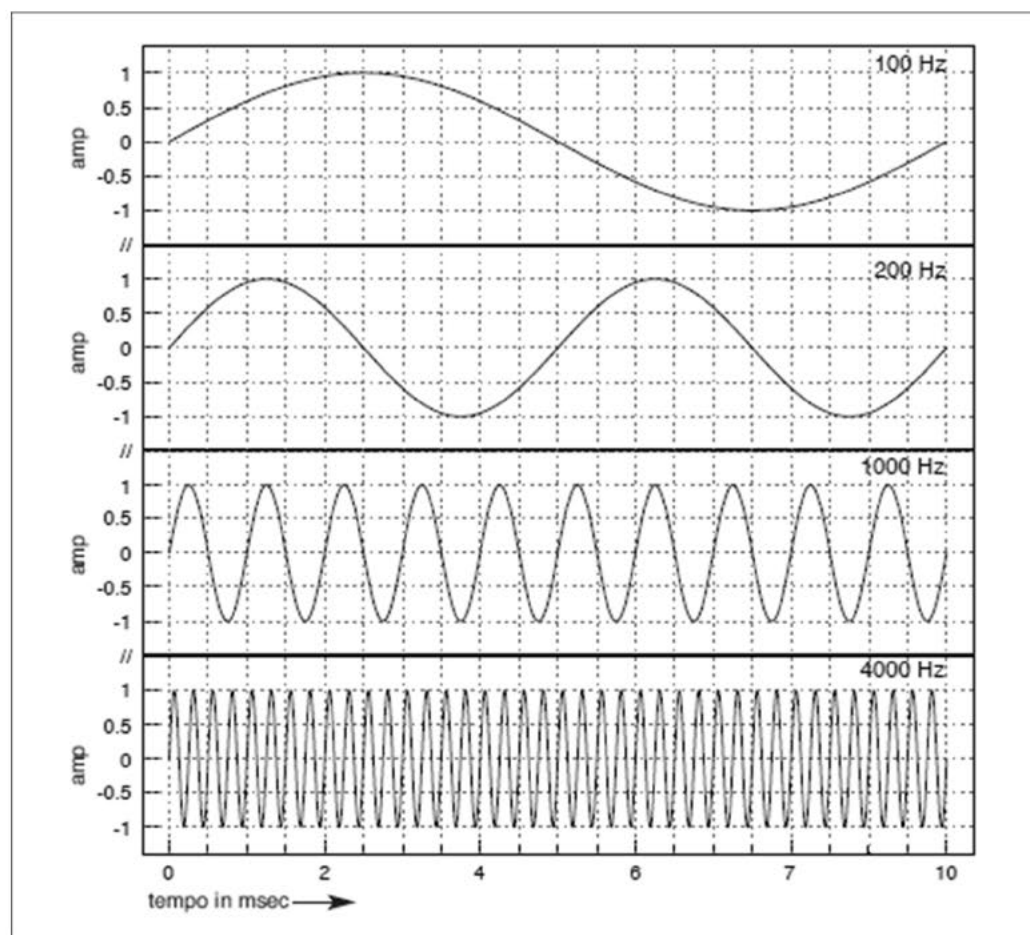


fig.1.9: quattro suoni di frequenza diversa



1.3 FREQUENZA, AMPIEZZA E FORMA D'ONDA

- Dal momento che si propaga nello spazio, un'onda ha una **lunghezza (λ)** che è inversamente proporzionale alla sua frequenza
 - La velocità del suono nell'aria a 21° è 344 m/s
- $F = 1 \text{ Hz} \rightarrow \lambda = 344 \text{ m}$ (quando ha completato un ciclo è passato un secondo e si è dispiegata nello spazio per una lunghezza di 344 m)
- $F = 10 \text{ Hz} \rightarrow \lambda = 34,4 \text{ m}$ (in un secondo compie 10 cicli, che si dispongono nello spazio di 344 metri occupando ciascuno 34.4 m)
- $F = 100 \text{ Hz} \rightarrow \lambda = 3,44 \text{ m}$

1.3 FREQUENZA, AMPIEZZA E FORMA D'ONDA

- All'aumentare della frequenza f diminuisce la lunghezza d'onda λ
 - Le due grandezze sono inversamente proporzionali
- All'aumentare della frequenza f diminuisce il periodo T
 - Le due grandezze sono inversamente proporzionali

1.3 FREQUENZA, AMPIEZZA E FORMA D'ONDA

- **Ampiezza**

- dà informazioni sulla variazione della pressione sonora
- permette di distinguere un suono di forte intensità da uno di intensità debole
 - La pressione sonora più debole che l'orecchio umano è in grado di percepire si dice **soglia inferiore di udibilità**
 - la pressione sonora massima che un ascoltatore umano può sopportare si dice **soglia del dolore**

1.3 FREQUENZA, AMPIEZZA E FORMA D'ONDA

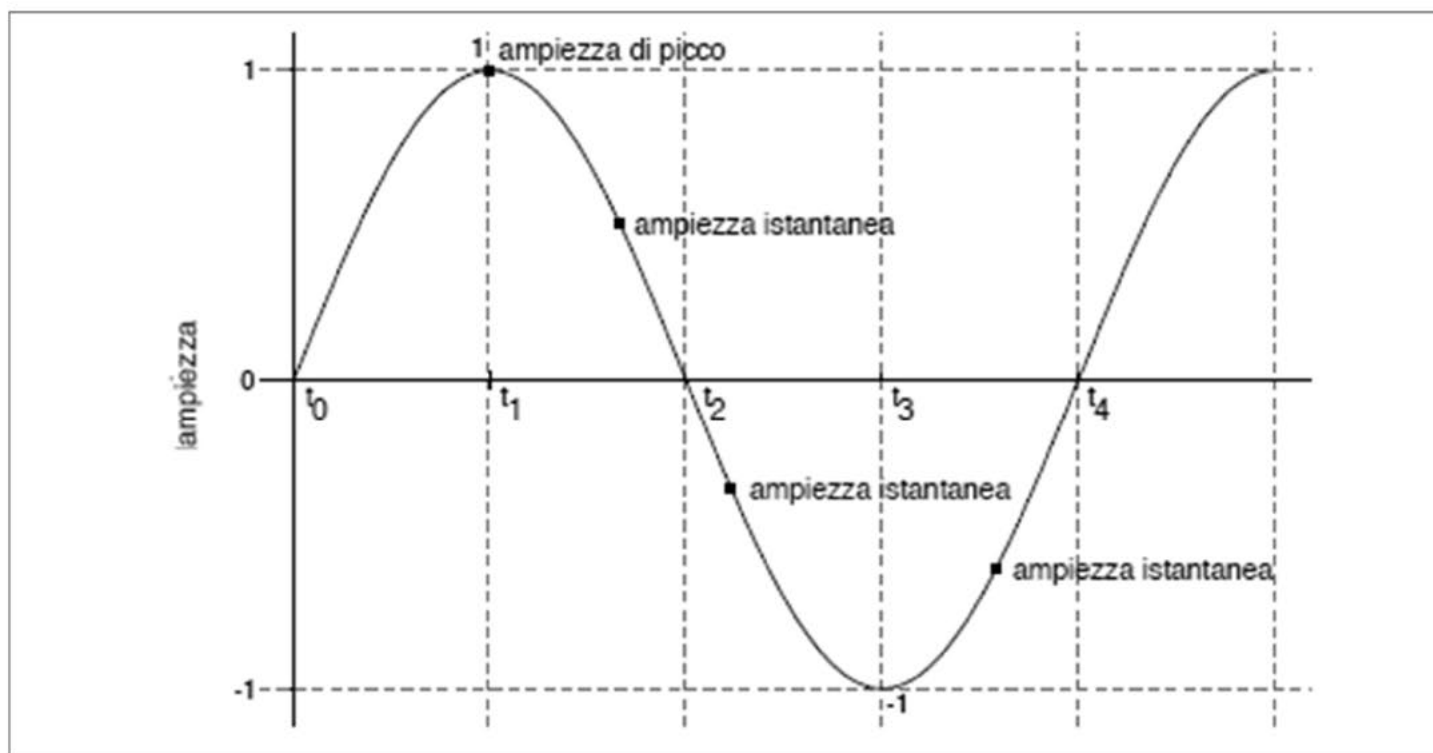


fig.1.10: ampiezza di un suono

1.3 FREQUENZA, AMPIEZZA E FORMA D'ONDA

- il valore massimo della pressione si dice **ampiezza di picco** dell'onda sonora
- il valore della pressione in un punto qualsiasi si dice invece **ampiezza istantanea**
 - Quando si indica l'ampiezza di un suono (**A**), ci si riferisce al valore dell'ampiezza di picco del suono stesso

1.3 FREQUENZA, AMPIEZZA E FORMA D'ONDA

- $A = 1$ significa:
 - $A_{t0} = 0$
 - $A_{t1} = 1$
 - $A_{t2} = 0$
 - $A_{t3} = -1$
 - $A_{t4} = 0$
 - Ecc.
- La posizione in cui si trova il ciclo di un'onda in un determinato istante viene chiamata **fase**

1.3 FREQUENZA, AMPIEZZA E FORMA D'ONDA

- Nell'audio digitale la rappresentazione dell'ampiezza di un'onda sonora in funzione del tempo viene codificata in una serie di numeri compresi tra 1 e -1

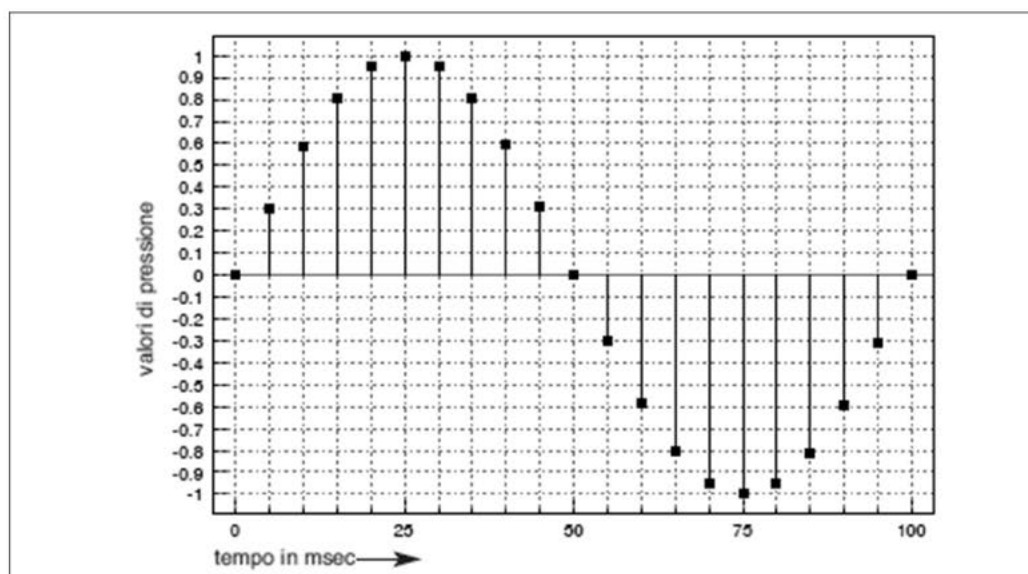
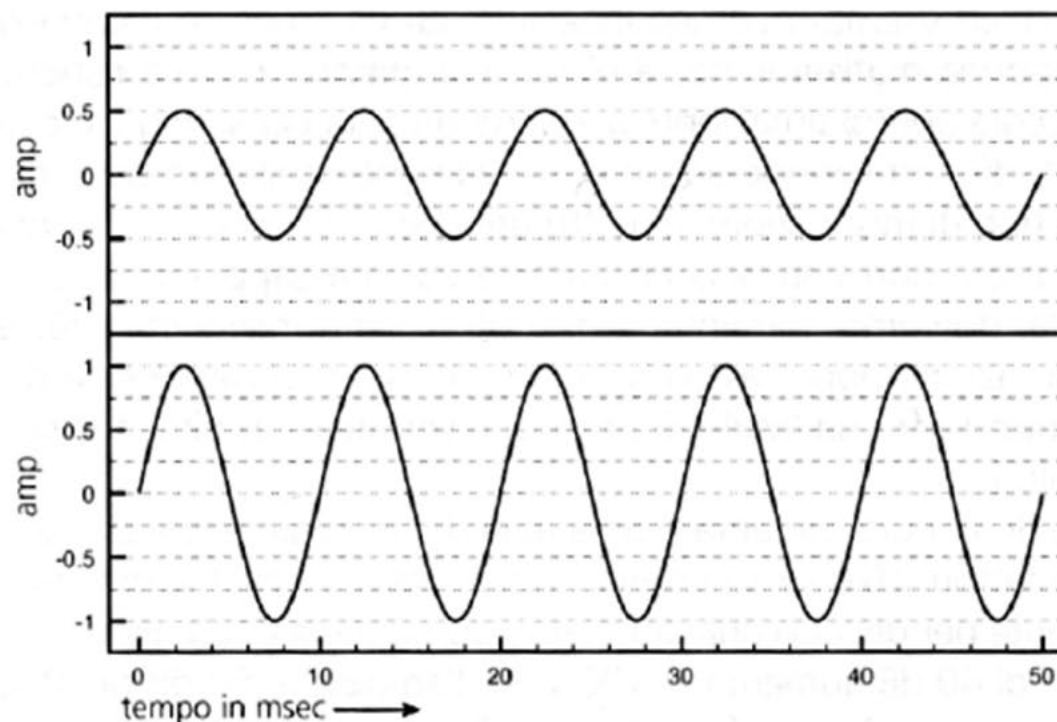


fig. 1.11: rappresentazione digitale di una forma d'onda.

1.3 FREQUENZA, AMPIEZZA E FORMA D'ONDA

- Facendo un confronto con l'onda reale (cioè con la successione di compressioni ed espansioni delle molecole dell'aria), possiamo vedere che
 - la **compressione** corrisponde ai numeri positivi
 - l'**espansione** corrisponde ai numeri negativi
 - il **valore 0** indica una pressione non perturbata (l'assenza di segnale corrisponde digitalmente a una sequenza di zeri).
- I valori di ampiezza sono espressi in numeri con la virgola e variano tra 0 e 1

1.3 FREQUENZA, AMPIEZZA E FORMA D'ONDA

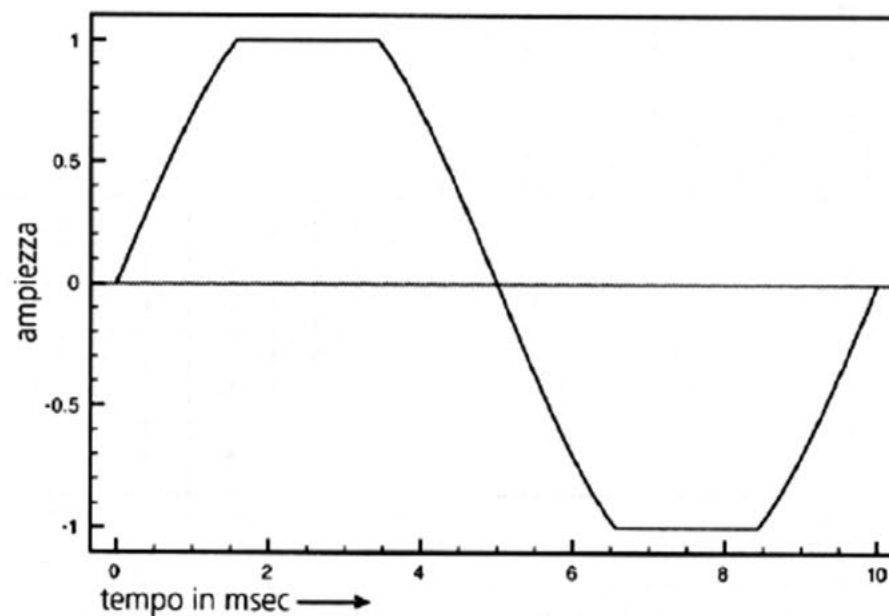


- Se $A = 1$ avremo oscillazioni tra 1 e -1, se ad esempio $A = 0.5$ (metà dell' A massima) avremo oscillazioni tra 0.5 e -0.5

1.3 FREQUENZA, AMPIEZZA E FORMA D'ONDA

- Se l'ampiezza del segnale in uscita verso la scheda audio supera il valore massimo consentito dal sistema (es. $A = 1.2 \div -1.2$), tutti i valori >1 e <-1 vengono «schiacciati» (*normalizzati*) su 1 e -1. l'onda viene deformata e il segnale risulta distorto.

1.3 FREQUENZA, AMPIEZZA E FORMA D'ONDA



1.4 INVILUPPO DEI SUONI

- Considerando la musica come una forma di comunicazione ottenuta attraverso l'organizzazione dei suoni, risulta evidente che **un suono perfettamente periodico in senso matematico (ovvero un suono che si ripete indefinitamente) non consente alcuna forma di comunicazione.**
- I suoni musicali vengono quindi organizzati nella scala dei tempi; in particolare **ogni suono ha un inizio e una fine** che vengono percepiti dall'ascoltatore.

1.4 INVILUPPO DEI SUONI

- Grossa importanza nella comunicazione musicale ha l'**evoluzione nel tempo della forma d'onda**.
- Come si è visto un suono è caratterizzato principalmente da una **frequenza**, legata alla percezione del *pitch*, e da una **ampiezza** delle oscillazioni della pressione, legata alla percezione di intensità.

1.4 INVILUPPO DEI SUONI

- Una forma d'onda elementare che evolve nel tempo può quindi essere espressa dalla formula:

$$s(t) = A(t) \cdot \sin(2\pi f t)$$

- ***dove f è la frequenza del suono e $A(t)$ è l'inviluppo di ampiezza del segnale.***

1.4 INVILUPPO DEI SUONI

- Per meglio chiarire il concetto di inviluppo di ampiezza, prendiamo come esempio la generazione di un suono da una corda di violino eccitata con l'archetto.
- In condizioni di riposo la corda ha ovviamente vibrazione nulla, e quindi non produce alcun suono.
- Quando il violinista inizia a sfregare l'archetto sulla corda, questa inizia a vibrare abbandonando la situazione di riposo.
- **Esiste un periodo di tempo nel quale le oscillazioni della corda, da nulle, si fanno sempre più ampie.**
- Questa viene definita *fase di attacco* e solitamente indicata con il corrispondente termine inglese ***attack***.

1.4 INVILUPPO DEI SUONI

- La fase di ***attack*** dura solitamente pochi centesimi di secondo, in relazione al tipo di strumento musicale.
- La fase successiva a quella di ***attack*** (**transitorio d'attacco**) è definita con il termine inglese ***decay***:
 - corrisponde ad un *rapido assestarsi della ampiezza ad un valore stabile* dopo una sovraelongazione a cui è stata portata dalla fase di ***attack***.

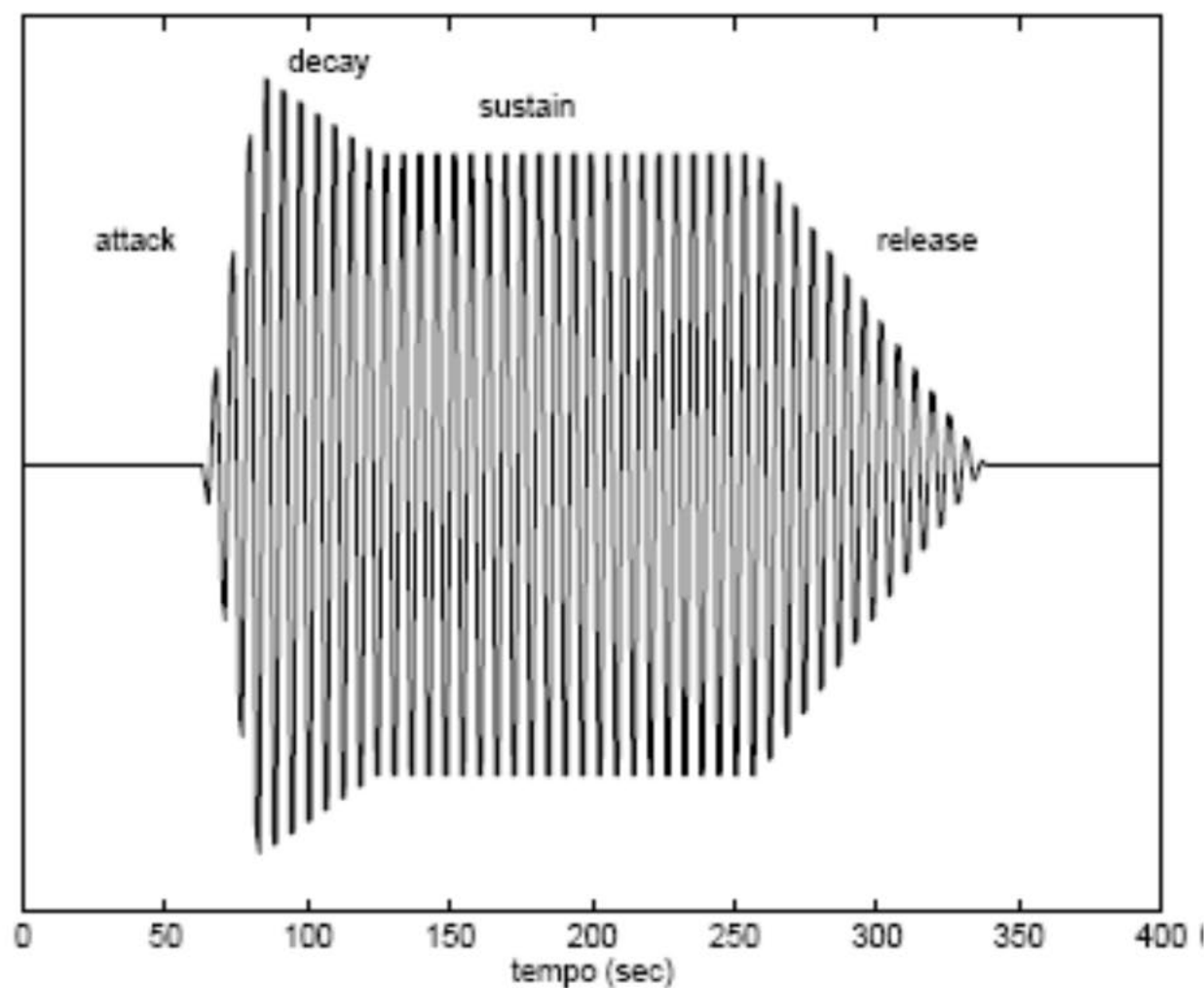
1.4 INVILUPPO DEI SUONI

- Anche il ***decay*** è molto rapido.
- A questo punto, esaurito il transitorio di attacco, si è realizzato un accoppiamento tra lo sfregamento dell'archetto e le oscillazioni della corda.
- Questo corrisponde alla fase di ***sustain*** (***costanza***), che *può durare anche parecchi secondi*, nella quale il suono viene sostenuto dal musicista, che continua a fornire l'energia necessaria per mantenere le vibrazioni.

1.4 INVILUPPO DEI SUONI

- L'ultima fase, che ha inizio nel momento in cui il musicista smette di mantenere eccitato il sistema di vibrazione, viene denominata **release** (ovvero *rilascio*) e corrisponde al tempo in cui il corpo vibrante (nel nostro esempio la corda di violino) smorza l'entità delle vibrazioni, fino a portarsi nuovamente nello stato di quiete.

1.4 INVILUPPO DEI SUONI



1.4 INVILUPPO DEI SUONI

- In Figura [slide 52] sono illustrate le quattro diverse fasi descritte.
- In questo caso la **funzione inviluppo $A(t)$** è stata approssimata con la successione di quattro segmenti, ma in generale può assumere degli andamenti molto più complessi, solitamente seguendo una curva esponenziale.
 - Va peraltro sottolineato che spesso, in sede di sintesi, si preferisce approssimare l'inviluppo con delle spezzate, poiché si è visto che la qualità sonora dei risultati non viene compromessa da questa approssimazione.

1.4 INVILUPPO DEI SUONI

- L'andamento dell'ampiezza di picco di un suono (cioè la linea ideale che congiunge i picchi positivi della sua forma d'onda) si chiama **inviluppo dell'onda**
- L'inviluppo rappresenta al macro-livello l'evoluzione dell'ampiezza nel tempo
- In esso possiamo rintracciare, al micro-livello, tutte le ampiezze istantanee del suono