

# *Caratteristiche generali del timbro e sue peculiarità nel suono del violoncello*

---

renzo vitale

Scuola di Musica Elettronica  
Conservatorio "A.Casella"



Report per i corsi di  
Acustica e psicoacustica  
Elaborazione numerica del segnale

2005

## CARATTERISTICHE GENERALI DEL TIMBRO E SUE PECULIARITÀ NEL SUONO DEL VIOLONCELLO

### 1.1 – Introduzione

Il riconoscimento di un suono e la valutazione delle sue proprietà intrinseche è un'operazione che coinvolge molti fattori, ma che potrebbe essere descritta principalmente come l'insieme di due elementi:

- la percezione uditiva dell'ascoltatore (fenomeni psicoacustici);
- le caratteristiche fisiche e strutturali della sorgente (materiali, forma di eccitazione, posizione, ecc.).

Ciascuno di questi elementi comprende, a sua volta, una serie di fenomeni in apparenza poco significativi, che in realtà sono decisivi per l'apprezzamento e l'analisi del suono. E' noto che i meccanismi della percezione uditiva sono tuttora oggetto di indagine; vi sono innumerevoli aspetti che attendono di essere chiariti, sia per una ragione conoscitiva che speculativa, per la quale si ambisce a ricostruire e sintetizzare l'intero apparato uditivo (sensore e processore).

Oltre al timbro (che sarà trattato nel paragrafo 1.2), vi sono altri due parametri che occorrono per catalogare uno suono: l'altezza e l'intensità (o sonità). L'altezza è la caratteristica del suono che consente di collocarlo nella scala delle frequenze e quindi, da un punto di vista musicale, di assegnargli il nome di una nota specifica. L'intensità, che va distinta tra intensità sonora (grandezza fisica) e sensazione sonora (grandezza psicofisica), è la caratteristica del suono che consente di descriverlo con un'opportuna scala dinamica, che musicalmente assume simboli come *p* o *f*.

Esistono innumerevoli fenomeni psicoacustici che sono più o meno coinvolti nel problema del riconoscimento di un suono e che bisogna considerare per una trattazione completa. I più importanti possono essere riassunti come segue:

- la sensazione di suoni di pari intensità cambia in base alla frequenza (curve di Fletcher-Munson);
- il canale uditivo agisce come una canna da  $\frac{1}{4}$  d'onda chiusa a un'estremità dal timpano, fornisce un contributo di amplificazione acustica di circa 10 dB e l'effetto di diffrazione del capo fornisce altri 10 dB per le frequenze intorno ai 3KHz;
- l'orecchio è un ottimo analizzatore poiché è caratterizzato da bande critiche che corrispondono a circa  $\frac{1}{3}$  d'ottava;
- l'orecchio è più accurato nella localizzazione di una sorgente sul piano orizzontale che sul piano verticale;

- l'orecchio è in grado di integrare tutti suoni che lo raggiungono entro 50 ms, rendendo il suono più forte (effetto Haas);
- in uno spettro appositamente costruito, l'orecchio individua una frequenza fondamentale che in realtà non è contenuta nello spettro (fondamentale mancante);
- un suono può essere del tutto o in parte mascherato dalla presenza più o meno contemporanea di un secondo suono più intenso (mascheramento uditivo).

A tutto ciò si aggiunge la considerazione che il riconoscimento di un suono è un processo in cui la percezione del timbro è solo il primo stadio. Più precisamente, la percezione della qualità di un suono è il meccanismo attraverso cui l'informazione è estratta dal segnale uditivo in modo da renderla disponibile per un immagazzinamento nella memoria con un'opportuna identificazione, e per il confronto con informazioni precedentemente identificate e memorizzate. Dunque, la sensazione del timbro è un'operazione che coinvolge aspetti fisici, percettivi e cerebrali.

Da quanto esposto, risulta chiaro che un'efficace analisi del timbro deve prevedere uno stadio di analisi della sorgente sonora ed una valutazione successiva dei dati in base alla percezione uditiva dell'uomo.

## 1.2 - Il timbro

Il timbro è un fenomeno molto complesso che viene generalmente definito come la qualità di un suono che consente di distinguerlo da altri suoni aventi stessa altezza (pitch) ed intensità (loudness). Il timbro, quindi, consente di differenziare due suoni prodotti da sorgenti diverse, che presentano stesse caratteristiche oggettive, come intensità, durata, altezza, transitorio d'attacco.

Il parametro più importante per l'analisi e la descrizione del timbro è rappresentato dallo spettro di ampiezza medio (di un segnale musicale o di uno strumento). I valori di intensità relativi delle componenti armoniche agiscono in maniera importante sulle caratteristiche di un suono, esaltando o attenuando proprietà specifiche del suono stesso. Dal punto di vista della forma d'onda nel dominio del tempo, si osserva che quanto maggiore è la pendenza dell'attenuazione spettrale delle armoniche, tanto maggiore sarà la "morbidezza" dell'onda; il suono così ottenuto è poco incisivo e sibilante. Al contrario, un suono che presenta elevato contributo energetico in tutte le parziali è piuttosto stridulo.

Il timbro dipende, quindi, dal contenuto spettrale di armoniche, che può essere matematicamente espresso mediante il teorema di Fourier:

$$y(t) = y_0 + \sum_n y_n \sin[n\omega_1 t + \delta_n] \quad (1.1)$$

dove  $n$  è un intero che parte da 1,  $y_0$  è il valor medio dell'onda e si considera, per semplicità di scrittura, una pulsazione dell'onda di  $\omega = 2\pi f$ .

Il timbro è il risultato di un'insieme di caratteristiche e circostanze concomitanti con la produzione ed emissione di un suono da parte di uno strumento: modalità ed intensità di eccitazione,

caratteristiche fisiche dell'eccitatore (mano, archetto, plettro, ecc.), proprietà fisiche dello strumento (cassa di risonanza, materiali costruttivi). Nonostante questi parametri incidano profondamente sulla qualità tonale complessiva, in uno studio sulla qualità tonale dei violini Jürgen Meyer ha notato che l'effetto sulla distribuzione spettrale del suono è piccolo, limitandosi essenzialmente alla pendenza della curva involuppo verso le alte frequenze. Questa osservazione è estendibile anche per l'analisi degli strumenti a corda eccitati con l'archetto (viola, violoncello, contrabbasso). Dunque, non è necessario che il violoncello (nel nostro caso) sia suonato meccanicamente per confrontare lo spettro relativo a differenti aree spettrali di interesse.

### 1.3 - Il violoncello

Il violoncello (fig. 1.1) è un strumento che deriva storicamente dalla *viola da braccio bassa*. Il modello di violoncello così come oggi lo conosciamo, nacque probabilmente alla metà del '600, periodo in cui apparvero le prime composizioni di Domenico Gabrielli (1659-1690) per violoncello solo. E' accordato una dodicesima sotto rispetto al violino ed un'ottava sotto rispetto alla viola ( $C_2$ ,  $G_2$ ,  $D_3$  e  $A_3$ ). Le sue dimensioni sono circa il doppio rispetto a quelle del violino ad eccezione dell'altezza delle fasce laterali, quattro volte maggiore.

Il timbro di un violoncello, così come quello di altri strumenti ad arco, varia principalmente con la zona di contatto del crine sulla corda, con la pressione e con la velocità dell'arco, mantenendo nonostante tutto le caratteristiche di colore proprie dello strumento.



**Figura 1.1** – Il violoncello

### 1.3.1 – Segnali di riferimento

Per affrontare un'analisi dello strumento il più possibile indipendente dall'acustica dell'ambiente bisogna utilizzare delle registrazioni anecoiche. Nel presente studio sono state utilizzate registrazioni effettate presso la camera anecoica del Laboratorio di Acustica della Technical University of Denmark, in Copenhagen. Nella fig.1.2 sono indicate le specifiche della misura. Il violoncellista è il M<sup>o</sup> Asger Lund Christiansen, ed esegue una Gavotta di Martini.

Brano	Compositore	durata	RMS	Picco	S. Ht.	M. Ht.	Dist.
Gavotta	Martini	2:29	-21.3	-1.5	0.80	1.40	1.1

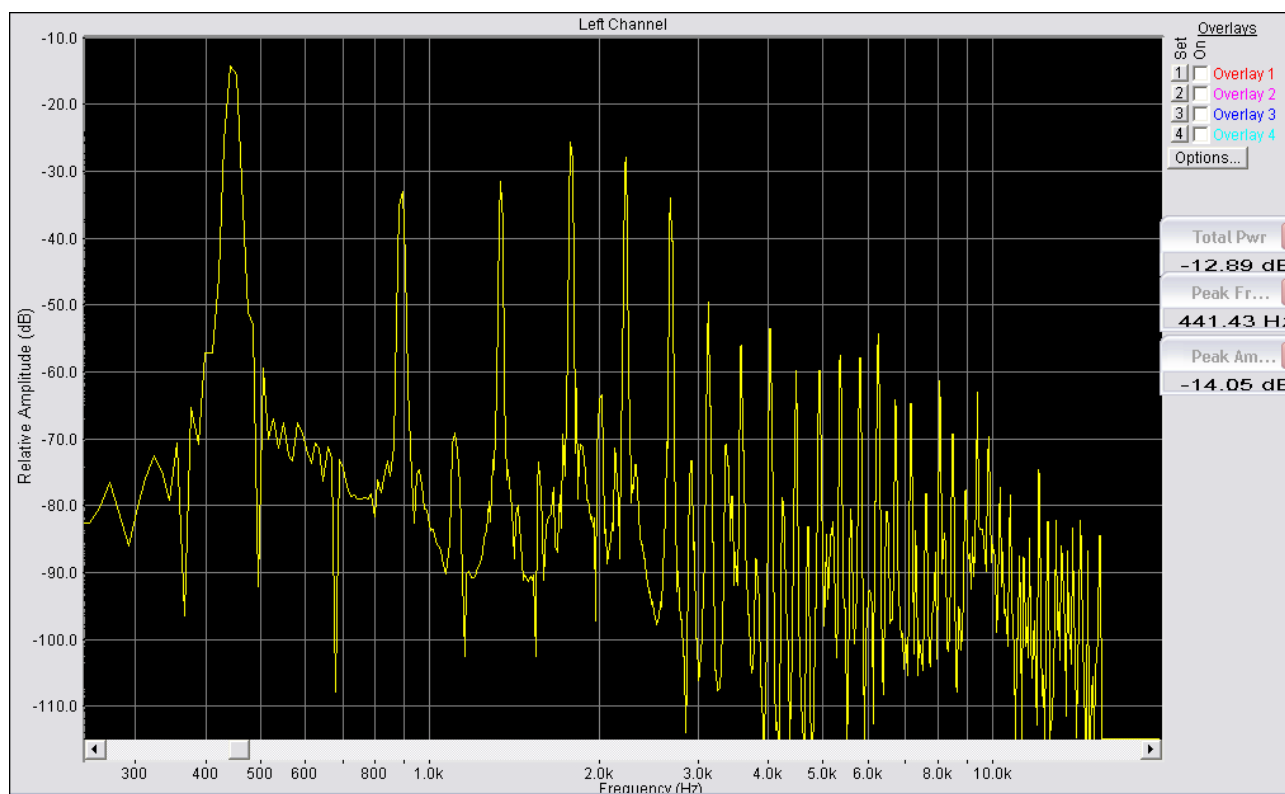
---

RMS	<i>valore efficace in dB</i>
Picco	<i>picco massimo in dB</i>
S. Ht.	<i>altezza della sorgente rispetto al pavimento [m]</i>
M. Ht.	<i>altezza del microfono rispetto al pavimento [m]</i>
Dist.	<i>distanza tra la sorgente ed il microfono [m]</i>
Microfono	<i>Sennheiser MKH40 P48, puntato sulla metà superiore del violoncello</i>

**Figura 1.2** – Specifiche tecniche della registrazione in camera anecoica

## 1.4 – Analisi dello strumento

Come primo esempio, possiamo visualizzare lo spettro relativo alla nota  $La_4$  (440Hz).



**Figura 1.3** – Spettro del  $La_4$  (440Hz) del violoncello

Dalla fig. 1.3 si possono ricavare diverse osservazioni. In primo luogo si osserva con molta chiarezza la presenza delle armoniche della nota  $La_4$ , almeno fino alla sedicesima componente. Il contributo più significativo è fornito dalle prime cinque armoniche, che hanno un livello di ampiezza relativo compreso tra -25/-35 dB (con una fondamentale avente un livello di -12.9 dB).

Nello spettro si distinguono chiaramente tre zone: l'area della fondamentale, la zona delle prime cinque armoniche, la zona delle armoniche successive. In coerenza con i dati di letteratura, si osserva nel violoncello un decadimento significativo dei contributi al di sopra dei 3 KHz, che presentano livelli al disotto di -35 dB rispetto alla frequenza fondamentale.

Una considerazione ulteriore può essere compiuta se si osserva il profilo dello spettro, il suo ipotetico involucro. In analogia con quanto avviene nell'analisi vocale, anche per gli strumenti musicali è possibile ricavare delle frequenze formantiche che evidenziano delle risonanze proprie dello strumento. Per ricavare le formanti del violoncello si procede al calcolo della spettro del segnale mediante analisi di Fourier, e si mediano gli spettri totali su un intervallo di tempo piuttosto ampio. In fig. 1.4 è illustrata la media degli spettri di ampiezza eseguita in maniera lineare sull'intera durata del brano (2'29"). Anche se lo spettro è fondamentale indipendente dalle note eseguite, è importante che tutte le altezze del violoncello siano eccitate, in modo che la risposta in frequenza sia oggettiva e comprendente l'intero spettro delle frequenze di analisi.

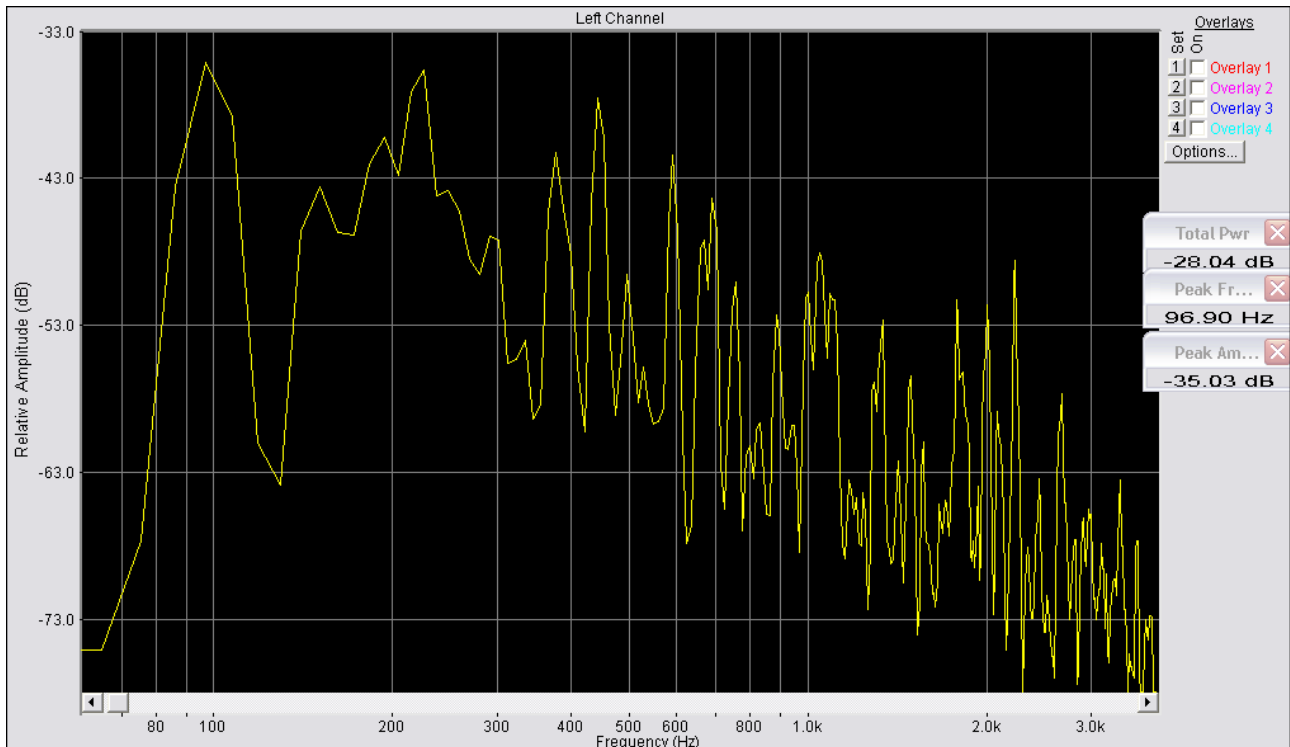


Figura 1.4 – Media degli spettri di ampiezza del violoncello

La fig. 1.4 si presta a numerose osservazioni. Si nota anzitutto il rilevante scostamento dalla fig.1.3, in cui l'indagine rappresenta un'istantanea dello spettro (riguardante una singola frequenza): la media degli spettri è una fotografia reale del comportamento acustico dello strumento. Inoltre si evidenziano delle zone fortemente caratteristiche, in cui alcune frequenze sono esaltate in maniera preponderante. La prima risonanza ( $A_0$ ) si ha a 97 Hz (-35 dB), ed è chiamata *risonanza dell'aria* (o anche risonanza di Helmholtz), in quanto è dovuta alla risonanza dell'aria che entra ed esce dai fori a  $f$  presenti sulla tavola armonica del violoncello. Essa è legata direttamente al volume della cassa ed in parte alle dimensioni dei fori ad  $f$ , e ne esiste una stima matematica ricavata sia da Itokawa e Kumagai, che da E. Jansson, ed il suo valore è:

$$f = \frac{0,27 \cdot v \cdot \sqrt[4]{A}}{\sqrt{V}} [Hz] \quad (1.2)$$

dove  $A$  è l'area delle aperture a effe (in  $m^2$ ),  $V$  il volume della cassa armonica (in  $m^3$ ) e  $v$  la velocità del suono in aria (in  $m/s$ ). E' detta anche risonanza di Helmholtz, poiché fu egli stesso a descriverla nel testo "On the sensations of tone", dove si legge:

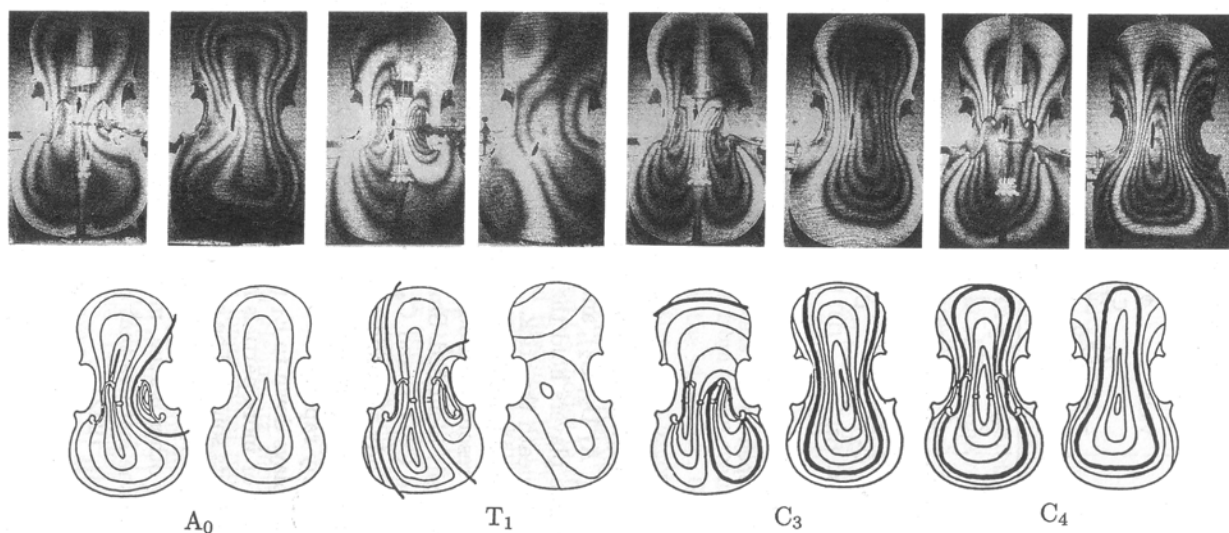
*"For the violoncello, where the lowest string gives C, the stronger proper tone of the body of air is, as on the violin, a Fourth or a Fifth higher than the pitch of the lowest string."*

La corda più grave è il  $C_2$  (65,4 Hz), e la quinta  $G_2$  si trova a 98 Hz. Ciò conferma la corrispondenza tra dati teorici e sperimentali. Questa risonanza contribuisce a fornire al violoncello un suono robusto alle basse frequenze.

La seconda risonanza ( $C_3$ ) importante che si incontra è quella presente a 226 Hz (-35.5 dB). Questa frequenza è dovuta alla cassa di risonanza del violoncello. Anche la terza risonanza ( $C_4$ ) appartiene alla stessa tipologia: si presenta alla frequenza di 194 Hz (-40.1 dB).

Esiste un altro tipo di risonanza notevole ( $T_1$ ), ed è quella dovuta all'oscillazione della tavola armonica. Nel violoncello si presenta ad una frequenza di circa 150 Hz (-43.4 dB).

Le risonanze evidenziate ( $A_0$ ,  $C_3$ ,  $C_4$ ,  $T_1$ ) sono quelle ritenute più importanti. In realtà, esse esprimono numericamente i modi di vibrazione della cassa del violoncello secondo alcune direttrici di riferimento. Ad esempio il modo  $T_1$  è caratterizzato da un movimento più intenso nella tavola armonica superiore, rispetto a quella inferiore. Il modo  $C_4$  presenta un nodo a forma di anello. La fig. 1.5 riassume graficamente il comportamento oggettivo dei modi più rilevanti del violoncello. L'immagine è stata ottenuta con olografia elettronica.



**Figura 1.5** – *Forme e frequenze dei modi  $A_0$ ,  $C_3$ ,  $C_4$ ,  $T_1$  del violoncello (Bynum, Rossing - 1997)*

Esiste una stretta correlazione tra il valori relativi delle risonanze notevoli ed il comportamento acustico del violoncello. Più precisamente, vi è una connessione diretta tra il profilo risonante dello strumento e la percezione del suo stesso timbro. Un violino differisce da un violoncello, oltre che per le oggettive caratteristiche fisiche, anche per il diverso profilo risonante, e due violoncelli si differenziano tra loro per le quasi impercettibili differenze legate allo spettro medio.

Le risonanze di uno strumento agiscono in diversi modi sul suono ascoltato. Esse amplificano il suono e, in base alle diverse configurazioni dei modi, impongono maggiori o minori fluttuazioni di pressione nell'aria circostante al violoncello. Le risonanze colorano il suono caratterizzandolo con un proprio colore tonale, un proprio timbro, ed agiscono similmente alle formanti della voce: il profilo risonante costituisce l'elemento identificativo dello strumento. Infine, le risonanze determinano la varietà e le sfumature di un suono. Ciò è dovuto al fatto che la densità spettrale determina quanto

spesso e con quale intensità le frequenze musicali della corda eccitata comunicano con le risonanze dello strumento. Nella fig. 1.6 sono state evidenziate quattro zone rilevanti: la prima contiene la risonanza fondamentale di Helmholtz, la seconda comprende le risonanze del corpo (tavola superiore e cassa armonica), la terza e la quarta sono responsabili rispettivamente di un comportamento “nasale” o “brillante”.

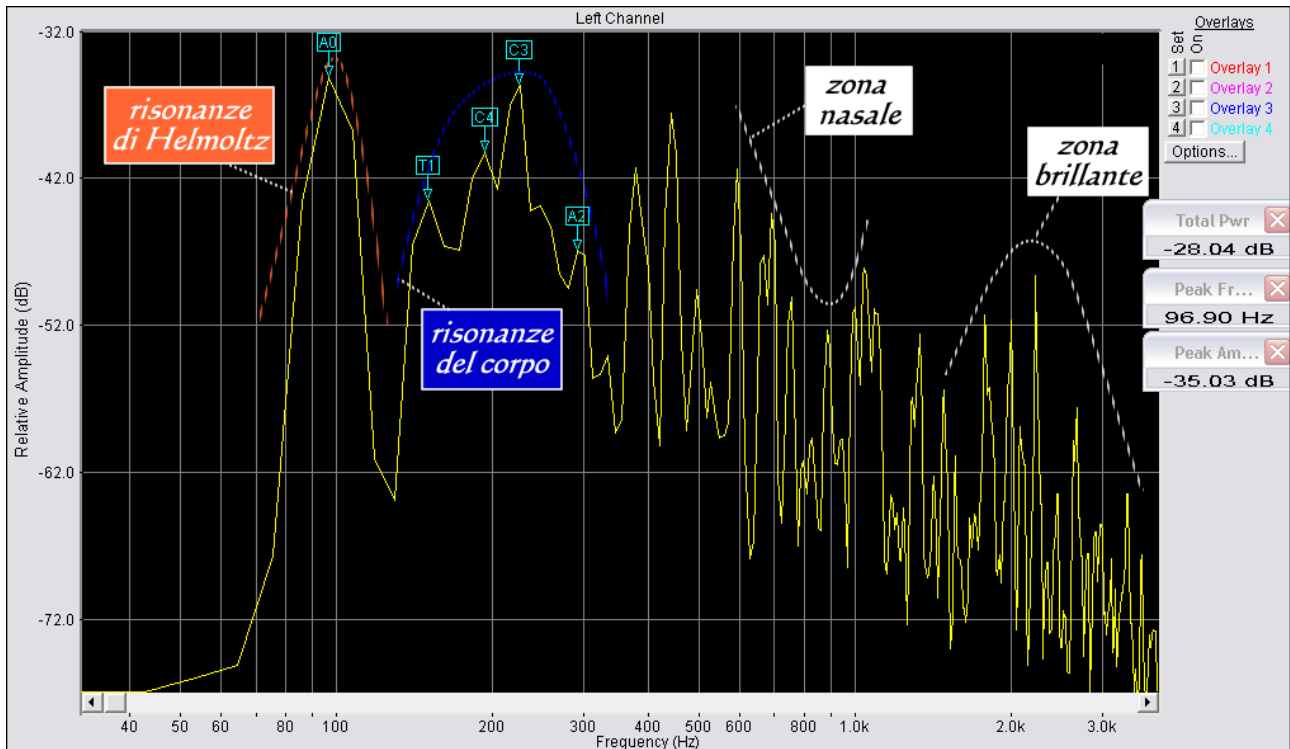


Figura 1.6 – Aree tonali nello spettro medio del violoncello

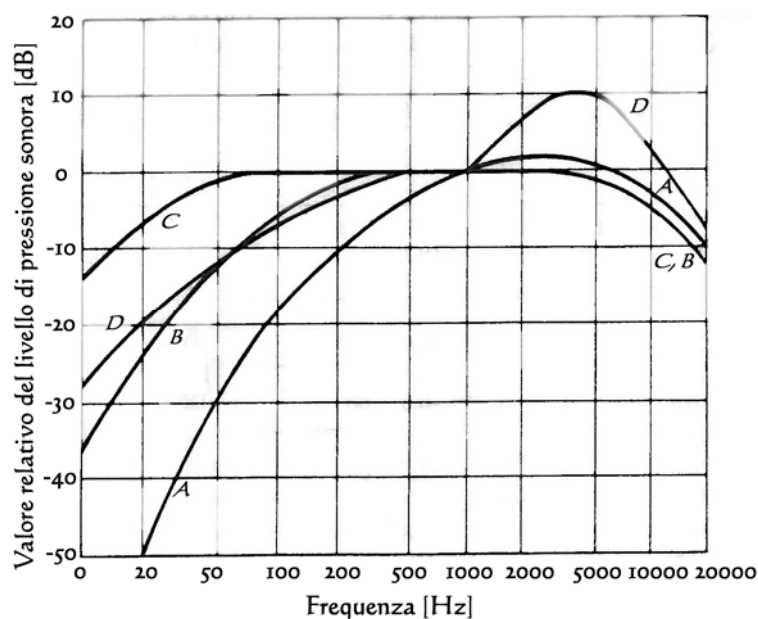
Se si agisce artificialmente sulle risonanze, aumentando o diminuendo il loro contributo, si percepiscono chiaramente una serie di caratteristiche e di condizioni che mutano in maniera significativa il timbro dello strumento. In particolare, se si aumentano le risonanze del corpo si ottiene un suono sordo, cupo, se al contrario si diminuiscono, si ottiene un suono piatto, debole. Agendo allo stesso modo sulla zona nasale, si ottiene un timbro che oscilla tra un suono nasale, volgare ed un suono senza potenza, che non trasporta. Infine, se si opera nella zona brillante, si varia da un suono duro ad un suono soffocato, sordo.

## 1.5 – Considerazioni psicoacustiche

Le immagini e le osservazioni proposte nel paragrafo precedente si riferiscono ad una valutazione oggettiva del violoncello, vale a dire che l’elaborazione del segnale musicale è avvenuta secondo dettami propri della teoria dei segnali e dell’acustica. Nel par. 1.1 si è affermato che la valutazione delle proprietà intrinseche di un suono dipendono sia dalle caratteristiche fisiche e strutturali, ma anche dalla percezione uditiva dell’ascoltatore. E’ noto che l’orecchio presenta dei livelli

di sensibilità all'intensità del suono che variano con le frequenze, secondo le curve di Fletcher e Munson.

E' necessario, dunque, "filtrare" la risposta del violoncello (fig. 1.4) secondo le curve di ponderazione che tengono conto del parametro psicoacustico *loudness*. Esistono tre curve caratteristiche (dette per l'appunto *curve di ponderazione*) indicate con A, B, C, che corrispondono alle tre isofoniche rispettivamente a 40, 70, 100 phon. Successivamente è stata introdotta anche una quarta curva D, corrispondente alla curva ad 1 noy della famiglia di curve di ugual fastidio (*noisiness*) determinate da Kryter, ma è prevalentemente usata nella valutazione semplificata del disturbo provocato dal rumore aeronautico (fig. 1.7).



**Figura 1.7** – Curve di ponderazione in frequenza normalizzate (G. Benedetto, R. Spagnolo - 2001)

La curva A si usa in genere per livelli bassi (40 phon - *pp* per la dinamica musicale). Per livelli medi si usa la curva B (70 phon - *mf*), mentre per suoni intensi si usa la curva C (100 phon - *fff*). Nella pratica si è riscontrato che la curva A si adatta bene anche a livelli medio-forti, pertanto è quella maggiormente utilizzata; non bisogna trascurare il fatto che essa sottovaluta, forse in maniera eccessiva, i contributi delle alte e basse frequenze.

In figg 1.8-1.9 sono riportati gli spettri medi del violoncello, ponderati rispettivamente secondo le curve A e C. Il risultato è piuttosto prevedibile, nel senso che nello spettro ponderato A si osserva un'attenuazione molto significativa fino ai 1000 Hz, ed una leggera enfasi alle frequenze comprese tra 2000 e 3000 Hz. Il contributo delle basse frequenze è molto ridimensionato. Nello spettro ponderato C si osserva che il profilo spettrale rimane sostanzialmente inalterato, sia nella forma che nell'intensità. Se si tiene conto dei rispettivi livelli di riferimento delle curve A e C da un punto di vista musicale (*pp* e *fff*), abbiamo un'idea chiara della risposta del nostro apparato uditivo alle varie sollecitazioni del violoncello.

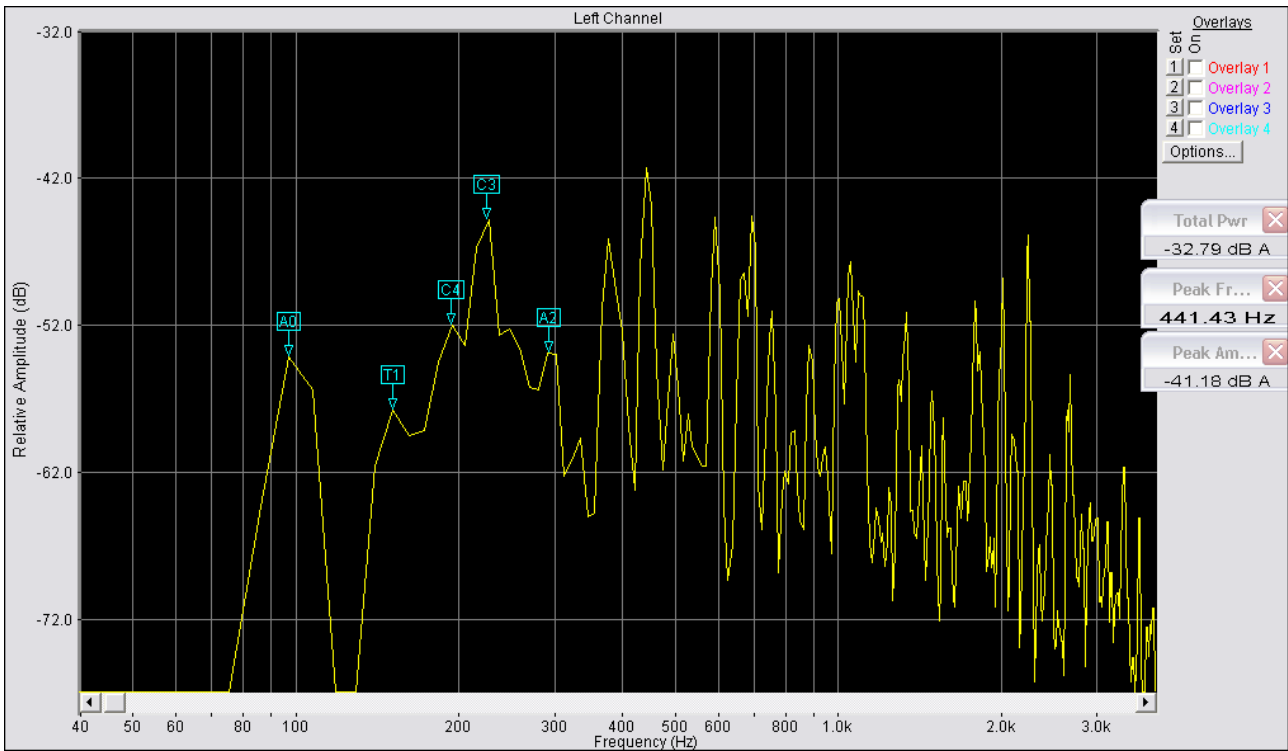


Figura 1.8 – Spettro medio del violoncello ponderato secondo la curva A.

Per completezza d'analisi, si ritiene opportuno riportare anche lo spettro del violoncello ponderato secondo la curva B (fig. 1.10). Il profilo che si ottiene mostra che nella dinamica di *mf*, l'orecchio tende a favorire le risonanze comprese tra circa 200 e 600Hz.

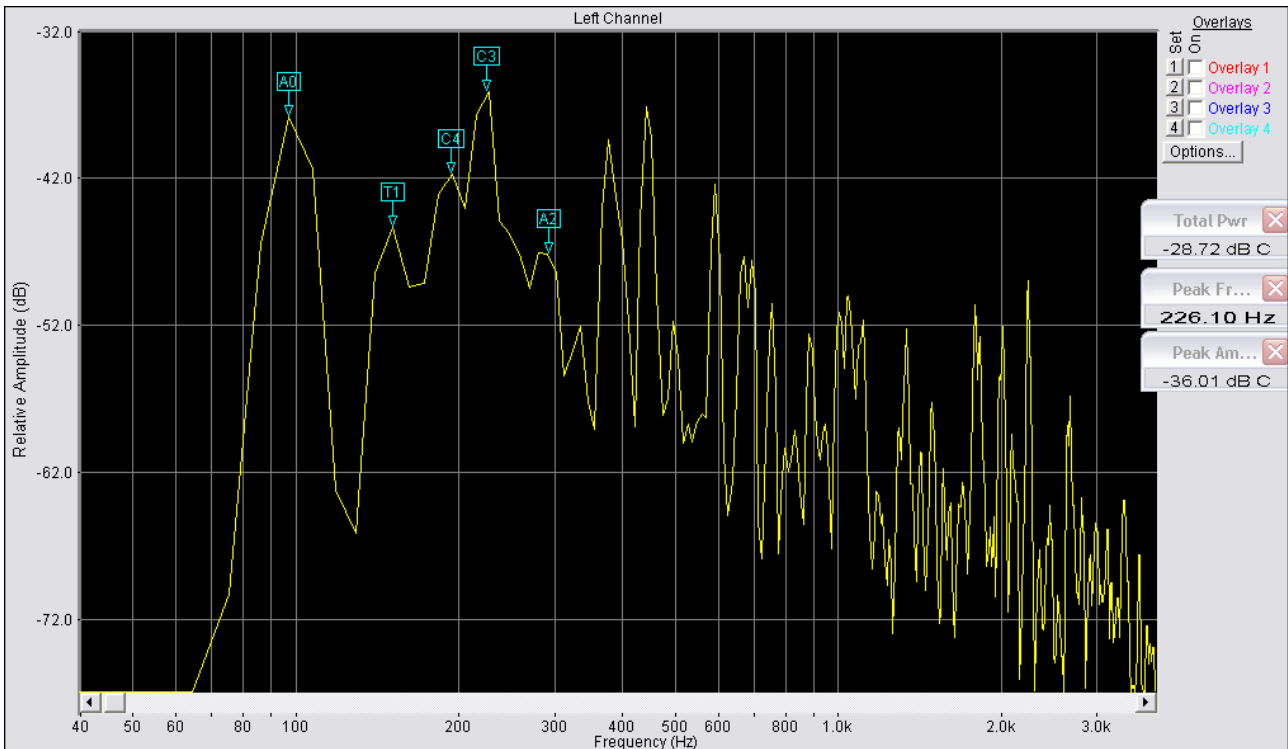


Figura 1.9 - Spettro medio del violoncello ponderato secondo la curva C.

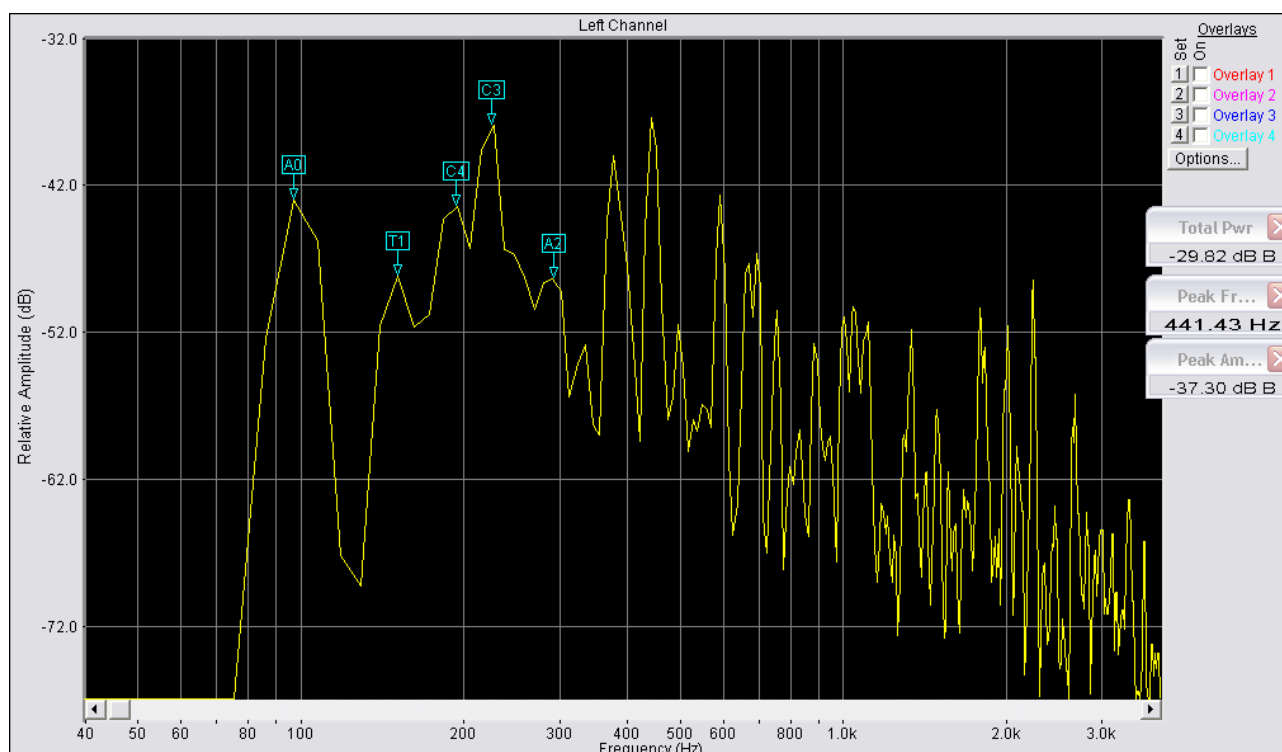


Figura 1.10 - Spettro medio del violoncello ponderato secondo la curva B

## 1.6 – Conclusioni

Il timbro è un fenomeno complesso attraverso il quale riusciamo a discernere diverse tipologie di strumenti musicali, diverse qualità e caratteristiche del suono nell'ambito di un singolo strumento. Si parla spesso anche di *colore tonale*, termine con cui si evidenziano le diverse sfumature di un suono, descrivendolo come sordo, rigido, nasale, brillante, ecc..

Il presente studio si è proposto di evidenziare le relazioni che sussistono tra la risposta oggettiva di uno strumento e quella soggettiva dell'uomo in termini timbrici. È stato evidenziato il profilo formantico dello strumento, e sono stati determinati gli andamenti di curve caratteristiche (figg. 1.8-1.9-1.10), il cui confronto fornisce una descrizione esaustiva della risposta dell'orecchio alle sollecitazioni del violoncello. In questo senso, si è notato l'importanza della risonanza  $C_3$ , presente a 226 Hz, in tutti e tre gli andamenti. Per basse intensità, la risonanza dell'aria sembra non influire sulla qualità del suono. Questo effetto è confermato anche da uno studio effettuato da A. Frova, il quale ha misurato la risposta del violoncello in elio. Si è notato che, diversamente da quel che accade con la voce, non si hanno variazioni significative del timbro percepito da parte di ascoltatori.

Per approfondire il concetto di timbro in tutte le sue accezioni e sfumature, sarebbe opportuno uno studio più sistematico che dovrebbe comprendere, nel caso del violoncello, lo studio della modalità di eccitazione (velocità, pressione e movimento dell'archetto, o della mano nel pizzicato), lo studio del transitorio d'attacco, l'analisi dell'orientamento dello strumento rispetto all'ascoltatore, la sua direttività, l'influenza dell'acustica dell'ambiente.

## BIBLIOGRAFIA

- Cingolani, S.. *Gli strumenti a corda*, in *Acustica musicale e architettonica*, a cura di R.Spagnolo e S.Cingolani. 2001. UTET.
- Everest, F.A.. *Manuale di Acustica*. 1996. Hoepli, Milano.
- Fletcher, N.H., Rossing, T.D.. *The physics of Musical Instruments*. Springer, 1998.
- Frova, A.. *Fisica nella musica*. 2001. Zanichelli.
- Helmholtz, H.. *On the sensations of tone*. 1885. Longmans & Co. Reprinted by Dover Publications, Inc. 1954.
- Mathews, M.. *Introduction to Timbre*, in *Music, Cognition, and computerized sound*. A cura di Cook, P.R.. 1999. The MIT Press.
- Roederer, J.G.. *Introduction to the Physics and Psychophysics of Music*. 1973. The English Universities Press, Ltd. London.
- Sachs, C.. *Storia degli strumenti musicali*. 1980. Mondadori.
- Schleske, M. *Tonal color and the resonance profile*, Meisteratelier für Geigenbau, 2004, München.
- Spagnolo, R., Benedetto, G.. *Percezione uditiva ed effetti del rumore*, in *Manuale di acustica* a cura di Spagnolo. 2001. UTET