Pisani
Studio di
Ingegneria Acustica

via Alessandro Manzoni, 6 – 10090 Sangano (TO)
Tel. 011-9561261 Fax 011-19908509
e-mail: *sia.pisani@tin.it*

ANALISI ACUSTICA E PSICOACUSTICA PER LA DETERMINAZIONE DELLA QUALITA' SONORA DEGLI STRUMENTI AD ARCO

Convegno AIA 2014

Raffaele Pisani (1), Andrea Michetti (2), Paolo Onali (1), Chiara Devecchi (1)

1) Studio Ingegneria Acustica Pisani, Rivoli (TO)
2) Microtex S.a.s., Almese (TO)

1. Premessa

Il liutaio procede alla messa a punto dello strumento che costruisce con criteri percettivi legati alla sua sensibilità. Sovente, al termine della costruzione, declassa lo strumento non ritenendolo adeguato alla qualità voluta. Numerosi fattori concorrono al raggiungimento della qualità desiderata; il liutaio più evoluto chiede di poter disporre di strumenti di analisi in grado di poter prevedere, in fase di costruzione, la resa futura dello strumento anche con un accettabile grado di approssimazione.

In linea più generale si tende ad oggettivare, mediante opportune misurazioni di grandezze fisiche, il concetto soggettivo di qualità. Si richiede, cioè, un processo di quantificazione per attribuire ad un suono di uno strumento musicale un valore da confrontare con i gradi di una determinata scala che, partendo da un suono "sgradevole", raggiunga il grado soggettivo di "estremamente piacevole".

Una quantificazione in termini di piacevolezza di un suono musicale comporta questioni di natura soggettiva di estetica che coinvolgono, in linea di principio due aspetti:

1. Un aspetto legato alle caratteristiche fisiche del suono (livello, timbro, altezza, durata, etc.)
2. Un aspetto soggettivo legato al meccanismo uditivo della percezione unitamente al gusto estetico sviluppato da una determinata persona.

I metodi di analisi elettroacustica, seppure d'aiuto, non colgono il meccanismo soggettivo di percezione dei suoni che consente al liutaio di produrre strumenti di qualità.

E' stato definito un protocollo di misura, abbinato ad un programma di analisi dei suoni, che consente di esplorare sia l'aspetto fisico del suono sia l'aspetto percettivo e le eventuali correlazioni. Lo schema di misura prevede i seguenti passi:

1. Si registrano i suoni generati dalle quattro corde libere dello strumento.
2. Si registrano le scale diatoniche eseguite sulle quattro corde.
3. Si registrano colpi d'arco (arcate di adeguata intensità) per caratterizzare il transitorio.

Il programma di analisi fornisce non solo stimatori tradizionali quali il livello sonoro, lo spettro, l'evoluzione delle armoniche nella fase di transitorio, ma anche stimatori definiti nell'ambito della psicoacustica in termini di intensità percepita (loudness), di timbro, di evoluzione della loudness di ciascuna armonica in fase di transitorio, di rapporti energetici legati alla percezione etc.

2. La percezione dei suoni musicali

Le relazioni tra valori misurati (livelli sonori, spettri etc) e sensazioni soggettive di intensità sono state già studiate in passato mediante prove di ascolto. Sono emersi i fenomeni di mascheramento di suoni ad opera di altri di maggiore intensità, relazioni non lineari di intensità soggettiva percepita, legate alla durata dei suoni stazionari ed alla percezione di suoni impulsivi. La risposta soggettiva ai suoni espressi attraverso le tradizionali tecniche di misurazione è ben nota: si pensi, ad esempio, alla differenza tra giudizio di accordatura di un pianoforte eseguita da un accordatore ed il risultato misurato con un frequenzimetro.

I suoni musicali, contrariamente ai rumori, presentono evoluzioni temporali delle loro periodicità che li caratterizzano da un punto di vista armonico.

La misura della intensità soggettiva percepita (Loudness espressa in Son; scala definita con prove di psicoacustica) può essere eseguita adottando un modello che rappresenti il funzionamento dell'orecchio a partire dal suono captato dal padiglione auricolare sino alla trasformazione in impulsi neurali che raggiungono il cervello.

Sono stati messi a punto diversi criteri di valutazione, successivamente resi oggetto di normative, tra cui il metodo proposto da Zwicker e Fastl (ISO 532 B - anno 1975) ed il criterio di Moore e Glasberg (norma americana ANSI S3.4-2007).

Entrambi i modelli definiscono proprie "funzioni di trasferimento" dal padiglione auricolare fino alla finestra ovale della coclea. Si differenziano sul criterio di implementazione del filtro uditivo, rappresentato da un banco di filtri con larghezze di banda chiamate "bande critiche" espresse in Bark secondo Zwicker e mediante bande rettangolari equivalenti ERB secondo il modello di Glasberg e Moore.

Per implementare il programma di calcolo della Loudness anche per suoni variabili nel tempo, si è preferito seguire il metodo di Glasberg e Moore che impiega filtri ERB più adatti, a nostro avviso, ad analizzare i suoni musicali, ovvero "sintonizzabili" sulle frequenze dei suoni percepiti.

3. Lo sviluppo del programma di analisi

Storicamente i criteri di misura della Loudness erano stati definiti per rumori stazionari. L'applicazione a segnali variabili nel tempo è stata sviluppata successivamente con criteri diversi da Fastl e da Glasberg. Si rimanda alla norma ANSI per approfondire il criterio del calcolo dei cosiddetti "Auditory filters" ed alla costruzione della eccitazione "excitation pattern" in uscita dal banco di filtri uditivi. Entrambi i metodi giungono al calcolo della cosiddetta Loudness specifica ("specific loudness" espressa in son/ERB) che, nel nostro caso, viene espressa in Son/Hz per una immediata comprensione. Sommando i valori della Loudness specifica si ottiene il valore di Loudness complessiva in Son. Si può esprimere tale grandezza come livello espresso in phon mediante i criteri stabiliti dalle norme. Si ricorda che il calcolo della Loudness specifica ha, come punto di forza, la codificazione del fenomeno di mascheramento in frequenza che si produce, secondo i modelli indicati, per effetto delle larghezze dei segmenti della membrana basilare posti in vibrazione da suoni di determinate frequenze ed intensità.

Per l'analisi di segnali variabili nel tempo non è conveniente procedere con segmentazione temporale del segnale e successivo calcolo individuale dei valori di Loudness poiché si rende necessario introdurre il meccanismo del mascheramento della sensazione uditiva in funzione della durata dei suoni elementari. Il criterio per calcolare il pattern di eccitazione (sistema implementato nel calcolo messo a punto), proposto da Moore, si basa sul metodo di analisi spettrale a risoluzione multipla (multi-resolution

spectral analysis) mediante analisi FFT multiple e parallele calcolate su finestre temporali dello stesso segnale ma di durate diverse. L'analisi procede per finestre temporali che avanzano di 1 ms per ottenere, in questo modo un diagramma storico della Loudness istantanea ad elevata risoluzione temporale. La serie di valori della Loudness istantanea è opportunamente pesata nel tempo per giungere alla Loudness calcolata su tempo breve (short-term loudness STL) che esprime meglio il concetto di Loudness variabile nel tempo e sul cui andamento possono essere calcolati diversi descrittori psicoacustici.

4. Analisi dei suoni stazionari delle corde libere

Si registrano i suoni delle corde libere di un violino ad 1 m di distanza dallo strumento, condotto dal violinista, mediante l'impiego di una sonda intensimetrica, necessaria per verificare la reattività del campo sonoro nel punto di misura. Il segnale viene analizzato per determinarne lo spettro e per calcolare la Loudness di ciascuna armonica.

Nei grafici di Figura 1 si riporta lo spettro medio della corda del SOL del violino e la Loudness specifica per ciascuna armonica calcolata con il criterio di Glasberg e Moore.

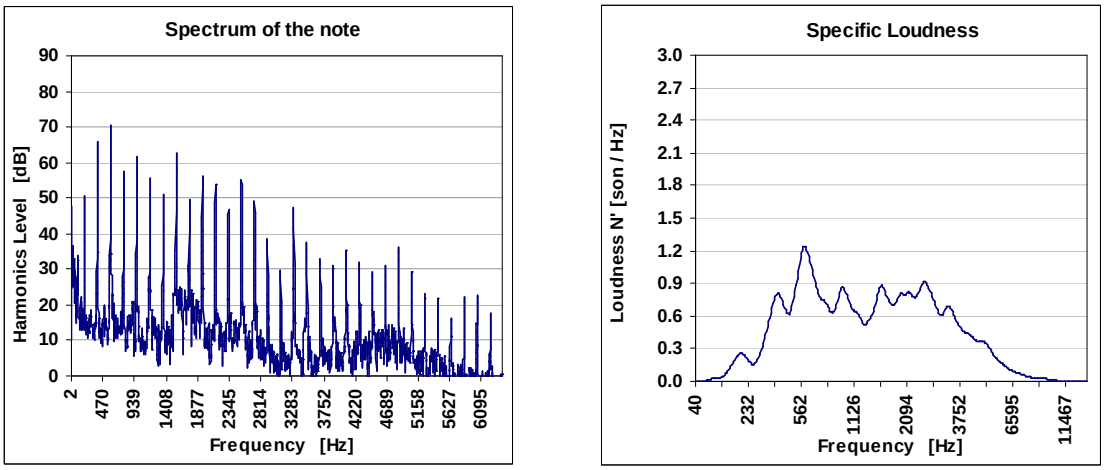


Figura 1 – spettro della nota SOL e calcolo della Loudness specifica espressa in son/Hz.

Dai valori del Loudness di ciascuna armonica si calcola un valore di loudness complessivo ed altri indici descrittori del timbro.

Il risultato del calcolo della Loudness in Son per ciascuna armonica è riportato, con linea continua, sul grafico delle armoniche di Figura 2. Si riporta il livello di ciascuna armonica (in rosso), il valore della Loudness in Son e la larghezza di banda (ERB) la cui frequenza di centro banda coincide con la frequenza dell'armonica. La rappresentazione grafica della larghezza di banda consente di osservare che oltre la settima armonica comincia a verificarsi la sovrapposizione delle bande con l'insorgere dei fenomeni di mascheramento.

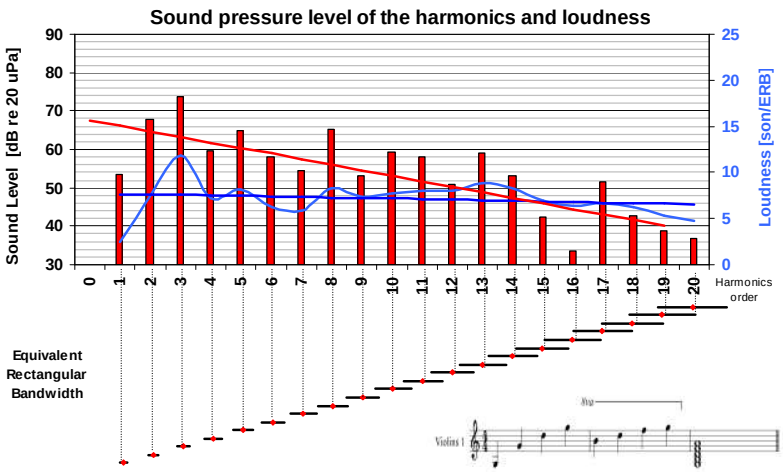


Figura 2 – Livello delle armoniche e valore di Loudness espressa in Son/ERB

Dai valori di Loudnessin Son e di Livello Sonoro in dB di ciascuna armonica si calcolano: i livelli di Loudness e i livelli sonori complessivi, i livelli delle prime 5 armoniche e delle successive (dalla sesta alla ventesima armonica). Si calcolano, quindi, i relativi rapporti energetici (energia delle prime 5 armoniche riferita all'energia complessiva) ed un indice di qualità del Loudness riferito alla percezione della nota ottenuto pesando i valori di Loudness con coefficienti che tengono conto dei rapporti (intervalli) più o meno dissonanti delle diverse armoniche. Si calcolano, infine, i seguenti tre rapporti di Loudness:

$$f_0 = \frac{S_0}{S} \qquad m = \frac{S_m}{S} \qquad h = \frac{S_h}{S} \tag{1}$$

dove:
S0 è la loudness del tono fondamentale [Son];
S_m è la loudness complessiva della seconda, terza e quarta armonica [Son]
S_h è la loudness complessiva delle restanti armoniche [Son]
S è la loudness complessiva del suono prodotto dal violino [Son]

Le tre frazioni energetiche consentono di rappresentare un carattere tridimensionale del timbro (tristimolo, termine mutuato dall'ottica) come sarà più oltre specificato.

Overall Levels and Sound pressure indicators			Overall loudness and Psychoacoustics indicators		
L_{eq}	76.2	dB	Loudness	35.2	son
$L_{A,eq}$	74.0	dB(A)	loud_level	90.6	phon
S/N	21.6	dB	Roughness		asper
ratio of the energies related to the first 5 harmonics			ratio of the loudness related to the first 5 harmonics		
R_{Harm} =	91	%	R_{loud} =	26.3	%
quality index releted to the perception	7.3		m = 0.19	h = 0.8	

5. Omogeneità del suono descritto dall'analisi della scala sulle 4 corde

Il protocollo di misura prevede l'analisi del suono della scala diatonica di una ottava con dominante costituita dalla nota della corda libera.

Il confronto dei valori di Loudness di ciascuna nota fornisce una indicazione della uniformità della sensazione di intensità percepita. Poiché l'accordatura delle quattro corde è operata per intervalli di quinta e le note suonate su ciascuna corda coprono una ottava, risulta evidente che tre note suonate su una corda siano ripetute sulla corda adiacente. La differenza di Loudness delle stesse note su corde diverse fornisce una indicazione ulteriore sulla omogeneità del suono dello strumento Figura 3.

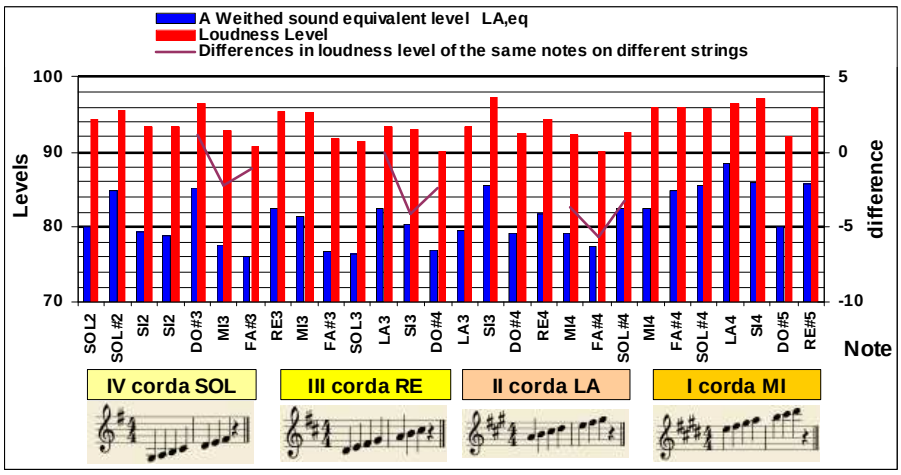


Figura 3 – Comparazione tra i livelli di Loudness (phon) ed i livelli sonori pesati A dB(A) delle note suonate su corde diverse.

In relazione al violino portato ad esempio si osserva che le differenze tra i livelli di Loudness tra le stesse note suonate sulla IV e III corda (linea continua sul grafico) sono inferiori a 2 Phon; queste risultano più contenute delle differenze di circa 5 Phon tra le stesse note suonate sulla II e I corda. Sotto questo aspetto la qualità di uno strumento si esprime con una differenza più contenuta dei livelli di Loudness.

6. Il transitorio d'attacco

Il transitorio di attacco di una singola nota è una componente importante per caratterizzare il timbro percepito da chi ascolta. I tempi di attacco delle singole armoniche ed in particolare la loro evoluzione nel breve intervallo in cui si raggiunge una configurazione stabile sono state analizzate al fine di descrivere gli andamenti temporali dei loro livelli ed in particolare l'evoluzione temporale della loro Loudness. Si richiama il fenomeno relativo alla diversa intensità soggettiva percepita per suoni di breve durata. Sotto questo aspetto la Loudness di suoni non stazionari è stata determinata utilizzando il metodo di Glasberg e Moore.

Il protocollo prevede la esecuzione di una arcata veloce su ciascuna corda libera. Nell'esempio di Figura 4 si analizza il transitorio di attacco della IV corda (Nota SOL). Il segnale transitorio è analizzato in frequenza con la produzione del sonogramma a banda fine e, sincrono con questo, l'evoluzione temporale del livello in dB delle prime 10 armoniche.

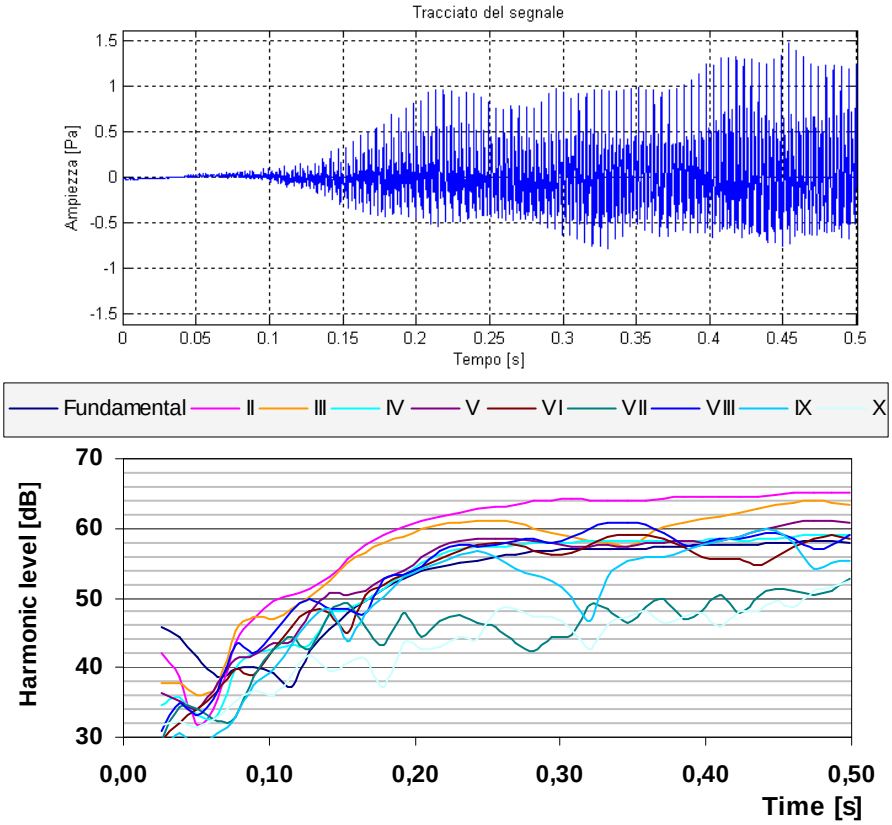


Figura 4 – Evoluzione temporale del segnale e del livello delle armoniche durante l'attacco della nota SOL

I fenomeni di percezione legati alla Loudness di ciascuna armonica ed al mascheramento suggeriscono di analizzare il segnale da un punto di vista psico-fisico. Si trasferisce nel dominio della psicoacustica l'indagine oggettiva riportata nella Figura 4. Si confrontano i sonagrammi tempo-frequenza dei segnali. Nell'ambito fisico l'evoluzione temporale dell'ampiezza delle armoniche è rappresentato dal colore delle stessa. Nell'ambito della psicoacustica, il sonagramma subisce la trasformazione se l'analisi in frequenza non viene effettuata con filtri a banda stretta bensì con filtri legati alle bande critiche (nel caso in ERB). Nella Figura 5 si confrontano i due sonagrammi.

La quantificazione numerica del timbro, in fase di transitorio, è più significativa se si determinano i rapporti di Loudness f_0, m ed h descritti dalle relazioni (1). Tali parametri sono campionati ogni 50 ms. Nella Figura 6 si riportano i valori dei parametri ed il grafico, denominato tristimolo, (codice a tre numeri che rappresenta nelle tre regioni le sensazioni percepite di timbro). Ad esempio se è presente solo un tono puro, f_0 si colloca all'origine degli assi. Valori di f_0 prossimi all'unità accompagnati da valori minimi di m ed h (ad esempio inferiori a 0,1) quantificano un timbro caratterizzato prevalentemente dalla Loudness della frequenza fondamentale. Un suono caratterizzato da valori di m elevati (esempio m=0.8) e valori di h contenuti (esempio h=0,2) rappresentano suoni in cui è soppressa la fondamentale ed è predominante la percezione di medie frequenze.

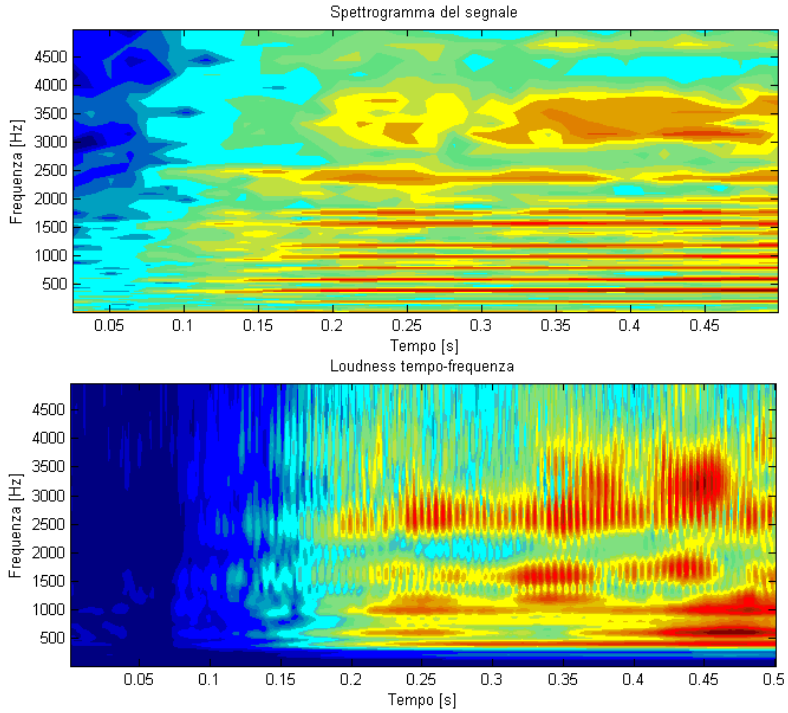


Figura 5 – Sonagrammi a banda stretta (tempo frequenza e livello) e a bande critiche (tempo, frequenza di centrobanda dei filtri ERB e Loudness).

	Regions		
Time [s]	f_0	*m*	*h*
0,05	0,07	0,33	0,60
0,10	0,02	0,30	0,68
0,15	0,01	0,26	0,73
0,20	0,02	0,30	0,68
0,25	0,02	0,31	0,67
0,30	0,02	0,32	0,65
0,35	0,02	0,29	0,69
0,40	0,02	0,31	0,66
0,45	0,02	0,33	0,65
0,50	0,02	0,34	0,63

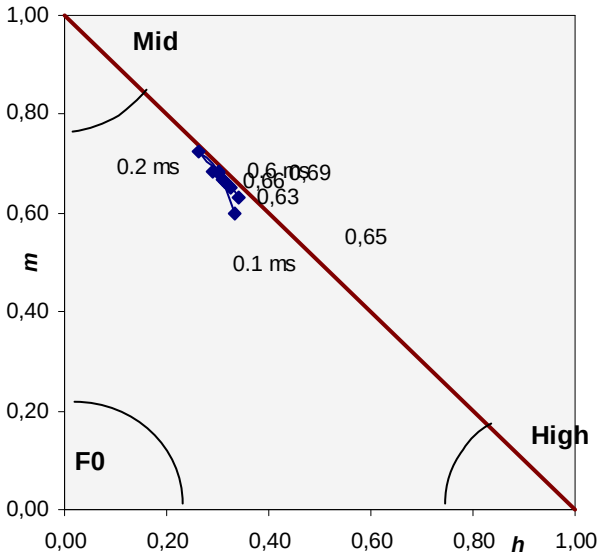


Figura 6 – Rappresentazione dei rapporti che definiscono la variazione del timbro nella fase transitoria.

Nell'esempio di Figura 6 l'evoluzione nel piano nh delle frazioni di Loudness durante la fase transitoria descrivono la curva distante dalla regione f_0 fondamentale appena evidente; il luogo dei punti si avvicina alla regione nella quale prevalgono la Loudness della seconda, terza e quarta armonica.

7. Confronto di due assetti diversi della cordiera

Le analisi descritte consentono di confrontare tra loro strumenti diversi e, nel caso in esame, risposte diverse dello stesso strumento con assetti diversi degli elementi costituenti lo strumento che maggiormente caratterizzano il suono (posizione dell'anima, posizione del ponticello etc.).

E' disponibile, per gli strumenti a corda, una particolare cordiera con profilo tale da variare la lunghezza del tratto di corda tra ponticello e ancoraggio sulla cordiera in modo da risuonare su una quinta giusta. Nel grafico di figura 7 si confrontano le traiettorie dei parametri del transitorio di attacco per la cordiera tradizionale e per quella a profilo variabile.

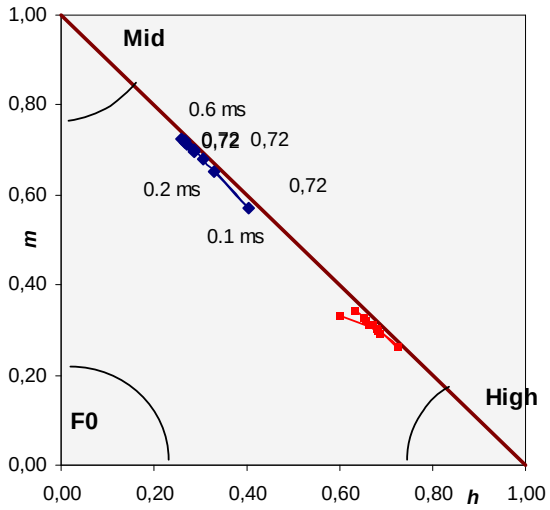


Figura 7 – Confronto degli spazi di esistenza dei rapporti del tristimolo relativo alla nota SOL per lo stesso violino con cordiera tradizionale rettilinea e con cordiera a profilo variabile

I parametri per lo stesso violino con cordiera tradizionale e con cordiera a profilo variabile, si collocano in spazi diversi del grafico (tristimolo) ad indicare uno spostamento della sensazione di timbro da una regione ove predominano le prime armoniche ad un'altra regione ove predominano le armoniche di ordine superiore alla quinta. Il timbro, in questo caso, assume una caratteristica più brillante.

In termini di sensazione sonora complessiva si misura un valore di Loudness pari a 32,9 son per la cordiera di tipo tradizionale ed un valore di 42,8 son per il suono prodotto dalla cordiera ZMT.

8. Bibliografia

[1] James W. Beauchamp, *Analysis, Synthesis, and Perception of Musical Sounds*, Springer Science+Business Media LLC, New York 2007

[2] Howard D.M., Angus J.A.S., *Acoustics and Psychoacoustics*, Focal Press, Oxford 2006

[3] ANSI S3.4-2007, *Procedure for the Computation of Loudness of Steady Sounds.*

PRESENTAZIONE

Pisani
Studio di
Ingegneria Acustica

via Alessandro Manzoni, 6 – 10090
Sangano (TO)
Tel. 011-9561261
Fax 011-19908509
sia.pisani@tin.it

ANALISI ACUSTICA E PSICOACUSTICA PER LA DETERMINAZIONE DELLA QUALITA' SONORA DEGLI STRUMENTI AD ARCO

Raffaele Pisani (1), Andrea Michetti (2),
Paolo Onali (1) Chiara Devecchi (1)

1) Studio di Ingegneria Acustica Pisani, Rivoli (TO)
2) Microtex s.a.s., Almese (TO)

Il liutaio procede alla messa a punto dello strumento che costruisce con criteri percettivi legati alla sua sensibilità estetico-musicale

Spesso si chiede all'acustico di poter disporre di strumenti di analisi in grado di prevedere, in fase di costruzione, la resa futura dello strumento anche con un accettabile grado di approssimazione

In linea più generale si tende ad oggettivare, mediante opportune misurazioni di grandezze fisiche, il concetto soggettivo di qualità.

Una quantificazione in termini di piacevolezza di un suono musicale comporta questioni di natura psicoacustica di estetica che coinvolgono, in linea di principio, due aspetti:

1

un aspetto legato alle caratteristiche fisiche del suono (livello, timbro, altezza, durata, etc.)

2

un aspetto soggettivo legato al meccanismo uditivo della percezione, unitamente al gusto estetico sviluppato da una determinata persona.

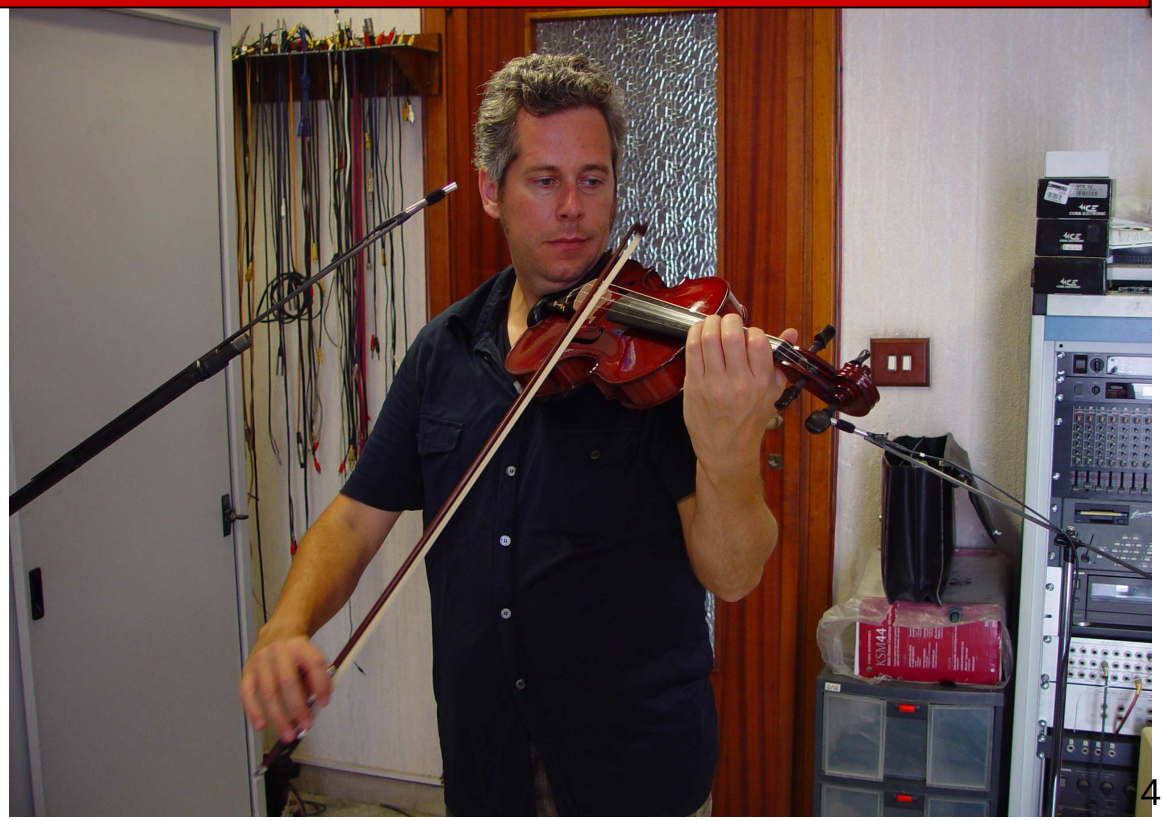
Protocollo di indagine sperimentale

E' stato definito un protocollo di misura, abbinato ad un programma di analisi dei suoni, che consente di esplorare sia l'aspetto fisico del suono, sia l'aspetto percettivo e le eventuali correlazioni. Lo schema di misura prevede i seguenti passi:

a) si registrano i suoni generati dalle quattro corde libere dello strumento

b) si registrano le scale diatoniche eseguite sulle quattro corde

c) si registrano colpi d'arco (arcate di adeguata intensità) per caratterizzare il transitorio



Il programma di analisi fornisce:

- **stimatori tradizionali quali il livello sonoro, lo spettro, l'evoluzione delle armoniche nella fase di transitorio;**
- **stimatori definiti nell'ambito della psicoacustica in termini di intensità percepita (loudness), di timbro, di evoluzione della loudness di ciascuna armonica in fase di transitorio, di rapporti energetici legati alla percezione, etc.**

LA PERCEZIONE DEI SUONI MUSICALI

I suoni musicali, contrariamente ai rumori, presentano evoluzioni temporali delle loro periodicità che li caratterizzano da un punto di vista armonico.

Le relazioni tra valori misurati (livelli sonori, spettri, etc.) e sensazioni soggettive di intensità sono note

Mediante prove di ascolto sono emersi i fenomeni di ***mascheramento*** di suoni ad opera di altri di maggiore intensità, relazioni non lineari di intensità soggettiva percepita, legate alla durata dei suoni stazionari ed alla percezione di suoni impulsivi.

La misura della intensità soggettiva percepita (loudness) può essere eseguita adottando un modello che rappresenti il funzionamento dell'orecchio a partire dal suono captato dal padiglione auricolare sino alla trasformazione in impulsi neurali che raggiungono il cervello.

Tra i metodi proposti sono stati oggetto di normalizzazione quello di Zwicker e Fastl (ISO 532 B - anno 1975) ed il criterio di Moore e Glasberg (norma americana ANSI S3.4-2007)

Entrambi i modelli definiscono proprie “funzioni di trasferimento” dal padiglione auricolare fino alla finestra ovale della coclea.

I due metodi si differenziano per il criterio di implementazione del filtro uditivo:

A Zwicker utilizza un banco di filtri con larghezze di banda chiamate “bande critiche” espresse in Bark

B Glasberg e Moore definiscono filtri a bande rettangolari equivalenti ERB.

Il programma di calcolo della loudness messo a punto per suoni musicali utilizza il metodo di Glasberg e Moore che impiega filtri ERB più adatti ad analizzare i suoni musicali in quanto "sintonizzabili" sulle frequenze dei suoni percepiti.

Determinazione della loudness per segnali stazionari

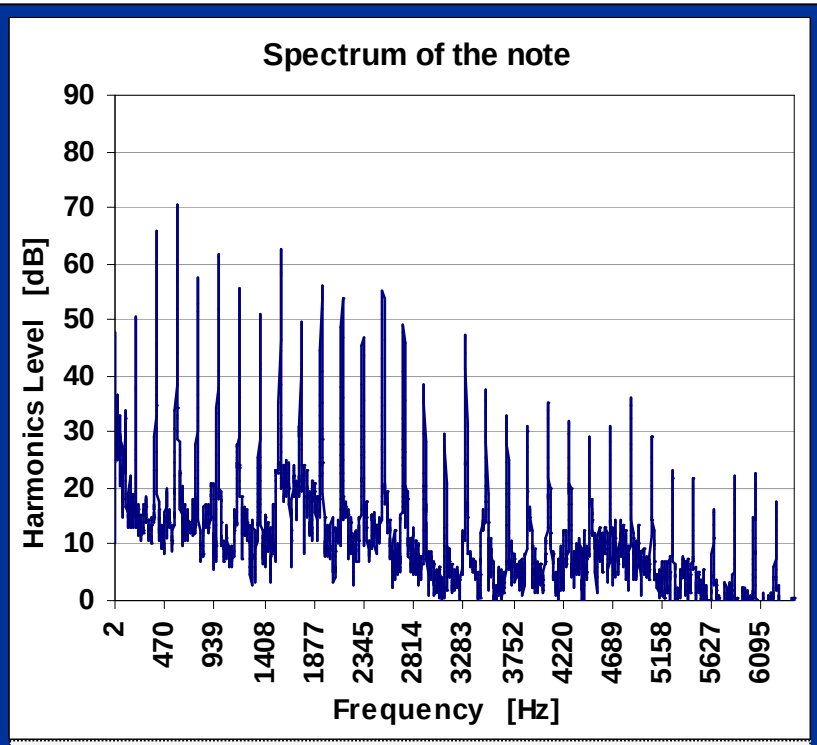
Auditory filters

Il segnale audio rilevato dal microfono viene filtrato con la funzione di trasferimento dall'orecchio esterno fino alla finestra ovale della coclea, tenendo conto anche della risposta della catena degli ossicini.

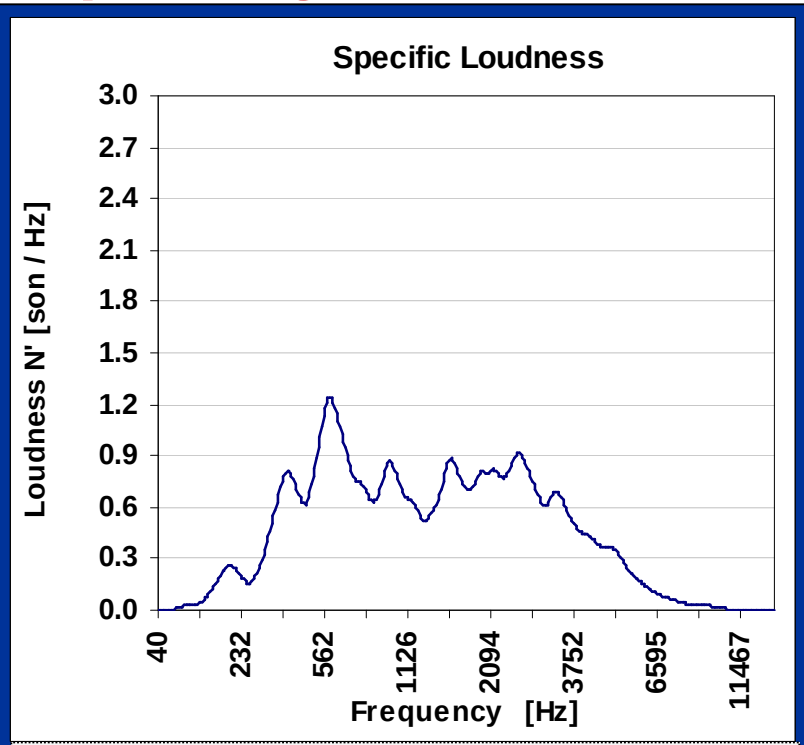
Excitation pattern

La risposta della membrana basilare deve tener conto del fenomeno di mascheramento. Si determina un pattern di eccitazione che permette di giungere al calcolo della cosiddetta loudness specifica ("specific loudness" espressa in son/ERB) che, nel nostro caso, viene espressa in Son/Hz.

Determinazione della loudness per segnali stazionari



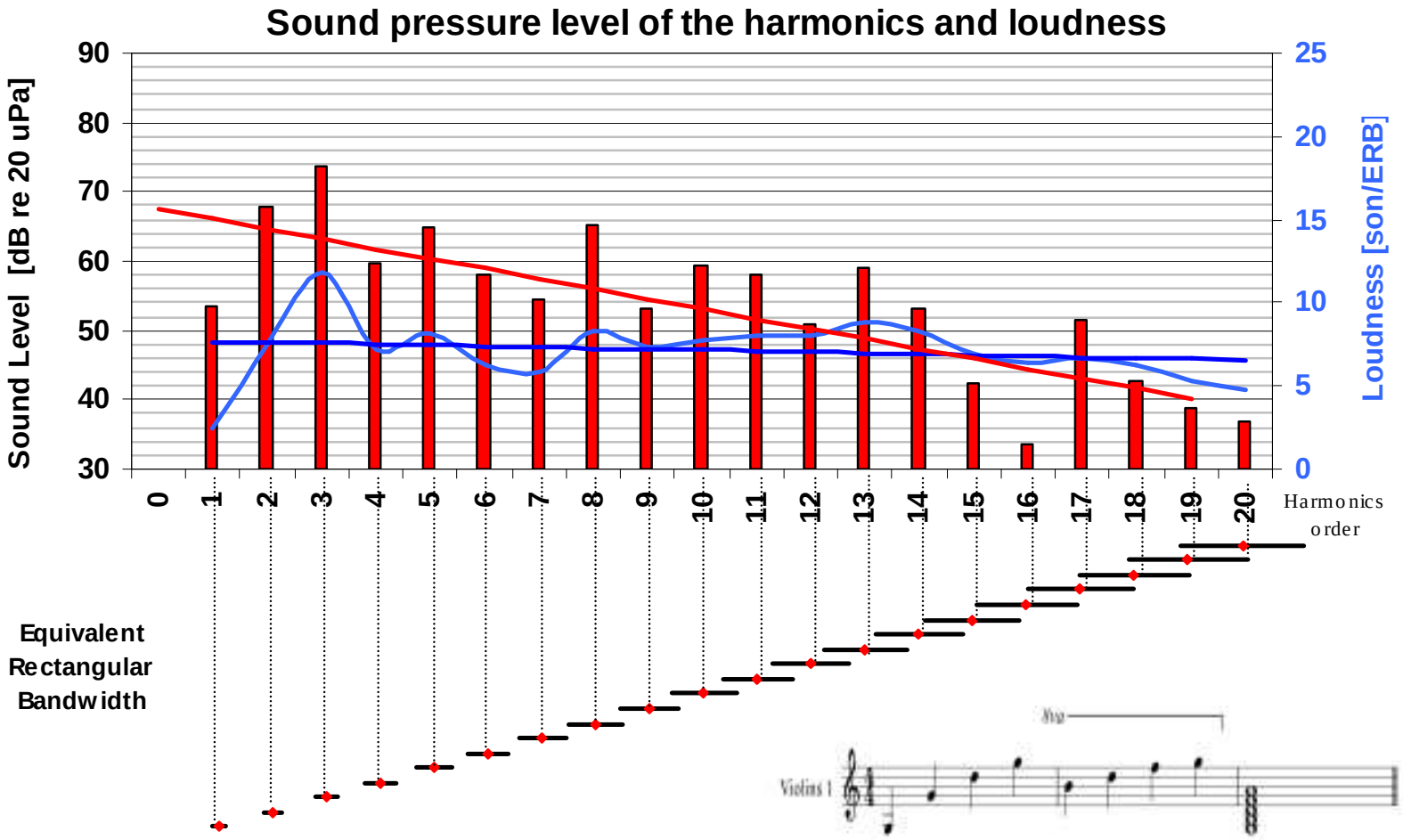
spettro della nota SOL di un violino



calcolo della loudness specifica espressa in son/Hz

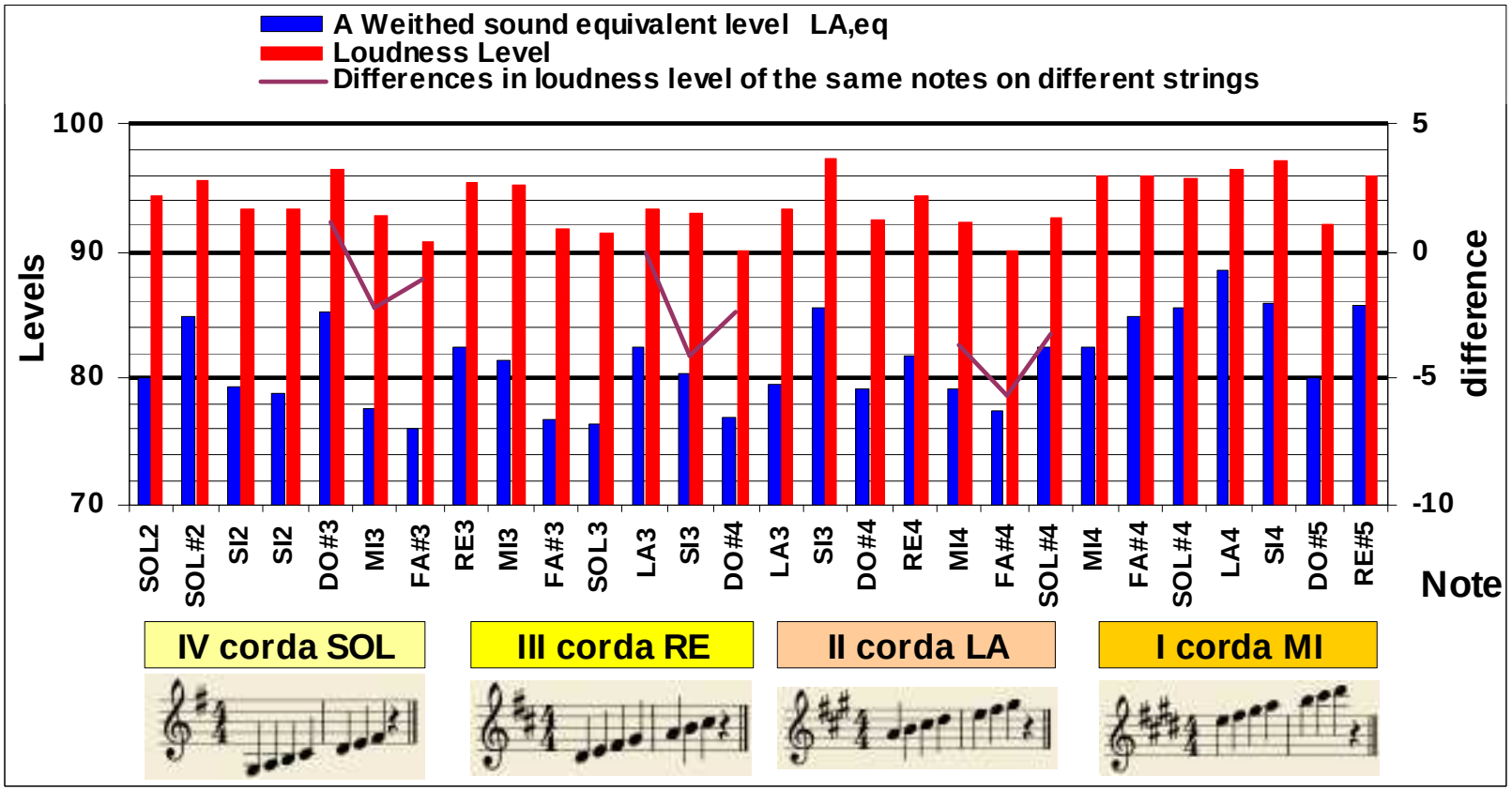
Sommando i valori della loudness specifica si ottiene il valore di loudness complessiva in Son

Determinazione della loudness di ciascuna armonica della IV corda SOL del violino



Le armoniche di un suono stazionario sono percepite con intensità soggettive legate alla frequenza

Loudness Level (phon) e livelli (dBA) delle armoniche delle 4 corde del violino



Si riportano, per ciascun suono, le prime 7 armoniche sulle quali si calcola il livello con curva di pesatura A ed il livello di loudness

Rappresentazione del timbro mediante analisi cosiddetta *"tristimolo"*

Le qualità timbriche di un suono stazionario possono essere espresse dai seguenti rapporti:

$$f_0 = \frac{S_0}{S} \qquad m = \frac{S_m}{S} \qquad h = \frac{S_h}{S}$$

dove:

S0 è la loudness del tono fondamentale [Son];

S_m è la loudness complessiva della seconda, terza e quarta armonica [Son]

S_h è la loudness complessiva delle restanti armoniche [Son]

S è la loudness complessiva del suono prodotto dal violino [Son]

Determinazione della loudness per segnali variabili nel tempo

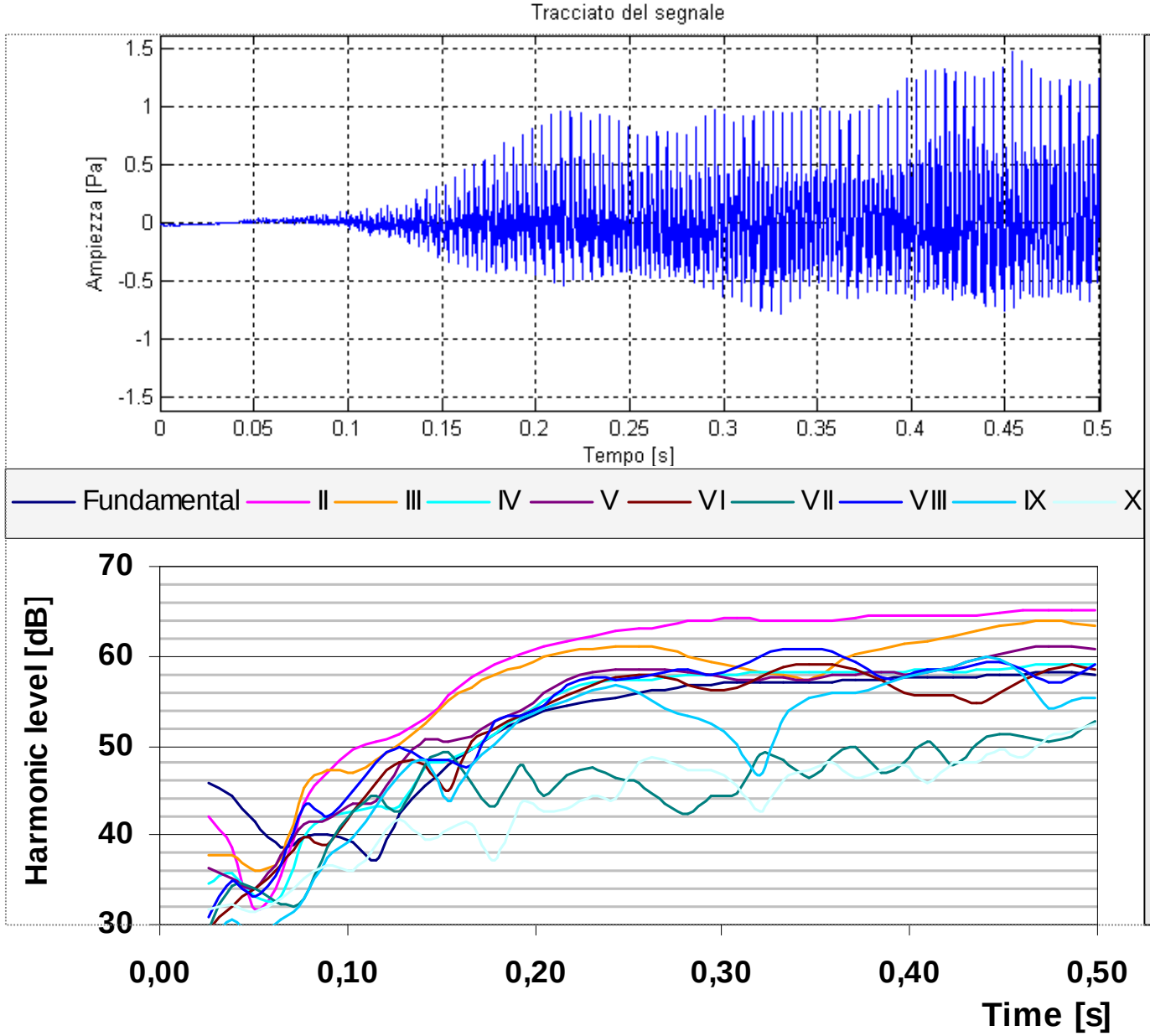
Si introduce il mascheramento della sensazione uditiva in funzione della durata dei suoni elementari.

Il pattern di eccitazione si calcola mediante l'analisi spettrale FFT a risoluzione multipla.

L'analisi procede per finestre temporali che avanzano di 1 ms per formare un diagramma storico della loudness istantanea ad elevata risoluzione temporale.

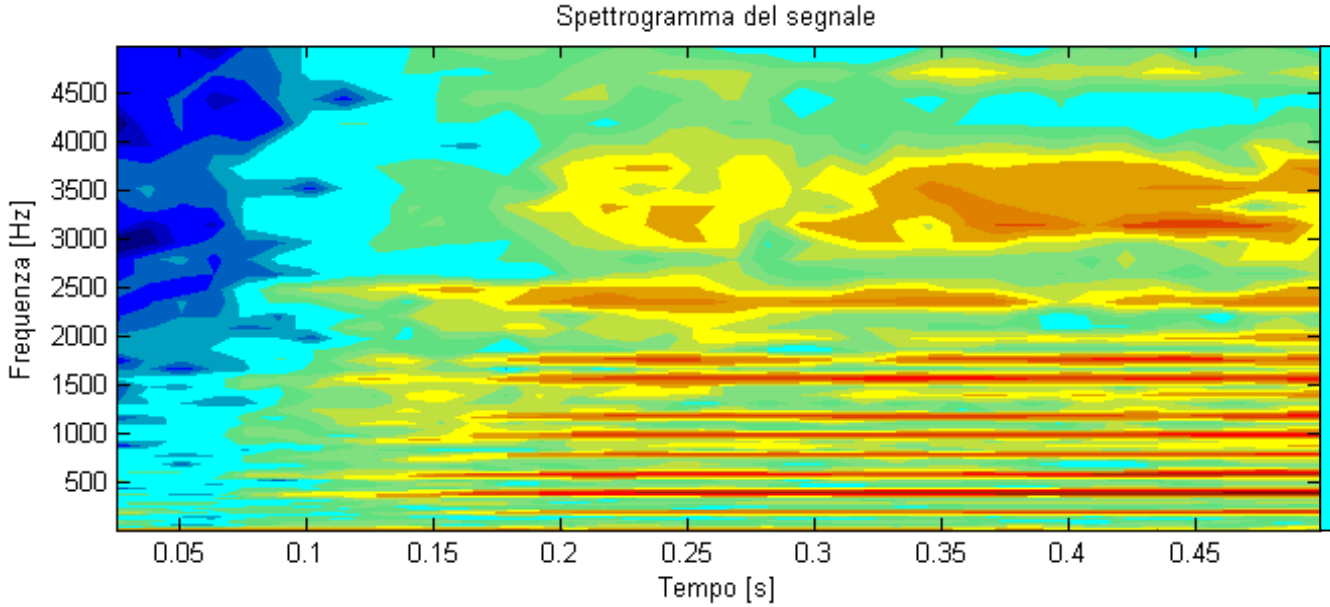
La serie di valori della loudness istantanea è opportunamente pesata nel tempo per giungere alla loudness calcolata su tempo breve (short-term loudness STL) che esprime meglio il concetto di loudness variabile nel tempo e sul cui andamento possono essere calcolati diversi descrittori psicoacustici.

Analisi del transitorio di attacco

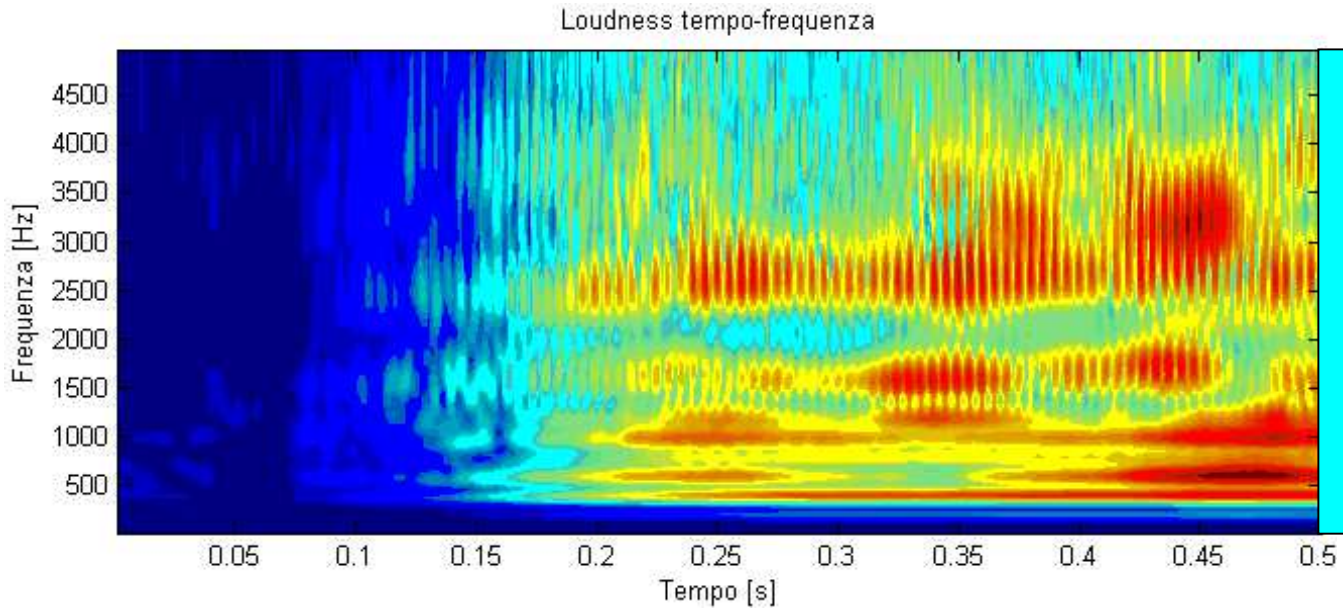


Evoluzione temporale del segnale e del livello delle armoniche durante l'attacco della nota SOL

Sonagrammi del transitorio di attacco della corda del SOL



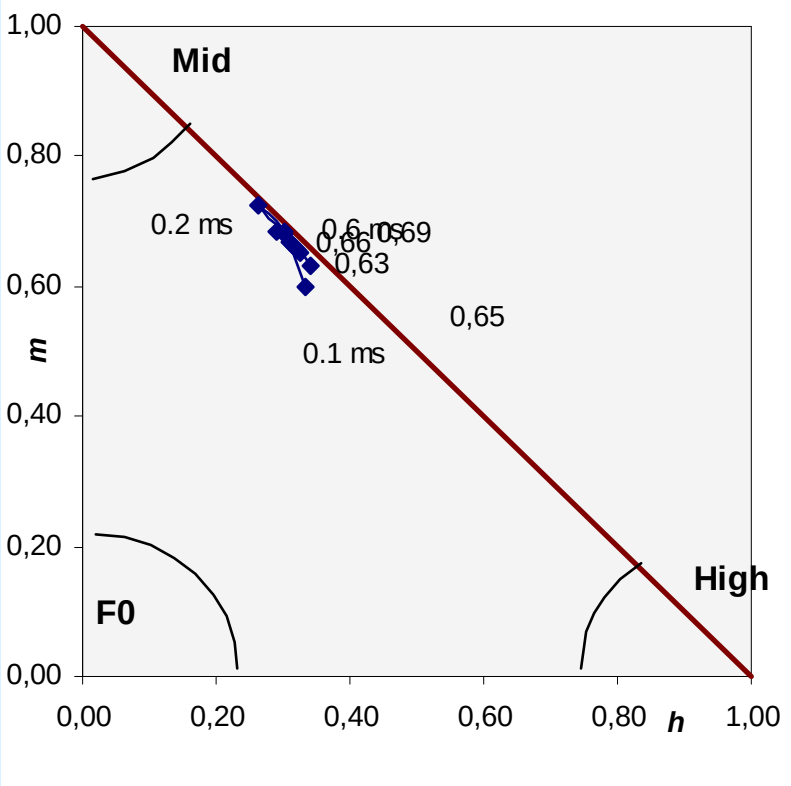
Sonagramma a banda stretta (tempo frequenza e livello)



Sonagramma a bande rettangolari equivalenti (tempo, frequenza dei filtri ERB e loudness)

Tristimolo relativo al transitorio di attacco della corda SOL

Time [s]	Regions f_0	m	h
0,05	0,07	0,33	0,60
0,10	0,02	0,30	0,68
0,15	0,01	0,26	0,73
0,20	0,02	0,30	0,68
0,25	0,02	0,31	0,67
0,30	0,02	0,32	0,65
0,35	0,02	0,29	0,69
0,40	0,02	0,31	0,66
0,45	0,02	0,33	0,65
0,50	0,02	0,34	0,63



Rappresentazione dei rapporti che definiscono la variazione del timbro nella fase transitoria

CONCLUSIONI

Gli indicatori desunti dalla psicoacustica sono più indicati per esprimere il confronto tra i suoni prodotti da diversi strumenti a parità di condizioni

Il tristimolo sintetizza la qualità del suono se si producono anche variazioni significative nella messa a punto (spostamento dell'anima, tipo di cordiere, etc.)

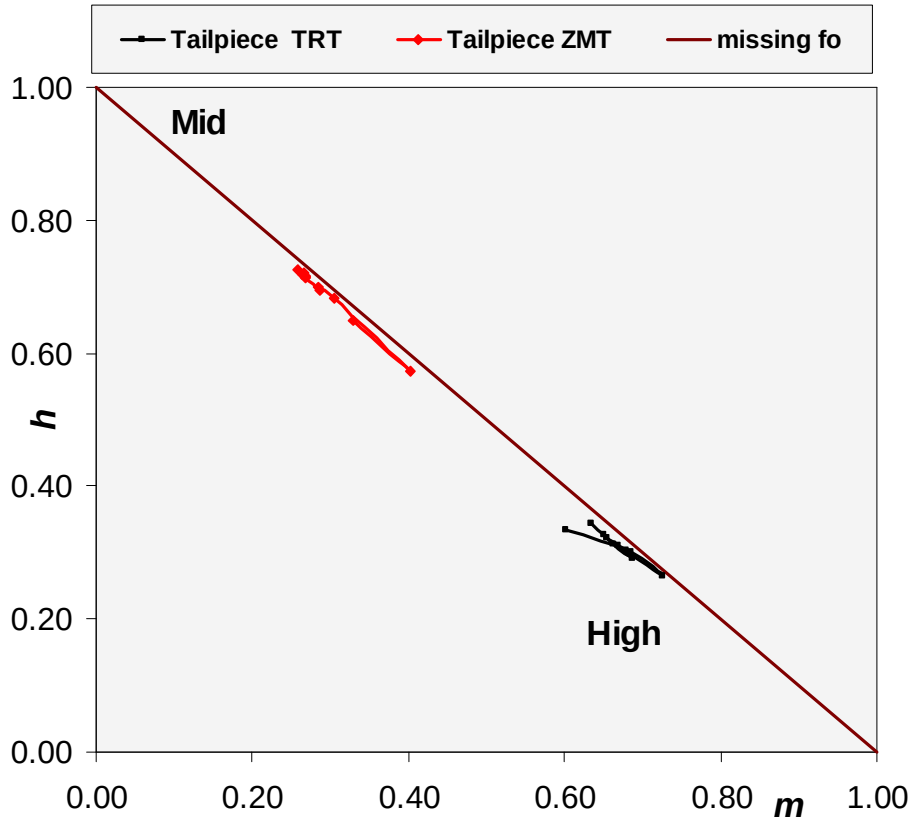
Si confrontano, per lo stesso violino, due tipi di cordiere:

una cordiera tradizionale

una costruita con lunghezza variabile delle corde

CONCLUSIONI

Confronto degli spazi di esistenza dei rapporti del tristimolo relativo alla nota SOL per lo stesso violino con cordiera tradizionale rettilinea (TRT) e con cordiera a profilo variabile (ZMT)



Lo spostamento verso la zona in cui prevale la loudness delle frequenze medie indica una maggiore pienezza del suono prodotto dalla cordiera a profilo variabile a parità di condizioni di assetto e d'uso dello strumento