



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA  
DIPARTIMENTO DI FISICA E ASTRONOMIA "GALILEO GALILEI"  
CORSO DI LAUREA IN FISICA

Tesi di laurea triennale

# FISICA DEGLI STRUMENTI AD ARCO

*Relatore: Prof. Giulio Peruzzi*

*Laureanda: Silvia Maria Macrì*

*Matricola: 1008958*

Anno accademico 2015 / 2016

## INDICE

1. Introduzione *p. 2*
  2. Struttura degli strumenti ad arco *p. 2*
  3. Corde *p. 4*
  4. Cassa armonica *p. 14*
  5. Strumento completo *p. 25*
  6. Qualità tonale del violino *p. 27*
  7. Dimensioni e tessitura degli strumenti ad arco *p. 30*
  8. Conclusione *p. 32*
- Glossario essenziale di alcuni termini musicali *p. 33*
- Bibliografia *p. 34*

## 1. INTRODUZIONE

In quanto segue, cercheremo di capire qual è il comportamento fisico degli strumenti ad arco quando vengono suonati, ricostruendo le tappe più significative dell'evoluzione storica della comprensione del funzionamento di questi strumenti. Considereremo prima le varie parti singolarmente, poi l'influenza che hanno sulla vibrazione complessiva dello strumento.

Dopo una breve illustrazione delle parti che compongono lo strumento, parleremo delle *corde*: quali sono i loro modi di vibrazione, quali caratteristiche meccaniche influenzano il loro moto, e quali fattori ostacolano la loro vibrazione dissipando energia. Distingueremo il caso di corda pizzicata e corda strofinata con un archetto. Parleremo poi delle variabili su cui può agire l'esecutore per variare l'effetto sonoro, e a quali condizioni può essere prodotto un suono che può essere considerato musicale.

Parleremo poi della *cassa armonica*: su che criteri si basa la scelta del legno e quali caratteristiche del materiale determinano questa scelta. Vedremo i numerosi modi in cui le tavole armoniche possono vibrare e come questi possono essere regolati modificando lo spessore, la curvatura e la forma delle tavole.

Considereremo poi lo *strumento completo*: come le sue caratteristiche sonore sono influenzate dalle proprietà meccaniche e vibrazionali delle singole tavole, del ponticello, dell'anima, dei fori armonici, delle altre parti che lo compongono e dell'aria contenuta nella cassa.

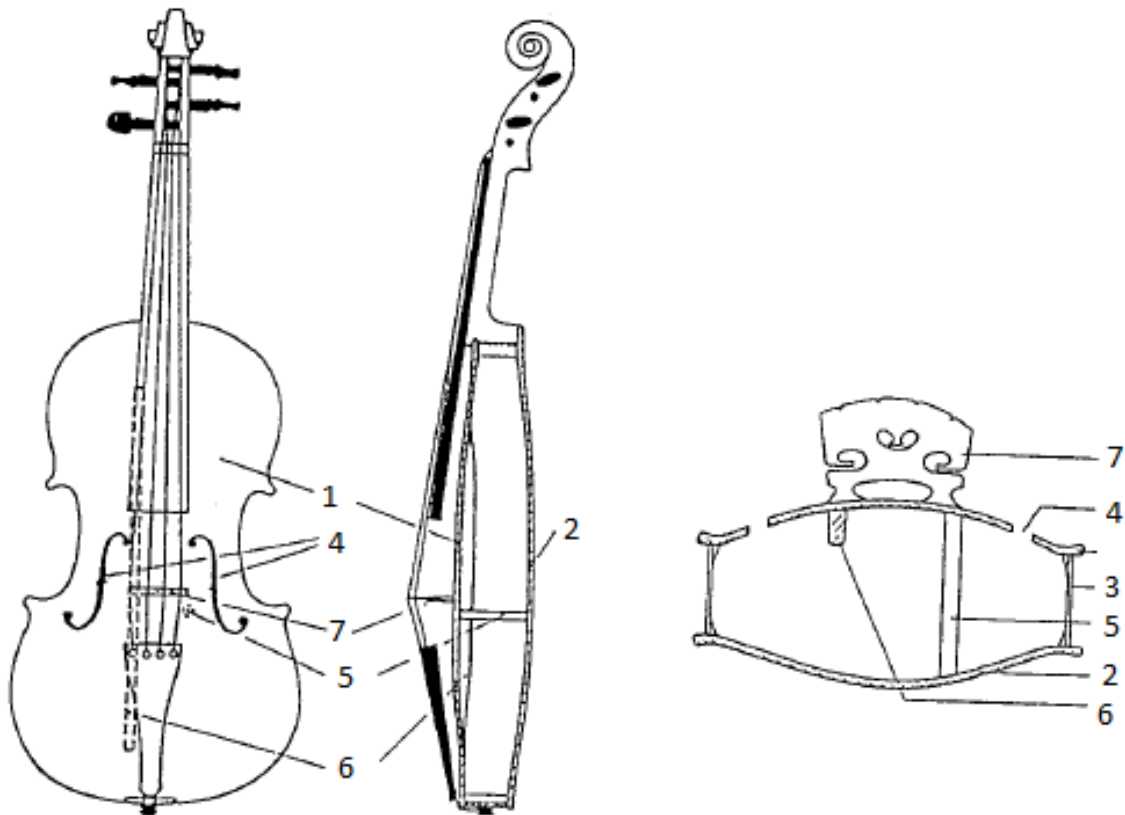
Parleremo di alcuni studi ed esperimenti che sono stati fatti, soprattutto negli ultimi settant'anni. La maggior parte delle ricerche considerate sono state fatte su violini, però i risultati si possono estendere nella maggior parte dei casi anche a tutti gli altri componenti della famiglia degli archi.

Infine vedremo alcuni strumenti sperimentali e delle caratteristiche particolari dei quattro strumenti ad arco classici.

## 2. STRUTTURA DEGLI STRUMENTI AD ARCO

Gli strumenti ad arco sono strumenti a corde, le quali vengono messe in vibrazione tramite lo sfregamento con un arco (anche se è possibile che vengano pizzicate, per ottenere particolari effetti). Ora vedremo nei particolari le parti di cui sono composti. La *cassa armonica* è formata da due tavole parallele i cui bordi sono collegati da delle strisce di legno curve, chiamate *fasce*. La tavola superiore si chiama *tavola armonica*, in legno di abete rosso, mentre quella inferiore si chiama *fondo*, in acero. Entrambe hanno una particolare curvatura, che fa risultare la cassa più bombata al centro, e un determinato spessore, non costante, sulla superficie delle tavole. Lungo i loro contorni viene scavato un sottile solco dove vengono inserite tre striscioline di legno, di solito la centrale in ciliegio e le due esterne in ebano tinto di colore scuro. Oltre ad avere un effetto decorativo, esse hanno una funzione di contenimento delle fibre del legno, e quindi impediscono il propagarsi di eventuali crepe. Sulla tavola armonica sono tagliati due fori, chiamati *a effe* per la loro forma. All'interno della cassa, attaccata alla tavola armonica, si trova la *catena*, una striscia di legno di abete posta parallelamente alle corde vicino al foro *a effe* di sinistra. Essa funge da sostegno alla tavola armonica, su cui le corde caricano il loro peso (circa 6 kg per ogni corda). Vicino

al foro di destra è posto, perpendicolarmente ai due piani armonici, un piccolo cilindro di abete, chiamato *anima*. La sua posizione è determinante per la qualità e la ricchezza del suono. È posta vicino al foro a *effe* di destra, in prossimità del piedino del ponticello. La sua principale funzione è di trasmettere le vibrazioni dalla tavola armonica al fondo. Il *ponticello*, in legno di acero o faggio, è posto verticalmente fra i tagli dei fori a *effe* e ha sia la funzione di trasmettere le vibrazioni dalle corde alla cassa, sia quella di mantenere le corde in una determinata posizione, in modo che non tocchino la *tastiera* e siano diteggiabili. Questa, in legno di ebano, è attaccata al *manico*, in acero, che a sua volta è innestato nella parte superiore della cassa. Il manico, nella parte esterna, termina col *cavigliere*, in cui sono presenti dei fori dove verranno incastrati i *piroli* e il *riccio*, che ha unicamente funzione decorativa. Le *corde*, quattro e accordate per quinte (o quarte nel contrabbasso), sono fissate ai *piroli*, i quali sono incastrati nei fori del cavigliere e sono liberi di girare all'interno di essi per modificare la tensione delle corde. L'estremità inferiore delle corde, invece, è rappresentata dalla *cordiera*, che è fissata attraverso il *bottone*. Gli estremi della parte vibrante della corda sono il ponticello e il *capotasto*, l'estremità superiore della tastiera.



Schema della struttura di uno strumento ad arco: 1) tavola armonica 2) fondo 3) fasce 4) fori a effe 5) anima 6) catena 7) ponticello. (E. Jansson, *Acoustic for violin and guitar makers*, pubblicazione online di KTH-TMH, 2002, cap. 7, p. 4)

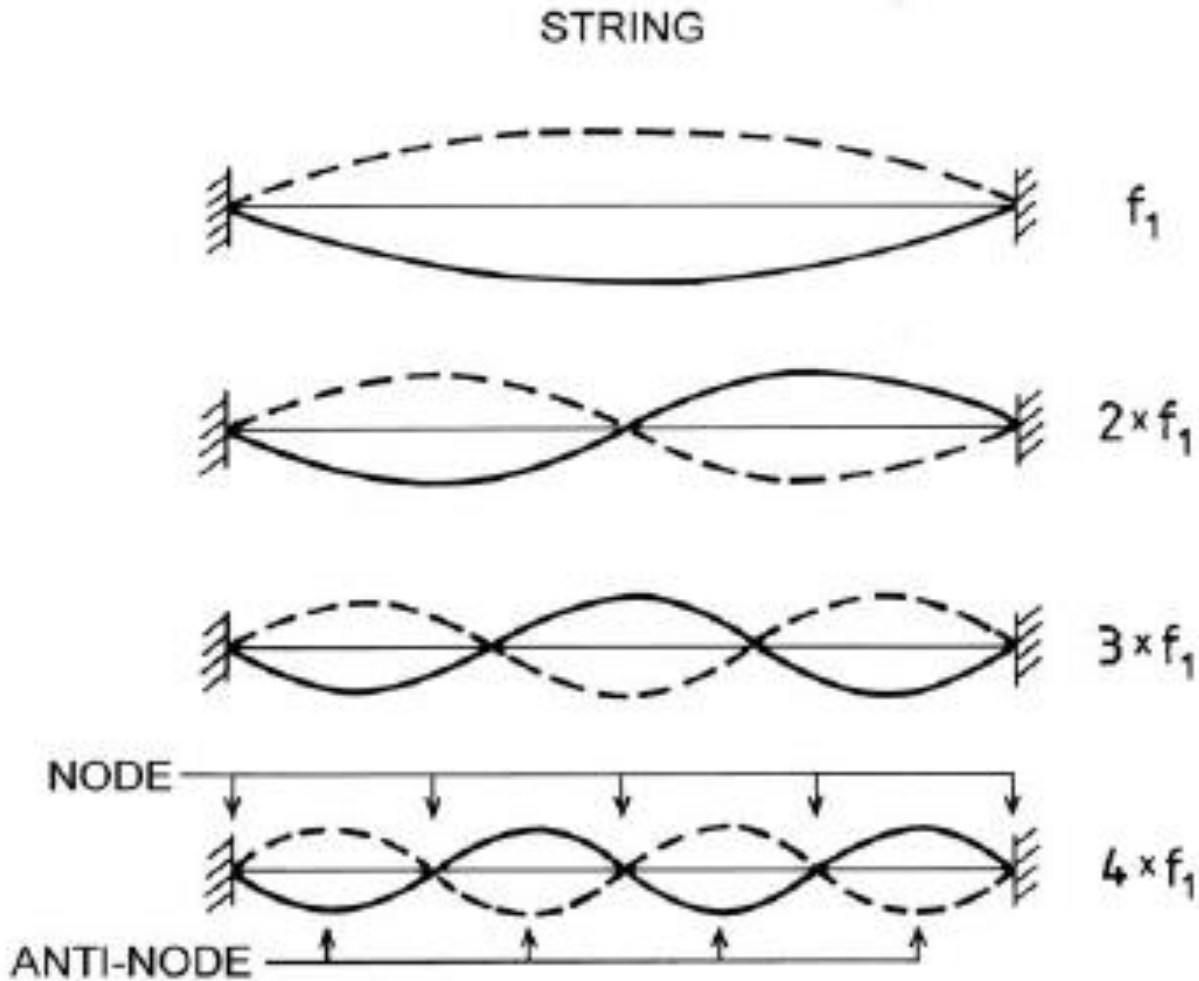
### 3. CORDE

Ogni strumento della famiglia dei violini ha quattro corde. Un tempo queste erano fatte interamente di budello, e ancor oggi questo tipo di corde viene usato principalmente negli strumenti barocchi. Il budello, soprattutto di pecora, veniva lavato, trattato ed arrotolato fino a formare un filo. Le corde di questo materiale sono molto delicate e si rompono facilmente, oltre ad avere la tendenza a non mantenere l'accordatura. Sono caratterizzate da un suono caldo e morbido. Le corde moderne sono costituite da un'anima in fibra sintetica (nylon, rayon, carbonio) oppure in budello, circondata da un avvolgimento di seta e, esternamente, da uno in metallo (acciaio, alluminio, argento o oro). La corda *mi* del violino, la più fine e acuta di tutte quelle degli strumenti ad arco, è invece costituita da un unico filo di acciaio. Le corde moderne sono caratterizzate da un suono più brillante e intenso, e rispondono meglio alle esigenze timbriche e solistiche della musica moderna. Le quattro corde sono accordate per quinte nel caso di violino, viola e violoncello, mentre per quarte nel contrabbasso. In particolare nel violino sono accordate nelle note *sol*<sub>3</sub>, *re*<sub>4</sub>, *la*<sub>4</sub>, *mi*<sub>5</sub>, di frequenze 197, 298, 440, 660 Hz. La viola è accordata una quinta sotto il violino, con corde vuote *do*<sub>3</sub> (132 Hz), *sol*<sub>3</sub>, *re*<sub>4</sub>, *la*<sub>4</sub>. Il violoncello è accordato un'ottava sotto la viola, con corde vuote *do*<sub>2</sub> (66 Hz), *sol*<sub>2</sub> (99 Hz), *re*<sub>3</sub> (148.5 Hz), *la*<sub>3</sub> (220 Hz). Infine il contrabbasso ha corde *mi*<sub>1</sub>, *la*<sub>1</sub>, *re*<sub>2</sub> e *sol*<sub>2</sub> di rispettivamente 41.2, 55, 72.2, 99 Hz. La parte vibrante della corda è quella che va dal ponticello al capotasto, che costituiscono due nodi (punti fissi) della corda.

#### 3.1 Modi di vibrazione della corda.

Quando una corda viene messa in vibrazione, il suo moto è descritto da diverse configurazioni vibrazionali, dette *modi normali di risonanza*. Queste sono caratterizzate da *nodi*, ovvero i punti fissi della corda (come gli estremi della corda) e *ventri* (o *antinodi*), punti di massima oscillazione. Ogni modo normale ha una propria *frequenza* di oscillazione, e ciascuna di queste è un multiplo della frequenza *fondamentale*, che è quella più bassa. La frequenza della fondamentale è quella che determina il *tono* della corda, ovvero la nota che si sente quando la corda viene messa in vibrazione. Questa dipende dalle caratteristiche meccaniche della corda quali lunghezza, massa e tensione: la frequenza infatti dipende dalla velocità di propagazione della perturbazione nella corda secondo la formula:  $f = \frac{v}{2L}$ , con  $f$  frequenza della fondamentale,  $v$  velocità di propagazione e  $L$  lunghezza della corda;  $v$  a sua volta è legata alla tensione  $T$  e alla densità lineare  $d = \frac{m}{L}$  della corda:  $v = \sqrt{\frac{T}{d}}$ , con  $m$  la massa. Questo spiega perché più una corda è tirata ed è sottile, più ha un suono acuto.

Le frequenze degli *ipertoni*, così si chiamano i multipli della fondamentale, hanno suoni sempre più acuti all'aumentare della frequenza, e ciascuno di essi corrisponde a una nota diversa. Il nostro orecchio percepisce uguali due note che hanno frequenza l'una il doppio dell'altra; per esempio, data una nota di frequenza  $f$ , i suoni che hanno frequenze  $2f$ ,  $4f$ ,  $8f$ ,  $16f$  ecc. corrispondono alla stessa nota. Nella vibrazione di una corda invece sono presenti tutti i multipli di una data frequenza ( $2f$ ,  $3f$ ,  $4f$ ,  $5f$  ecc.), pur ciascuno con diversa intensità. Le note dei primi suoni armonici, in particolare, si trovano a distanza della fondamentale secondo la seguente successione di intervalli: ottava, quinta, ottava, terza maggiore, quinta, settima minore, ottava, seconda, ecc.



Primi quattro modi di vibrazione di una corda. In ordine dall'alto: il modo fondamentale; il primo ipertono, di un'ottava più acuto della fondamentale; il secondo ipertono, a distanza di quinta rispetto alla fondamentale, ma di un'ottava più acuto; il terzo ipertono, di due ottave più acuto. Sono segnati i nodi e gli antinodi. (E. Jansson, *Acoustic for violin and guitar makers*, pubblicazione online di KTH-TMH, 2002, cap. 4, p. 4)

Ciascuna risonanza è completamente descritta da un grafico che ha nell'asse delle ascisse la frequenza e nell'asse delle ordinate l'intensità. La curva presenta un picco di cui si può determinare la *frequenza*, l'*intensità* massima e l'*ampiezza*. Dato che ogni corda vibrante, come già detto, presenta numerose risonanze, la curva totale è composta da vari picchi, ciascuno con la propria frequenza, intensità e ampiezza. In particolare quest'ultima è una misura di quanto tempo ci mette il sistema ad assestarsi all'equilibrio dopo che viene messa in vibrazione ed è legata al tempo di riverberazione e al transiente iniziale. Un'altra grandezza che aiuta a descrivere il sistema è la *sensibilità vibrazionale specifica*, che è spesso usata come costante materiale ed è una misura di quanto sensibile è la corda alla forza che la mette in vibrazione; è quindi un indicatore di come la corda interagirà con lo strumento, ovvero di come la vibrazione viene trasferita dalla corda al ponticello e poi alla cassa.

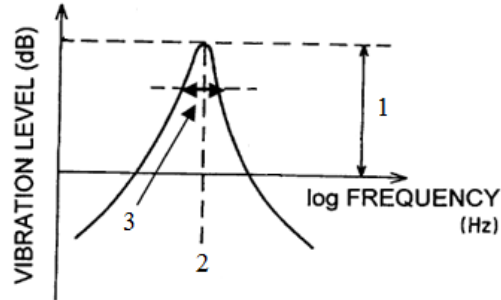


Grafico di una singola risonanza. È rappresentata l'intensità in funzione del logaritmo della frequenza: 1) intensità massima, 2) frequenza di risonanza, 3) ampiezza. (E. Jansson, *Acoustic for violin and guitar makers*, pubblicazione online di KTH-TMH, 2002, cap. 4, p. 3)

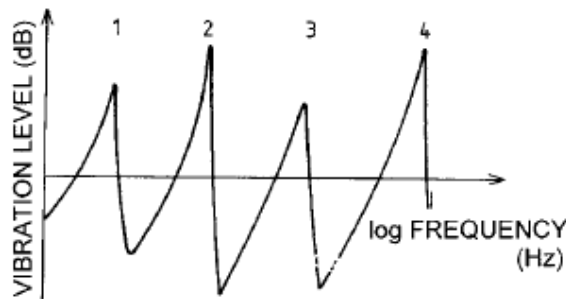


Grafico che mostra le prime quattro risonanze di una corda. Ognuna di esse ha una frequenza, un'intensità e un'ampiezza caratteristiche. Come nel grafico precedente, troviamo sull'asse delle ascisse il logaritmo della frequenza e sull'asse delle ordinate l'intensità. (E. Jansson, *Acoustic for violin and guitar makers*, pubblicazione online di KTH-TMH, 2002, cap.4, p.4)

### 3.2 Fattori di smorzamento dell'intensità.

La corda, nel caso degli strumenti ad arco, può essere messa in vibrazione sia tramite pizzico che tramite strofinamento. A seconda di come viene eccitata, le varie armoniche vibrano con una diversa intensità, che dipende dai vari fattori di smorzamento. Questi *fattori di smorzamento* sono almeno di tre tipi: il consumo di energia tramite frizioni interne che si manifesta con il riscaldamento della corda, lo smorzamento dovuto all'attrito con l'aria e la perdita di energia attraverso i supporti nel trasferimento della vibrazione ad altre parti dello strumento.

1) La grandezza legata allo smorzamento dovuto alle frizioni interne della corda è il *modulo di Young Y*. Questa è una misura dell'elasticità della corda ed è tanto maggiore quanto più la corda è elastica; ciò vuol dire che più il suo valore è alto più lo smorzamento è attenuato. Nelle corde di metallo, materiale con *Y* elevato, questo contributo dello smorzamento è trascurabile, mentre diventa importante nelle corde di budello o di nylon (che possono avere un *Y* anche dieci volte inferiore). In formule, il tempo di smorzamento dell'ampiezza ha un andamento del tipo:

$$t_Y = C \frac{Y}{f},$$

con *C* costante caratteristica della corda e *f* la frequenza.

2) Lo smorzamento dovuto all'attrito dell'aria si verifica perché la corda, muovendosi nel mezzo circostante, produce un moto viscoso dell'aria attorno a se stessa, che ne ostacola il suo stesso moto. Il

tempo di smorzamento dovuto a questo attrito è descritto dalla formula dimostrata da Stokes (1819-1903):

$$t_v = \frac{d_c}{d_a} \frac{1}{f} \frac{1}{\sqrt{8M+1}},$$

dove  $M = \frac{r}{2} \sqrt{\frac{2\pi f}{\eta a}}$ ,  $r$  è il raggio della corda,  $d_c$  la sua densità,  $d_a$  la densità dell'aria,  $\eta_a = 1.5 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2/\text{s}$  la viscosità dinamica dell'aria. Approssimando, la dipendenza del tempo di smorzamento è di proporzionalità diretta rispetto a  $d_c \cdot r^2$  a basse frequenze e a  $d_c \cdot \frac{r}{\sqrt{f}}$  ad alte frequenze.

3) Il terzo fattore di smorzamento è dovuto alla presenza dell'*impedenza acustica*. Questa è una misura della resistenza che oppone il supporto alle vibrazioni che gli giungono dalla corda in movimento, ed è dovuta ad esempio alla sua inerzia. Ciò si verifica negli strumenti ad arco perché le vibrazioni vengono trasmesse dalla corda alla cassa armonica; lo smorzamento è minimo quando le due impedenze, della corda e della cassa, sono uguali; infatti, se le due impedenze sono molto diverse, una modesta quantità di energia viene trasferita e le onde acustiche vengono in buona parte riflesse. La formula che esprime l'impedenza di una corda è  $Z_C = \frac{T}{v} = \sqrt{\mu T} = \mu v$ , con  $T$  la tensione a cui è sottoposta la corda,  $\mu$  la sua densità lineare e  $v$  la velocità dell'onda sonora; quella di una tavola, invece, si può esprimere con la formula  $Z_T = A s^2$ , con  $A$  una costante caratteristica della tavola e  $s$  il suo spessore. Per aumentare il trasferimento di energia fra corda e cassa armonica si può usare un adattatore di impedenza posto fra i due sistemi; nel caso degli strumenti ad arco l'adattatore di impedenza è rappresentato dal ponticello. Il tempo di smorzamento dovuto alla perdita di energia attraverso i supporti, dunque, ha questa espressione:

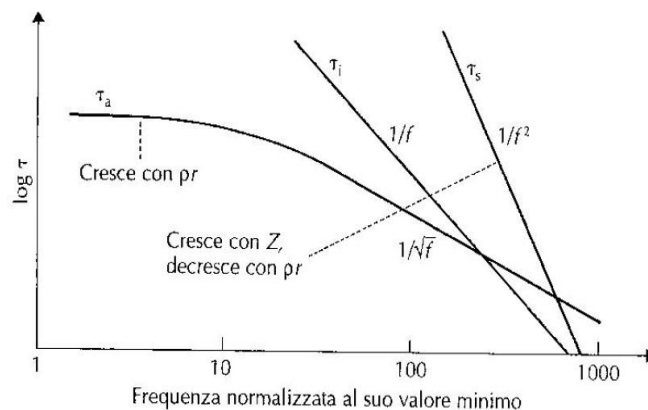
$$t_Z = \frac{Z_P}{8\mu L f^2} t,$$

con  $Z_P$  impedenza del ponticello.

Il tempo di smorzamento totale, in presenza dei tutti e tre gli effetti ugualmente rilevanti, è dato dalla formula:

$$\frac{1}{t_{tot}} = \frac{1}{t_Y} + \frac{1}{t_v} + \frac{1}{t_Z}.$$

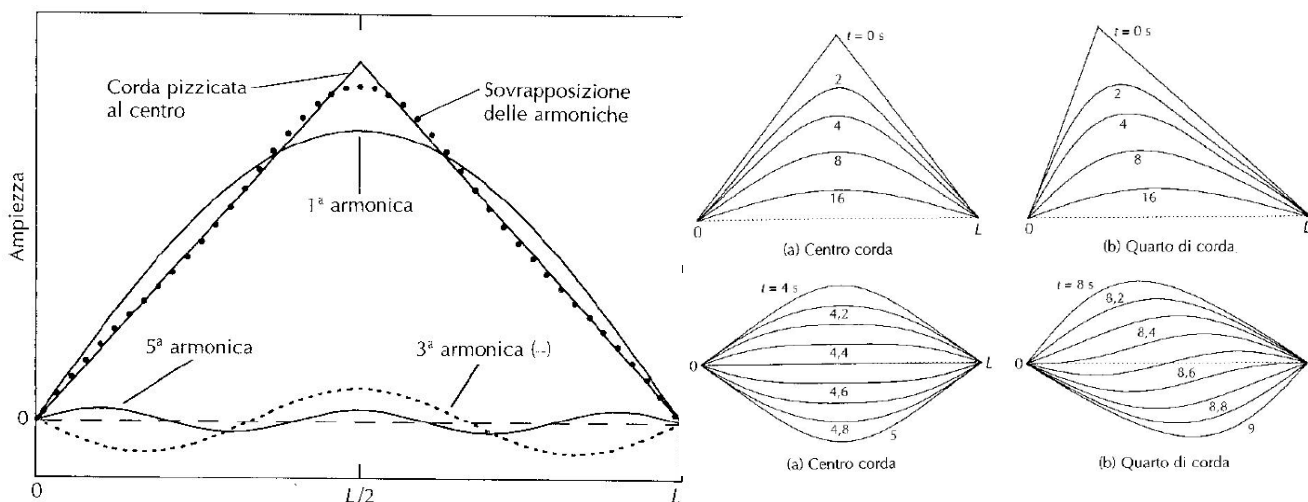
Il tempo di rilassamento prevalente quindi è il minore dei tre e, in particolare, per una vasta gamma di frequenze prevale lo smorzamento dovuto al moto viscoso, mentre ad alte frequenze prevalgono gli altri due, soprattutto quello legato a  $Y$ .



Andamento dei tre tempi di smorzamento in funzione della frequenza. (Frova, *Fisica nella musica*, Zanichelli, To 1999, p.66)

### 3.3 Moto di una corda pizzicata

Considerando il caso della corda pizzicata, alcune armoniche vengono annullate a seconda del punto di pizzico, ovvero del punto da cui parte la perturbazione. In particolare, se viene pizzicata alla metà, le intensità di tutte le armoniche pari sono nulle; se pizzicata a un terzo, vengono perse la terza, la sesta, la nona e così via: come regola generale, se la corda viene pizzicata in un punto che dista da un estremo  $L/n$ , con  $L$  lunghezza totale della corda e  $n$  numero intero, risultano nulle tutte le armoniche con numero d'ordine multiplo di  $n$ , se le consideriamo numerate ordinatamente secondo la frequenza crescente. Questo perché, quando la corda viene pizzicata in un punto, vengono annullate tutte le armoniche che avrebbero un nodo in corrispondenza di quel punto. Nello stadio iniziale dell'emissione del suono, inoltre, la corda assume una forma triangolare e presenta numerose frequenze spurie, legate al trasferimento di energia alle altre parti dello strumento e agli effetti di indeterminazione che caratterizzano la messa in vibrazione della corda. Dopo il lasso di tempo iniziale però riprende la sua forma caratteristica e inoltre, a causa dello smorzamento diverso delle differenti frequenze, alcune di esse possono scomparire mentre se ne possono trovare altre inizialmente assenti. Oltre al punto di pizzico, fa variare il suono emesso anche il modo con cui si pizzica la corda: se la curvatura della corda nel punto di pizzico è poco pronunciata, per esempio nel caso della pizzicatura tramite polpastrello o plettro morbido, l'intensità delle armoniche alte sarà debole, nel caso di pizzicatura con unghia o plettro rigido, il suono sarà più brillante.



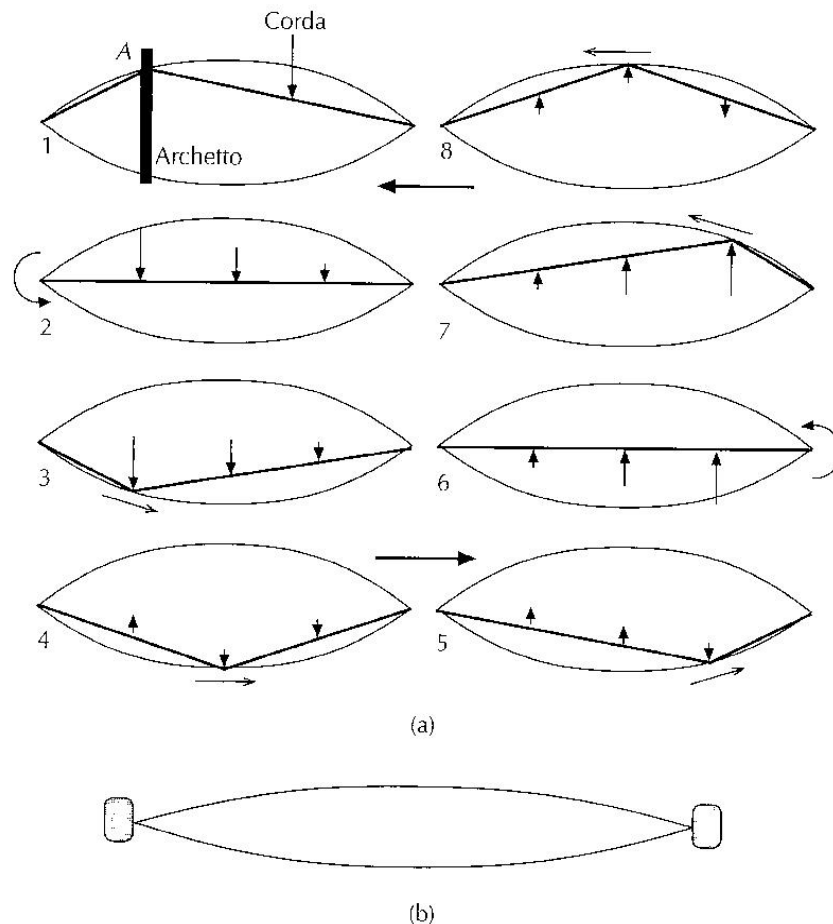
A sinistra è mostrata la forma della corda pizzicata al centro al tempo iniziale (linea spezzata con angolo acuto) e le armoniche numero  $n=1$ ,  $n=3$  e  $n=5$ , di ampiezza proporzionale a  $1/n^2$ . Come spiegato nel paragrafo, non sono presenti i modi 2 e 4 in quanto il punto di pizzico coincide con un loro nodo. La linea retta tratteggiata rappresenta la posizione della corda in equilibrio, mentre quella tratteggiata curva rappresenta il reale moto della corda in un certo istante, risultato della sovrapposizione dei modi di vibrazione. Come vediamo, nel caso della pizzicatura a metà, presenta una deformazione quasi triangolare.

A destra è mostrato il profilo della corda a diversi istanti, sia nel caso in cui la corda venga pizzicata al centro, sia nel caso che venga pizzicata a un quarto della sua lunghezza. In alto, si può vedere l'effetto dello smorzamento, che consiste in una progressiva diminuzione dell'ampiezza. La corda viene "fotografata" agli istanti corrispondenti a multipli del periodo  $T=2s$ . In basso, sono mostrati i profili della corda in diversi istanti all'interno del semiperiodo, per dare un'idea del moto. (Andrea Frova, *Fisica nella musica*, Zanichelli, Torino, 1999, p. 96, p. 99)

### 3.4 Moto di una corda strofinata con l'archetto

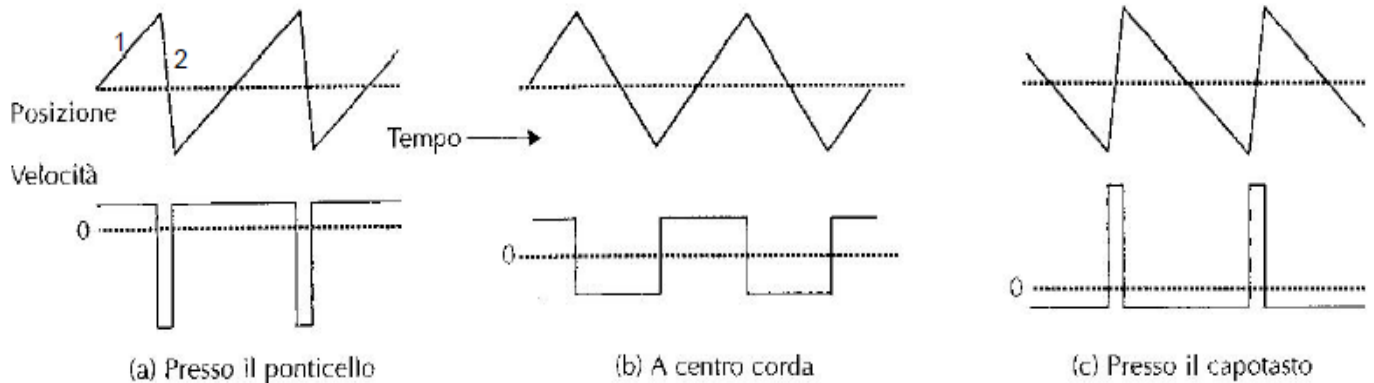
**Primi studi sulle corde di violino e comportamento della corda strofinata.** Il meccanismo della produzione del suono tramite lo strofinamento dell'archetto sulle corde è ovviamente diverso da quello della corda pizzicata. Questo perché nel primo caso il contatto con l'archetto impedisce alla corda la produzione di ventri in quel punto, mentre nel secondo caso la corda è libera di vibrare, essendo vincolata esclusivamente agli estremi.

Uno dei primi fisici che studiò e riuscì a spiegare esaurientemente il moto della corda causato dallo strofinamento con l'arco fu Hermann von Helmholtz, che nel 1860 pubblicò *On the action of the strings of a violin* per la Glasgow Philosophical Society. Egli mise in pratica un esperimento che consisteva nell'osservare il moto di un grano di amido fissato a una corda nera, messa in vibrazione con un archetto. Lo strumento utilizzato era un microscopio a vibrazioni (oggi si userebbe un oscilloscopio), montato su un diapason che gli permetteva di vibrare parallelamente alla corda. Quando il diapason e la corda venivano fatte vibrare a determinate frequenze, era possibile visualizzare tramite il microscopio le figure di Lissajous, da cui si possono ricavare i rapporti di fase e pulsazione delle due frequenze. Osservando in questo modo vari punti della corda Helmholtz riuscì a descrivere matematicamente il moto dell'intera corda.



- a) Propagazione del punto angoloso lungo la corda nel corso di un periodo di vibrazione della fondamentale.  
b) Profilo parabolico della corda. La curvatura è stata aumentata per renderla più visibile, nella realtà è meno pronunciata.  
(Andrea Frova, *Fisica nella musica*, Zanichelli, Torino 1999, p. 279)

Questo consiste in un “processo di adesione e scivolamento”. Come egli scrisse nell’articolo, “durante gran parte di ogni vibrazione la corda viene trascinata dall’arco. Poi, improvvisamente, essa si stacca e rimbalza, quindi viene ricatturata da altre parti dell’arco e di nuovo trascinata”. Questo accade perché l’attrito *statico* fra corda e crine è molto maggiore di quello *dinamico*. Durante la fase di trascinamento, in cui l’archetto fa deviare la corda rispetto alla sua condizione di riposo in un unico punto preciso, prevale l’attrito statico; nella fase di slittamento, invece, la corda diviene fonte di vibrazione, in quanto la deformazione generata dal trascinamento iniziale si propaga in tutta la sua lunghezza. Ciò che permette alla corda di sfuggire all’impuntamento è l’arrivo della deformazione, dovuta allo slittamento precedente, a uno degli estremi fissi della corda; questo fa in modo che la forza elastica di richiamo prevalga sulla forza di attrito statico. Helmholtz inoltre scoprì che il profilo della corda presenta un punto angoloso dovuto al trascinamento da parte dell’archetto. Anche durante la fase di slittamento questo viene trasportato lungo la corda con un movimento rotatorio, e quando ritorna al punto iniziale la forza d’attrito prevale di nuovo e si verifica un trascinamento. Ciò si verifica una volta ad ogni vibrazione della corda, ovvero per esempio 440 volte al secondo nel caso di un  $la_3$ . Il punto angoloso della corda non esce mai dai profili che possiamo vedere quando osserviamo una corda che vibra. Questi sono curve regolari e Helmholtz scoprì che in particolare sono delle parabole. La loro curvatura però è così piccola che possono essere scambiati per archi di cerchio. Se si visualizza in un grafico la posizione di un punto della corda (il grano di amido) in funzione del tempo ciò che ne risulta è una curva a zig-zag.



In figura, grafici della posizione in funzione del tempo e della velocità in funzione del tempo. In alto, è descritto lo spostamento del punto di contatto fra crine e corda, nel caso in cui la corda venga suonata con l’archetto presso il ponticello (a), a centro corda (b), o presso il capotasto (c). In basso, le relative velocità. Col numero “1” viene indicata la fase di impuntamento, mentre col numero “2”, quella di slittamento.

(Andrea Frova, *Fisica nella musica*, Zanichelli, Torino 1999, p. 280)

Helmholtz riteneva inoltre che la velocità della corda nello scatto indietro fosse costante, cosa che venne però smentita C.V. Raman. Egli, una cinquantina di anni dopo Helmholtz, fece uno studio sul comportamento meccanico del violino cercando di descrivere il moto della corda non in funzione dello spostamento laterale ma in funzione della velocità trasversale. Quest'ultima poteva essere effettivamente, in molti casi, considerata costante, ma solo in presenza di un'approssimazione. La forma della curva di spostamento di Raman è sempre a zig-zag, ma mentre gli zig sono lenti, gli zag sono istantanei; quando l'onda viene riflessa da un'estremità ha esattamente la stessa forma, solo con direzione di propagazione opposta.

Verso la metà del 1900, J. Shelleng fece altri studi, utilizzando però una strumentazione più moderna e precisa. Sfruttò il fatto che i materiali di cui le corde sono generalmente costituite sono conduttori: un magnete è posto vicino alla corda e al movimento di questa viene indotta una forza elettromotrice proporzionale alla velocità della corda. Il segnale in uscita passa attraverso un amplificatore e viene letto da un oscilloscopio, così si possono ricavare lo spostamento e la velocità della corda molto più dettagliatamente che con i metodi passati. Durante il trascinamento la velocità della corda corrisponde alla velocità dell'arco; la velocità è negativa invece durante lo slittamento, quando la corda scatta all'indietro prima di aderire nuovamente all'arco. Il modo di vibrare della corda è diverso se si prende come riferimento un punto a centro corda, uno vicino al ponticello o uno vicino al capotasto. Queste differenze si possono visualizzare nei grafici della posizione e della velocità rispetto al tempo: vicino al ponticello il dente di sega è molto asimmetrico, come lo è vicino al capotasto, con profilo però invertito. A centro corda invece il dente di sega è simmetrico. Per quanto riguarda la velocità, questa presenta valori molto diversi fra trascinamento e slittamento nei due casi estremi, mentre le velocità sono uguali in modulo nella condizione di centro corda.

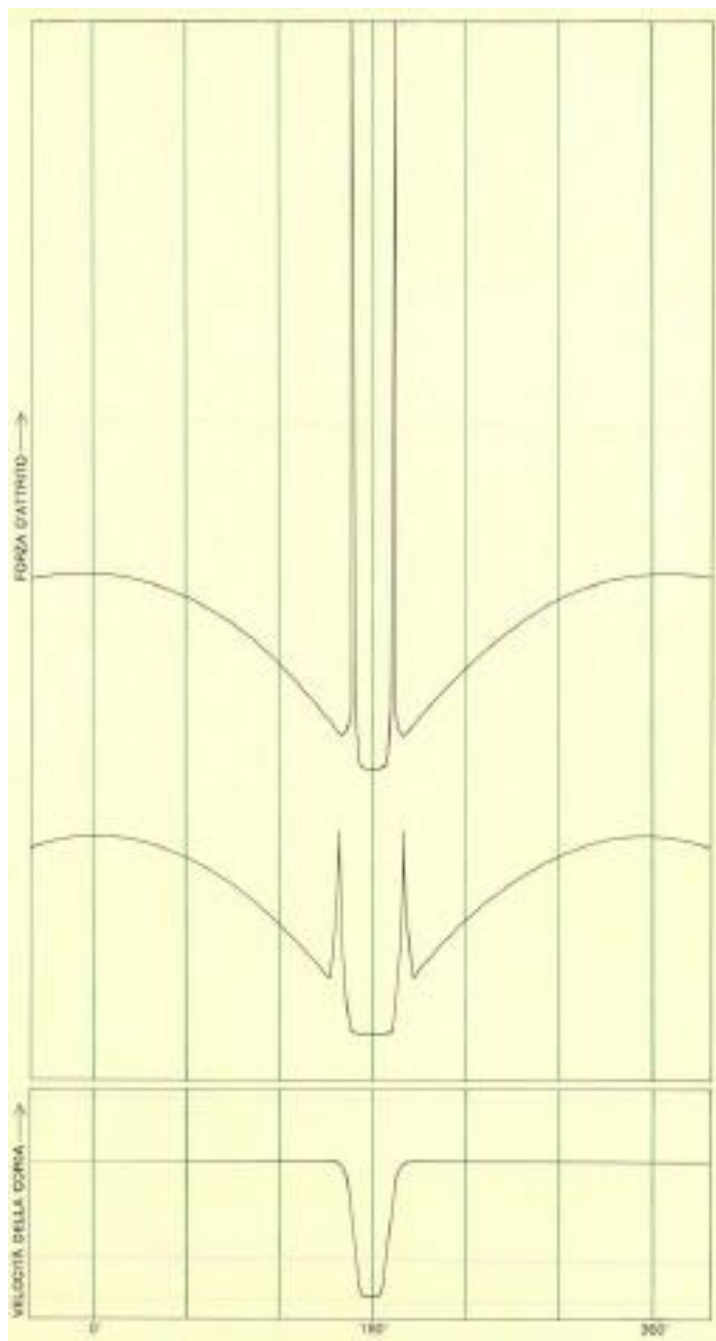
**Limiti pratici nello strofinamento della corda.** Altri parametri meccanici che è interessante studiare e a cui bisogna stare attenti quando si suona uno strumento ad arco sono la velocità dell'archetto, la distanza di questo dal ponticello e la forza perpendicolare esercitata sulle corde. Questi parametri sono molto variabili: la distanza dal ponticello, per esempio, può variare da un valore minimo a cinque volte questo valore, la velocità e la forza fino a cento volte il loro valore minimo. Sono inoltre legati l'uno all'altro; ovvero, fissati due, il terzo deve appartenere a un certo intervallo di valori che dipende dalle costanti fisiche della corda e della cassa dello strumento. Cerchiamo di spiegare quali siano i processi che determinano l'esistenza di tali limiti.

Consideriamo innanzitutto la *forza* esercitata dall'archetto. Questa è strettamente legata alla forza di attrito. Per semplificare il ragionamento è necessario fare qualche approssimazione; si assume che:

- 1) si possano applicare le leggi elementari dell'attrito statico e dinamico;
- 2) il ponticello abbia un'alta resistenza meccanica;
- 3) la massa, la tensione, il moto della corda sull'arco siano dati conosciuti.

Bisogna tener conto del fatto che la forza d'attrito non è costante nel tempo. Essa è periodica, ovvero ha andamento uguale per ogni vibrazione. Per questo, se assimiliamo un'onda completa al percorso di un punto su un cerchio (ogni oscillazione copre 360 gradi), essa si può visualizzare in un grafico che ha nell'asse delle ascisse non il tempo ma i gradi. I punti di massimo della forza sono a 0 e a 360 gradi, quelli di minimo sono a 180 gradi. Intorno a questo valore di minimo si verifica lo scivolamento, che è

separato dallo stato di trascinarsi, sia all'inizio che alla fine, da due discontinuità. Nelle discontinuità la forza presenta due picchi: il primo in corrispondenza di quando la perturbazione arriva al capotasto, supera l'attrito statico e inizia lo scivolamento; l'altro quando la perturbazione ritorna al ponticello e comincia l'adesione. La forza di attrito statico, che prevale durante il trascinarsi, non è costante, ma diminuisce a mano a mano che ci si avvicina alle discontinuità. La curva con questo andamento è detta "a orecchie di coniglio" ed è tipica di tali forze di attrito. Tale grafico, che descrive la forza d'attrito, deve essere considerato dal punto di vista qualitativo, in quanto i valori particolari dipendono largamente e variano di molto a seconda della corda che viene suonata e dalla cassa dello strumento. Le discontinuità hanno la funzione di compensare la differenza in intensità che c'è tra l'attrito statico e quello dinamico. Tuttavia, se la forza d'arco è superiore a un certo valore massimo, la discontinuità non è abbastanza intensa per compensare la differenza e l'attrito statico è talmente alto che non permette di iniziare lo slittamento. La vibrazione diventa quindi un'oscillazione irregolare e il risultato sonoro non è musicale. Se invece la forza d'arco è troppo debole, le orecchie della curva della forza di attrito sono di intensità uguale al suo valore massimo e l'attrito statico diventa insufficiente a far uscire la corda dal suo stato di riposo. Ciò comporta una curva di spostamento della corda instabile, nella quale inizia a formarsi un nuovo zig-zag e, se si lascia crescere, la nota fondamentale viene sostituita dalla nota di ottava (anche detta nota di superficie).



In alto, grafico della forza d'attrito all'interno di un'oscillazione (misurata in gradi), con andamento "a orecchie di coniglio". Notiamo i due picchi in corrispondenza delle discontinuità al passaggio fra impuntamento e scivolamento e viceversa. Il primo grafico rappresenta la forza d'attrito quando la pressione dell'arco sulla corda ha un valore intermedio fra valore massimo e minimo. Il secondo, invece, rappresenta la forza d'attrito quando la pressione è vicina al valore minimo: i picchi, in questo caso, hanno la stessa altezza del massimo della forza d'attrito. Ai lati, in corrispondenza di 0 e 360 gradi, per chiarezza, non sono disegnate le oscillazioni, presenti nella situazione reale. Il grafico in basso mostra l'andamento della velocità corrispondente alla curva della forza di attrito. (John C. Shelleng, "La fisica delle corde di violino", *Le Scienze*, 1974, n.68, pp. 82-90, p. 87)

Visti i limiti della forza esercitata sulla corda, consideriamo adesso la sua relazione con la *distanza* e la *velocità* d'arco. La massima forza d'arco è inversamente proporzionale alla distanza arco-ponticello, la minima invece è inversamente proporzionale al quadrato della distanza. Si possono visualizzare gli andamenti della minima e della massima forza d'arco in un grafico in scala logaritmica. In questo caso entrambe hanno andamento rettilineo. A una certa distanza molto vicina al ponticello, minima e massima forza d'arco sono uguali, mentre a mano a mano che ci si allontana diventa sempre più ampio l'intervallo di possibili forze che si possono esercitare. Molto lontano dal ponticello il suono è detto "flautato": è più delicato e dolce, le armoniche superiori hanno intensità molto bassa e il volume del suono è minimo. Sul ponticello invece il suono è prodotto solo da una serie di armoniche alte. A mano a mano che ci si avvicina al ponticello la forza che si esercita deve essere sempre più alta e la mano dell'esecutore sempre più ferma, in quanto la differenza fra forza minima e forza massima diminuisce sempre di più. In generale, sia avvicinandosi al ponticello che aumentando la forza il suono acquista brillantezza grazie all'aumento delle intensità delle armoniche alte. La variazione della distanza dal ponticello e della forza d'arco ha effetti anche sul volume di suono prodotto: questo infatti non dipende solo dall'intensità della forza agente sulle corde, ma anche dall'intensità delle armoniche alte.

I mezzi che ha l'esecutore per variare il volume di suono sono la velocità dell'arco e la distanza dal ponticello: con una certa approssimazione si può dire che l'intensità del suono è inversamente proporzionale alla distanza e direttamente proporzionale alla velocità. Infine, spesso si verifica un'impresione nell'attacco del suono (che viene detto attacco "sporco"); questo perché la velocità d'arco prevale sulla forza di attrito statico e solo dopo un certo tempo le due si equilibrano. L'abilità dell'esecutore sta proprio nel rendere questo intervallo di tempo impercettibile.

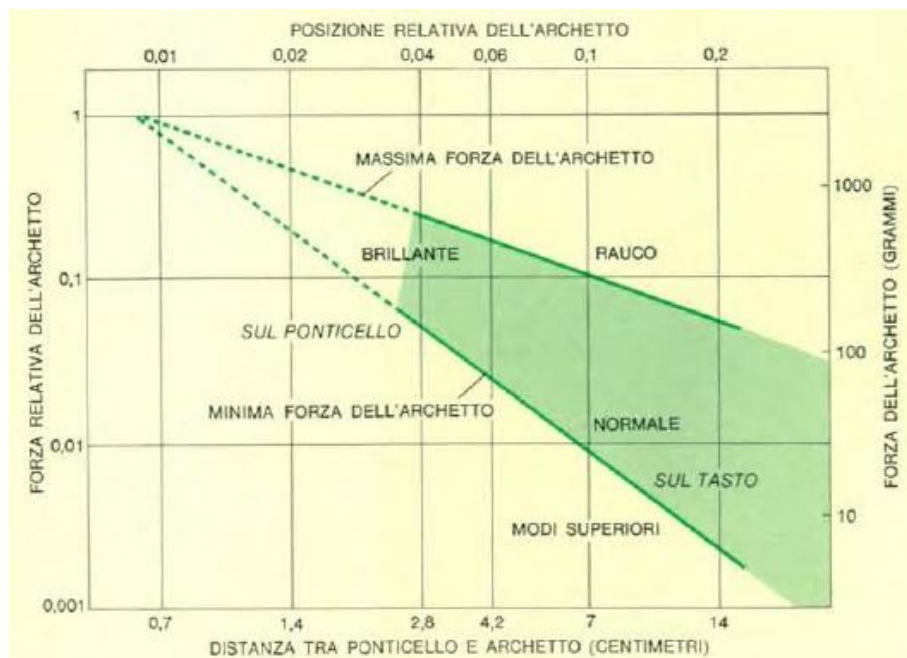


Grafico della forza esercitata dall'archetto sulle corde in funzione della distanza dal ponticello. I valori corrispondono a una corda vuota *la* di violoncello, suonata a una velocità costante di 20 cm/s. La forza minima e la forza massima sono rappresentate da due rette, e la zona colorata fra le due rette rappresenta i valori per i quali è possibile ottenere un risultato musicale. (John C. Shelleng, "La fisica delle corde di violino", *Le Scienze*, 1974, n.68, pp. 82-90, p. 88)

## 4. CASSA ARMONICA

Come le corde, anche la cassa armonica di qualsiasi strumento è caratterizzata da particolari frequenze di risonanza, detti modi di vibrazione risonante. I principali sono quelli della tavola armonica, del fondo e dell'aria racchiusa nella cassa. La risonanza di qualsiasi tavola di legno messa in vibrazione è influenzata da proprietà meccaniche del legno, quali l'*elasticità*, la *massa* e la *frizione* dell'aria (quando il corpo risonante è in movimento), ed è caratterizzata dalle proprietà vibratorie di frequenza, intensità e ampiezza di banda. Un corpo messo in vibrazione, come nel caso delle corde, può avere diverse frequenze di risonanza, ciascuna caratterizzata da una particolare intensità e ampiezza. Ciascuna parte del legno vibra con un'intensità diversa, e queste intensità sono visualizzate dalle linee nodali e antinodali, di cui abbiamo parlato precedentemente. Nodi e antinodi sono diversi a seconda della frequenza a cui vibra la tavola e per questo ciascuna risonanza è caratterizzata da una particolare configurazione nodale.

### 4.1 Metodi di misurazione

Uno dei metodi più comuni per studiare queste risonanze consiste, per esempio, nel mettere in vibrazione lo strumento tramite un attivatore elettromagnetico (nel caso del violino, applicato al ponticello o a diversi punti della cassa) e visualizzare le configurazioni vibrazionali tramite il *metodo di Chladni*. Questo è il più vecchio metodo usato in questo campo e fu applicato per la prima volta nella prima metà del 1800. Viene posta una tavola di legno, tenuta sollevata dal piano d'appoggio tramite dei piccoli spessori di plastica, a pochi cm da un altoparlante; quest'ultimo viene collegato a un oscillatore audio tramite un amplificatore. Infine si cosparge di polvere fine la tavola. Attivando l'oscillatore, che genera un'onda sinusoidale di frequenza determinata, la tavola viene messa in vibrazione e, cambiando la frequenza di tale vibrazione, si osserva a quale valore i granelli di polvere saltano di più. Le frequenze trovate sono le frequenze di risonanza e, in queste condizioni, la polvere si dispone in modo da evidenziare le configurazioni nodali e antinodali (è preferibile mettere i pezzetti di plastica che sollevano la tavola in corrispondenza dei nodi, in modo da influenzare il meno possibile il risultato dell'esperimento).

Nel '900 furono introdotte tecniche elettroniche ed ottiche, come, per esempio, l'*interferometria olografica in luce laser*, applicata per la prima volta da Karl Stetson negli anni '70 e sviluppato principalmente da Biedermann, Ek e Molin. L'interferometria è una tecnica di misurazione laser che dà risultati molto più precisi del metodo di Chladni. L'olografia invece è una tecnica che riproduce immagini tridimensionali e permette quindi la visualizzazione delle configurazioni nodali attraverso un monitor. Le misurazioni sono fatte senza venire a contatto diretto con la lastra, cosa che potrebbe influenzare i risultati.

## 4.2 Caratteristiche fisiche del legno

Quali sono le caratteristiche meccaniche proprie del materiale di cui bisogna tener conto nella scelta del legno? I legni generalmente usati per la costruzione della tavola armonica sono l'abete rosso, il più pregiato, l'abete bianco o l'abete norvegese; mentre per il fondo e le fasce si usa l'acero, anche se C. Hutchins fece alcuni esperimenti con legni di pero, melo, ciliegio, sicomoro e teak, ottenendo risultati qualitativamente soddisfacenti. I legni devono avere una lunga stagionatura, le assi devono essere conservate in cataste in capannoni esterni, dai 5 ai 10 anni per l'abete rosso e un po' più a lungo per l'acero (anche se alcuni liutai usano legni con un periodo di stagionatura di non meno di 50 anni). Questo perché la struttura cellulare del legno aumenta di pari passo con la sua stagionatura, e i materiali con una struttura cristallina più solida perdono e assorbono acqua meno facilmente, e quindi sono meno sensibili ai cambiamenti di umidità. Altre caratteristiche di cui bisogna tener conto nella scelta del legno sono: l'elasticità lungo e attraverso la venatura, il taglio, l'attrito interno, la densità e la velocità del suono nel legno.

1) L'*elasticità* è legata al valore del *modulo di Young*, che è definito come il rapporto tra lo sforzo applicato e la deformazione che questo comporta. Quantifica quindi, come detto nel caso delle corde, la resistenza del materiale all'incurvamento locale e alla tensione. Si ha un valore dell'elasticità diverso a seconda che lo si misuri lungo o attraverso le venature: il legno infatti è un materiale anisotropo. La rigidità è molto maggiore lungo le fibre che attraverso di esse, e questo fatto può essere sfruttato vantaggiosamente in quanto influisce sui modi di risonanza del legno. In particolare, per l'abete rosso, il rapporto fra le due rigidità è circa 10.

2) Il *taglio* è una misura della resistenza alla distorsione angolare, che si verifica quando viene applicata una sollecitazione lateralmente a un'estremità, e come conseguenza le parti superiore e inferiore ruotano l'una rispetto all'altra in direzioni opposte.

3) L'*attrito interno*, o *smorzamento*, stabilisce la relazione fra energia dissipata e energia immagazzinata elasticamente. Si può misurare, come già detto nel caso delle corde, calcolando il tempo di decadimento durante il quale persiste la vibrazione dopo che la sollecitazione è stata interrotta; è preferibile che questo non sia troppo breve. In alternativa si può misurare l'ampiezza dell'intervallo di frequenze entro il quale si ha una risposta all'eccitazione continua al variare della frequenza attorno a un valore di risonanza. La grandezza usata è  $Q$ , o *fattore di qualità*, che è inversamente proporzionale allo smorzamento.

4) La *densità* è il peso per unità di volume.

5) Infine la *velocità* del suono nel legno è data dalla radice quadrata del rapporto fra modulo di Young e densità del legno. Tale velocità, per un buon legno di abete rosso, deve essere alta.

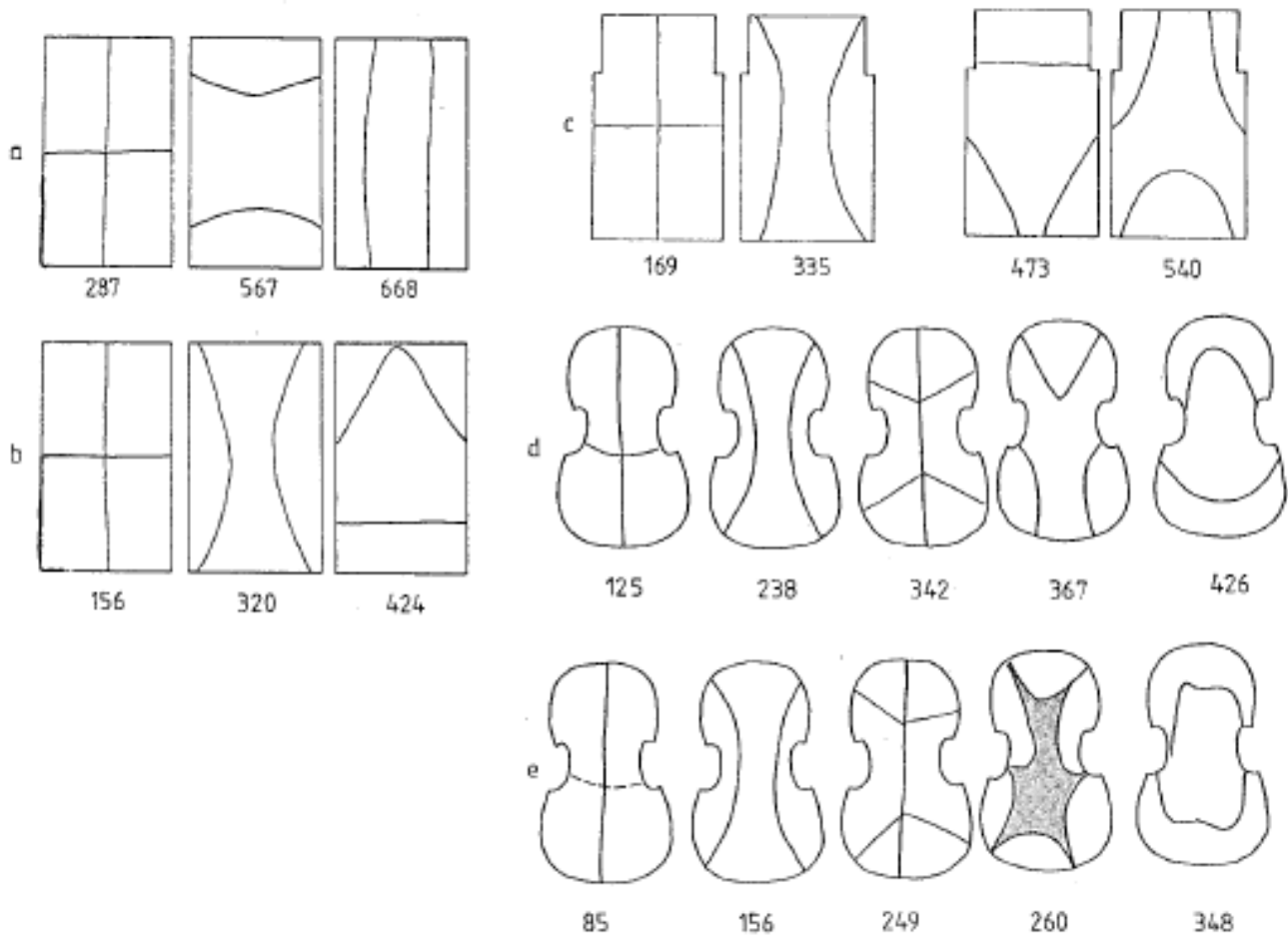
## 4.3 Configurazioni di risonanza delle tavole armoniche

In che modo le proprietà meccaniche del legno sono legate alle risonanze di una tavola e, nel caso degli strumenti ad arco, a quali valori di queste grandezze fisiche corrispondono buoni risultati musicali del suono prodotto? I primi a studiare i modi di risonanza delle tavole di violini, con lo scopo di chiarire quali fossero queste relazioni, furono il fisico Felix Savart (1791-1841) e il liutaio Jean-Baptiste Vuillaume (1798-1875). A partire dal 1830 questi eseguirono esperimenti su una dozzina di violini

costruiti da Antonio Stradivari e Giuseppe Guarneri più di un secolo prima. Applicarono per la prima volta alle tavole armoniche il metodo di Chladni (1756-1827), e scoprirono che nella maggior parte dei violini le frequenze principali di risonanza del fondo e della tavola si trovano a distanza di un semitono o un tono. In particolare di solito il tono del fondo è  $re_3$  o  $re_3\#$ , mentre il tono del piano armonico è  $do_3\#$  o  $re_3$ . Dopo Vuillaume e Savart numerosi ricercatori si dedicarono a esperimenti e studi teorici sulle risonanze di tavole armoniche e strumenti già montati. Sono da ricordare Hermann Von Helmholtz (1821-1894), Lord Rayleigh (1842-1919), che lasciarono importanti contributi e risultati teorici e pratici sull'acustica in generale, oltre che sul comportamento fisico degli strumenti ad arco in particolare; il premio Nobel Chandrasekhara Venkata Raman (1888-1970), che per esempio fu il primo a spiegare esaurientemente un particolare fenomeno chiamato "nota del lupo". Altri fisici e liutai da ricordare sono: Frederick Saunders (1875-1963), Hermann Backhaus (1885-1958), Hermann Meinel (1904-1977), Lothar Cremer (1905-1990) e Carleen Hutchins (1911-2009). Negli anni '30 del novecento, Meinel, continuando il lavoro del suo maestro Backhaus, eseguì vari studi sulla relazione fra spessore dei piani armonici e le risonanze, e su come questi sono legati al timbro e al volume del suono. Studiò inoltre le proprietà del legno, l'incurvatura dei piani armonici e la verniciatura. Ne ricavò che per migliorare il suono di un violino in un certo intervallo di frequenze era necessario intagliare il legno in un determinato punto, diverso per ogni frequenza. Bisogna però tener conto del fatto che una piccola modifica del legno produce grandi cambiamenti nei modi di vibrazione dell'intera cassa, quindi a un miglioramento in un certo intervallo di frequenze può corrispondere un peggioramento in un altro.

**Cambiamenti delle risonanze delle tavole in funzione di spessore, contorni e curvatura.** Come già detto, ogni tavola di legno è caratterizzata da particolari risonanze, ciascuna con propria frequenza, intensità, ampiezza e configurazione vibrazionale. Variando lo spessore della tavola, i suoi contorni e la sua curvatura, è possibile modificare tutte queste caratteristiche e, per esempio, accordare le tavole armoniche di uno strumento. Nella figura, tratta da uno studio di Erik Jansson, Jesus Alonso Moral e Jakub Niewczyk ("Experiments with Free Violin Plates", *Catgut Acoustical Society Journal* 1 n.2, 1988), si può vedere come cambiano le frequenze e le configurazioni di risonanza durante la lavorazione di una tavola, a partire da una di forma rettangolare piana fino a una tavola armonica conclusa.

Si osserva che la configurazione del primo modo mantiene la sua forma a croce anche dopo ogni modifica. Quella del secondo modo cambia invece fra prima fase, dove presenta due linee curve orizzontali, e seconda fase, dove le due linee diventano verticali, per poi restare invariate nelle fasi successive. Per quanto riguarda il terzo modo, nelle prime due fasi avviene il contrario che per il secondo modo, ovvero da due linee verticali si passa a due linee orizzontali, quella inferiore retta mentre quella superiore curva. La forma si inverte a specchio nella terza fase e in seguito le due linee assumono forma simmetrica. Nelle ultime due fasi viene mostrato anche il quinto modo, le cui linee tendono a chiudersi ad anello, e nella fase  $e$  assumono forma più quadrata.



Cambiamenti delle frequenze di risonanza e delle linee nodali di una tavola rettangolare a una tavola armonica: a) tavola rettangolare piatta, b) tavola spessa 8 mm con leggera curvatura interna ed esterna, c) come in b ma con parte superiore più corta e stretta, d) spessore ridotto a 4 mm nelle parti superiore e inferiore e 5.1 mm al centro, e) spessore di 2.8 mm. (Jansson, Alonso Moral, Niewczyk, "Experiments with Free Violin Plates", *Journal of the Catgut Acoustic Soc.* 1 n.2, 1988, riportato in E. Jansson, *Acoustic for violin and guitar makers*, pubblicazione online di KTH-TMH, 2002, cap. 5, p.18)

La dipendenza delle risonanze dallo spessore, per esempio, fu studiata indipendentemente da Carleen Hutchins e Jesus Alonso Moral. Alcuni criteri sperimentali per modificare le risonanze sono:

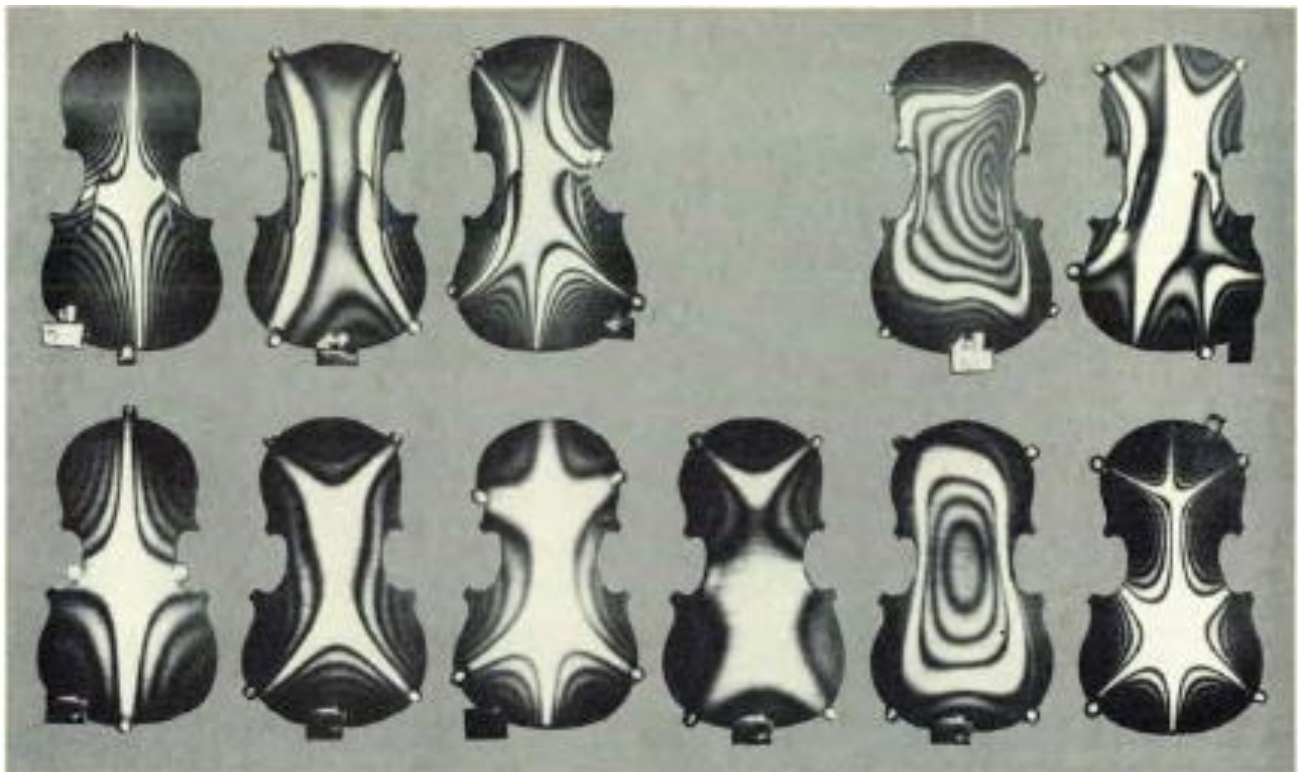
- 1) si può abbassare la frequenza di risonanza assottigliando la tavola in qualsiasi parte che non corrisponda né a una linea nodale né a una estremità libera;
- 2) il maggiore spostamento delle linee nodali si ha riducendo lo spessore in prossimità di una linea, tuttavia questo spostamento non è considerevole;
- 3) l'ampiezza di banda è influenzata solo leggermente dai cambiamenti di spessore.

La regola generale è che se si rimuove il legno in una zona dove un modo presenta un'elevata vibrazione, la relativa frequenza verrà abbassata; se invece si riduce lo spessore in una zona dove la vibrazione è minima, la frequenza si alzerà. Questo perché quando si toglie parte del legno si riducono sia la rigidità che la massa, però in misura diversa a seconda se si è in presenza di un forte movimento vibratorio o meno. In particolare, se la vibrazione è forte, la rigidità verrà ridotta maggiormente rispetto alla massa; viceversa se la vibrazione è debole. La rigidità e la massa sono entrambe proporzionali allo spessore, anche se la prima è proporzionale al suo cubo, mentre la seconda è in proporzionalità diretta. Infine la

frequenza di risonanza è anch'essa proporzionale allo spessore, e si abbassa quando la barra viene assottigliata in ugual misura in tutta la tavola. Il valore della frequenza fondamentale nel caso di una barra rettangolare è dato dalla formula  $F = \frac{s}{12} \cdot \sqrt{\frac{Y}{d}}$ , con  $s$  spessore,  $l$  lunghezza della tavola,  $Y$  modulo di Young e  $d$  densità del legno.

Per quanto riguarda le variazioni delle risonanze in seguito alle modifiche dei contorni della tavola, si può far riferimento agli studi di Ion Paul Beldie nel 1969, pubblicati in *Chladni patterns and Resonant Frequencies of violin Plates*, *Instrumentenbau-Zeitschrift*, Vol.23 n.2. Nel caso della cassa armonica di uno strumento ad arco, generalmente la frequenza del primo modo risulta più alta rispetto alla tavola di forma rettangolare, perché la massa è rimossa principalmente in corrispondenza degli antinodi (negli angoli del rettangolo). La frequenza della seconda risonanza a sua volta aumenta, mentre quella della terza diminuisce.

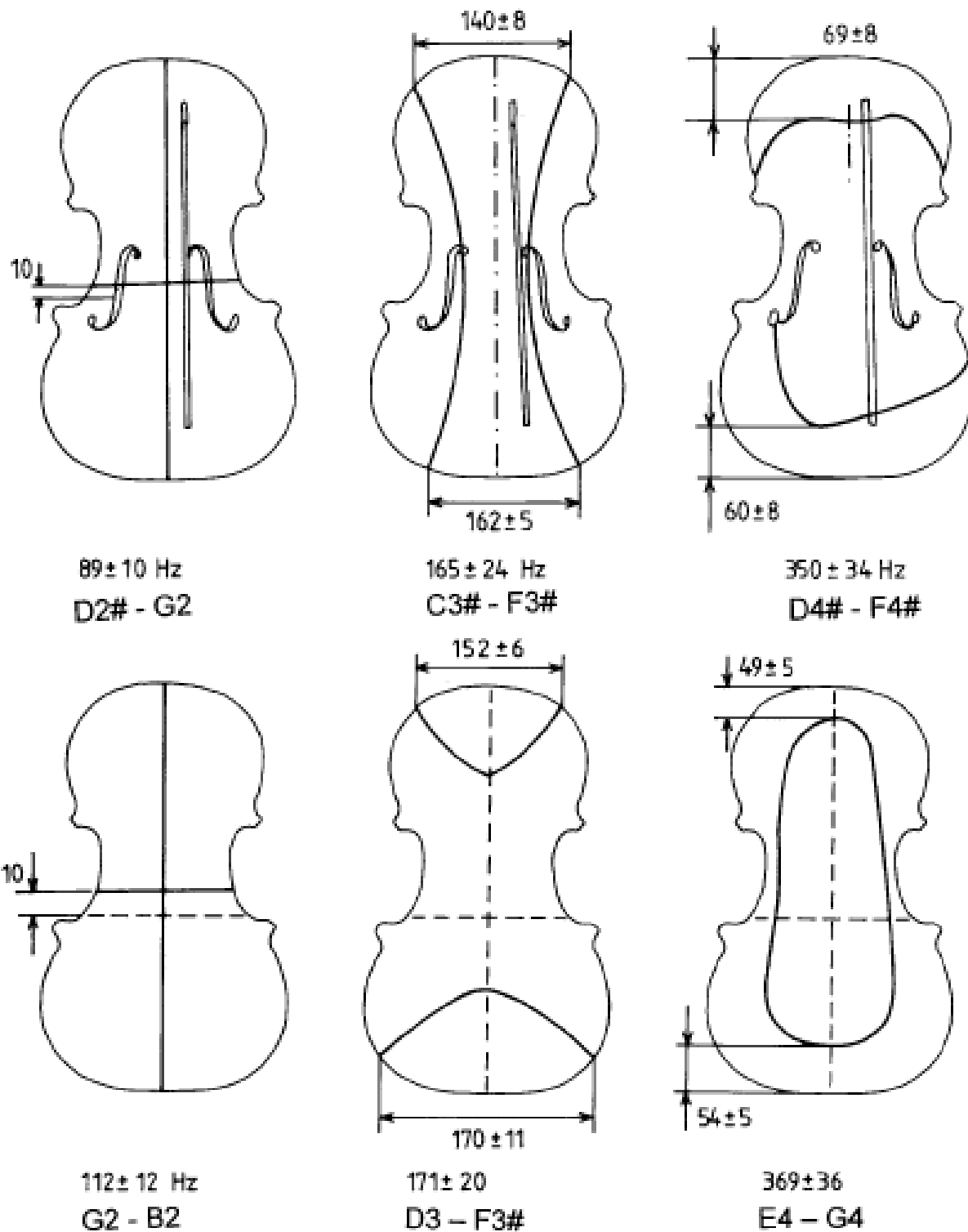
Quanto influisce invece la curvatura sulla risonanza? Il raggio di curvatura della tavola di un violino è di circa 0.2 m lungo la tavola e di 1.5 m attraverso la tavola. Secondo studi di Jakub Niewczyk su tavole di violino che presentano questi valori di curvatura, nell'incurvare il legno, la rigidità aumenta di più attraverso le venature che lungo queste. Inoltre le risonanze sono molto influenzate dal modo in cui sono orientate le venature rispetto alle dimensioni e alla forma della tavola. La forma della prima configurazione di risonanza rimane quasi invariata dopo l'incurvamento.



Configurazioni nodali di una tavola (completa di fori a effe e catena) e di un fondo di un violino, evidenziati tramite la tecnica di interferometria olografica. La fila superiore mostra i primi sei modi della tavola (quarto e quinto modo coincidono) con frequenze in ordine crescente 80, 147, 222, 304 e 349 Hz. La fila inferiore mostra quelli del fondo, a frequenze 116, 167, 222, 230, 349 e 403 Hz. (C.Hutchins, "L'acustica dei piani armonici di violino", *Le Scienze*, 1981,n.160, pp.86-99, p. 89)

**I tre modi principali nell'accordatura delle tavole.** Tutte le tavole armoniche, di qualsiasi dimensione, presentano la stessa successione di configurazioni nodali, se le consideriamo in ordine dalla frequenza fondamentale a una sempre maggiore. Per questo si può parlare di modo 1, modo 2, modo 3, e così via per qualsiasi caso studiato. I valori delle frequenze sono invece caratteristici di ogni tavola, e variano di molto anche per strumenti con caratteristiche apparentemente simili, anche se in linea generale più grande è la cassa armonica, più le frequenze sono basse. Si farà ora principalmente riferimento al lavoro di Carleen Hutchins<sup>[3]</sup>. I modi più importanti nella accordatura delle tavole sono i modi 1, 2 e 5. Ciascuno di loro è legato a una particolare proprietà meccanica di elasticità. Il *primo modo* presenta due linee nodali che formano una croce e si intersecano al centro della tavola. I punti di massima vibrazione, quindi, si trovano ai quattro “angoli” di un piano armonico e gli antinodi che si trovano nella stessa diagonale vibrano in fase, mentre quelli adiacenti in opposizione di fase. Il primo modo rappresenta la rigidità di torsione della tavola, ovvero quella che si valuta in modo pratico prendendo le due estremità superiore e inferiore con le mani e torcendo queste in direzioni opposte. Il *secondo modo* ha due configurazioni vibrazionali diverse per il fondo e per il piano armonico: ciascuna è caratterizzata da due linee nodali che percorrono la tavola, verticalmente per il piano armonico e orizzontalmente per il fondo. Le linee sono curve e si avvicinano fra loro al centro della tavola. Gli antinodi si trovano negli stessi punti per entrambe le tavole. Per valutare la rigidità del modo 2, si prende un'estremità della tavola con entrambe le mani, i pollici appoggiati sulla parte esterna della tavola e le altre dita su quella interna, e si applica una pressione coi pollici. In questo modo si valuta la rigidità lungo le venature del legno. Il *quinto modo*, infine, è una misura della rigidità attraverso le venature. È chiamato anche “modo ad anello”, perché le linee nodali tendono a chiudersi su sé stesse, come mostrato in figura. Questo accade per il fondo, mentre per la tavola armonica le linee rimangono aperte ai lati. In entrambi i casi la vibrazione massima è al centro della tavola.

Quando si batte una tavola tenendola sollevata con una mano, il suono che viene prodotto è il risultato della combinazione di tutte le risonanze. Queste risonanze vengono percepite con diversa intensità, a seconda di che punto venga battuto e che punto venga tenuto fermo. Più precisamente la frequenza di un modo risalta maggiormente su quelle degli altri modi se il punto di presa si trova sulla sua linea nodale e il punto di battito in corrispondenza di un suo antinodo. Nell'accordatura delle tavole è conveniente utilizzare come punto di presa l'intersezione fra la linea nodale del modo 2 e quella del modo 5. In questo modo si otterrà un suono più chiaro e pieno, in quanto entrambi i modi 2 e 5 non vengono bloccati in un punto di vibrazione. L'intensità dei due modi varia comunque a seconda del punto di battito: se si batte al centro della tavola si sentirà di più il modo 5, se si batte in corrispondenza delle estremità superiore o inferiore invece il modo 2.



Schematizzazione delle linee nodali dei tre modi principali, il primo, il secondo e il quinto, per tavola e fondo di un violino (tavola in alto e fondo in basso). Sono segnate le frequenze relative e le note a cui corrispondono. Sono evidenziate inoltre alcune misure in mm come riferimento. (E. Jansson, *Acoustic for violin and guitar makers*, pubblicazione online di KTH-TMH, 2002, cap. 5, p. 20)

#### 4.4 Accordatura delle tavole armoniche

Lo studio delle risonanze di una tavola libera è molto complicato, in quanto bisogna tener conto di numerosi parametri diversi che influenzano ciascuno a modo proprio i modi di vibrazione. Il comportamento vibratorio diventa però ancora più complesso quando le varie parti vengono montate per formare lo strumento finito. In questo caso i parametri da considerare sono molti di più di quelli della tavola libera. Sono presenti infatti accoppiamenti fra le risonanze delle due tavole, con quelle delle fasce, dell'anima, della catena e delle altre parti dello strumento, oltre che all'accoppiamento fra la risonanza del legno della cassa e la risonanza dell'aria.

**Metodo di lavoro di C. Hutchins.** Nel 1950 Carleen Hutchins, liutaio, e Frederik Saunders, fisico, iniziarono una serie di studi sulle risonanze delle tavole armoniche libere, cercando di spiegare in particolare in che modo queste fossero legate alle risonanze dell'intero strumento, oltre che alle sue caratteristiche timbriche. Per fare questo applicarono sia il metodo di Chladni, sia i più moderni metodi di interferometria olografica e analisi in tempo reale su circa 160 strumenti, sia antichi che costruiti apposta per gli esperimenti. Hutchins e Saunders confermarono il risultato principale di Savart, e cioè che spesso a una buona qualità timbrica di uno strumento corrisponde una differenza di un tono o un semitono fra piano armonico e fondo. Queste frequenze dei toni principali però possono variare molto da strumento a strumento, e non necessariamente il tono del fondo ha frequenza più bassa di quello del piano. Trovarono inoltre una grande quantità di eccezioni, per le quali le caratteristiche timbriche e di prestazioni a strumento finito si allontanavano di molto rispetto alle previsioni, ovvero avevano caratteristiche molto migliori o molto peggiori di quelle previste. Il metodo usato dalla Hutchins consisteva nel costruire violini di tutte le dimensioni: lavorare e analizzare tavole armoniche, montare gli strumenti e verificare la loro qualità, poi in molti casi smontare gli strumenti appena costruiti per modificare le tavole armoniche, e poi rimontarle e osservare i cambiamenti. Oltre a questo analizzò numerosi violini di altri liutai, sia antichi che moderni. Per quanto riguarda i violini antichi, è molto difficile trovare esemplari originali che non abbiano subito delle modifiche. Molti di questi, essendosi rovinati nel tempo, sono stati riparati sostituendo completamente alcune parti, quindi è raro trovare strumenti che conservino sia tavola che fondo originali. Carleen Hutchins ebbe la possibilità di studiare comunque due violini che presentavano entrambe le tavole originali: uno Stradivari del 1713 e un Guarneri del Gesù del 1737. Anche in questo caso però, come per la maggior parte degli strumenti costruiti prima del 1800, pur conservando le due tavole, i due violini avevano subito pesanti modifiche. Nel corso dei secoli infatti, per poter stare al passo con le nuove esigenze dei compositori riguardanti timbro e potenza sonora degli strumenti, si è reso necessario attuare modifiche rispetto agli strumenti utilizzati in epoca barocca, caratterizzati da un suono più morbido e dolce. Queste modifiche sono, per esempio, l'allungamento del manico, una maggiore angolatura della tastiera, il ponticello più alto e la catena più pesante, oltre a una variazione degli spessori della cassa.

**Criteri di accordatura delle tavole.** Per ciascun modo di ogni tavola Hutchins e Saunders controllavano frequenza, ampiezza, fattore di qualità e linee nodali, e, attraverso la loro lavorazione, cercavano di arrivare a precise relazioni fra grandezze corrispondenti nei due piani armonici. Dello strumento finito si valutavano la curva di intensità e le qualità sonore. Analizzando i risultati di più di 800 prove, arrivarono alle seguenti scoperte:

- 1) a uno strumento di buona qualità corrisponde un modo 5 di ampiezza relativamente larga; le sue frequenze della tavola armonica e del fondo si trovano a una distanza minore di un tono. Se la frequenza del piano armonico è più alta rispetto a quella del fondo il timbro risulta più brillante, viceversa più cupo;
- 2) quando la differenza fra le due frequenze del modo 2 di tavola e fondo è minore del 1.4% (circa 5 Hz per violino e viola) rispetto alla frequenza del modo 2 nel fondo, si hanno prestazioni più agili e armoniose;
- 3) se la frequenza del modo 5 è uguale nei due piani armonici, si avrà uno strumento difficile da suonare e caratterizzato da un timbro aspro se la frequenza del modo 2 nella tavola armonica differisce per più dell'1.4% da quella del fondo;
- 4) si sono ottenuti violini di qualità eccezionale quando i modi 2 e 5 si trovano approssimativamente a distanza di un'ottava in ciascun piano armonico e a frequenze corrispondenti, con grande ampiezza, in entrambi i piani;
- 5) per perfezionare la situazione descritta nel punto precedente, si può fare in modo che la frequenza del modo 1 si trovi un'ottava sotto di quella del modo 2, così che i modi 1, 2 e 5 siano una serie armonica; ciò è di difficile realizzazione nella tavola armonica, è invece impossibile che si verifichi nel fondo.

#### 4.5 Difficoltà pratiche nella regolazione dei modi

Non sempre è possibile ottenere facilmente le condizioni ideali di accordatura descritte sopra. Ci sono infatti vari fattori che ne ostacolano la realizzazione: un limite all'assottigliamento delle tavole; gli effetti dell'isolante e della vernice; le variazioni dell'umidità e della temperatura; alcune proprietà fisiche del legno.

I problemi relativi allo *spessore* si verificano perché ventri e nodi di modi diversi si trovano in posizioni differenti. Come detto in precedenza, linee nodali e frequenze di risonanza possono essere variate a seconda di dove si assottiglia il legno. È facile dunque, mentre si cerca di modificare la frequenza di un modo, condizionare involontariamente anche quella di un altro. Per questo risulta molto difficile far coincidere tutte le risonanze dei tre modi principali con i valori desiderati.

Gli effetti dei rivestimenti, *isolanti* e *vernici*, sono di aggiungere massa alla cassa, aumentare la rigidità delle fibre più esterne e aumentare lo smorzamento. Le modifiche su rigidità e smorzamento sono diverse per tavola e fondo: infatti più basso è il modulo di Young più evidenti sono questi effetti, e l'acero e l'abete hanno modulo di Young diverso. In particolare l'acero è due volte e mezzo più rigido dell'abete nella venatura trasversale, quindi i rivestimenti tendono a scordare molto di più la tavola del fondo. Per compensare questo effetto si cerca di prevedere di quanto verranno scordati i piani. Per esempio, se lo scopo è avere la frequenza del modo 2 uguale fra tavola e fondo, si cerca di lasciare (nel caso del violino o della viola) la frequenza della tavola dai 5 ai 10 Hz minore di quella del fondo quando lo strumento è ancora "in bianco", ovvero senza rivestimenti. John Schelleng studiò le proprietà delle vernici, e dimostrò che le loro proprietà acustiche continuano a cambiare per oltre due anni dalla creazione dello strumento. È per questo che c'è bisogno di alcuni anni prima che il timbro dello strumento si assesti. In generale, una vernice dura e vetrosa irrigidisce il suono e lo rende più freddo, poiché irrigidisce il legno della cassa; una vernice soffice ed elastica, invece, non ne riduce la capacità di vibrazione. L'utilità della vernice è quella di proteggere il legno dai cambiamenti di temperatura e umidità: il legno infatti è un materiale

igroscopico, perde e assorbe acqua molto velocemente; l'isolante e la vernice hanno la funzione di ritardare di molto questo processo.

Tuttavia, anche in presenza di buoni rivestimenti, lo strumento risente molto delle variazioni di umidità e temperatura e, in generale, suona meglio nelle stesse condizioni in cui viene costruito. Un legno vecchio, secondo un esperimento di Robert Fryxell, assorbe acqua molto più lentamente (in vari mesi) di un legno giovane, anche se entrambi la perdono velocemente (qualche ora). L'acero, inoltre, risente maggiormente dei cambiamenti di umidità rispetto all'abete rosso.

#### 4.6 Risonanza dell'aria

Oltre alla risonanza della cassa armonica, bisogna tener conto, nella costruzione di uno strumento, anche dei modi di vibrazione dell'aria. Questa, come qualsiasi materiale, è caratterizzata da particolari frequenze di risonanza, che sono legate direttamente alle dimensioni e alla forma della cassa e dei fori a *effe*. Il legno, vibrando, mette in oscillazione l'aria circostante attraverso variazioni di pressione; questo accade sia per l'aria interna alla cassa sia per quella esterna. La perturbazione si propaga poi fino all'orecchio dell'ascoltatore che la percepisce sotto forma di suono. In particolare, l'aria contenuta all'interno oscilla dentro e fuori lo strumento attraverso i fori a *effe* e la risonanza dell'aria risultante è dovuta all'intreccio di accoppiamenti fra i modi vibrazionali della cassa e quelli propri dell'aria. Ciò può comportare la presenza di più di un modo di risonanza dell'aria. Questa ha, nell'emissione del suono, il ruolo di rinforzare il registro basso dello strumento, che sarebbe altrimenti troppo debole. Nel caso del violino si cerca di far cadere la risonanza dell'aria (senza tener conto degli accoppiamenti) attorno al valore di 280 Hz, che corrisponde approssimativamente al  $re_4$ . Questo ha l'effetto di esaltare il suono della corda vuota *re* e delle note adiacenti. Il contributo dei fori a *effe* è significativo nel caso del violino e della viola, ma diventa trascurabile negli strumenti più grandi, come il violoncello.

#### 4.7 Vibrazione della cassa armonica

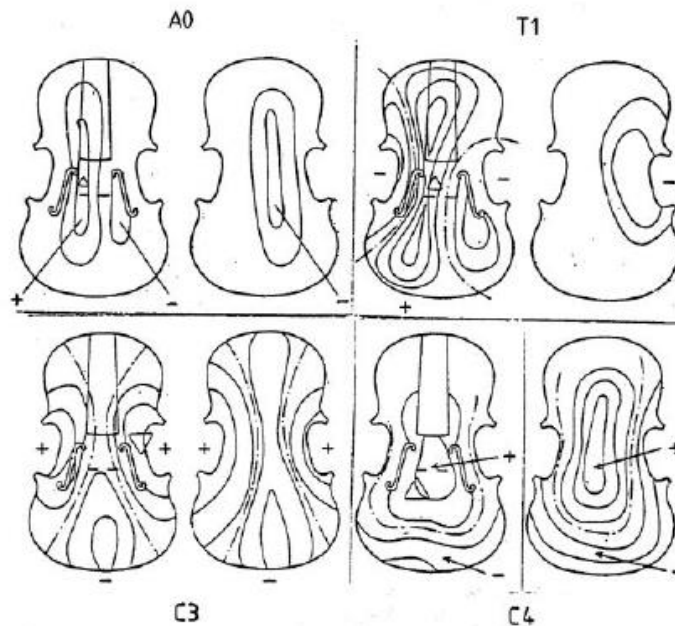
Come già detto, è molto più complicato descrivere il comportamento fisico dello strumento finito, quando è messo in vibrazione, rispetto a quello delle tavole libere, perché intervengono una serie di accoppiamenti fra le varie parti del legno e fra legno e aria. Lo strumento viene messo in vibrazione tramite l'azione dell'arco sulle corde, o del dito se la corda viene pizzicata. La corda, vibrando, applica una forza sul ponticello che viene messo a sua volta in vibrazione e trasmette la perturbazione alla tavola armonica. Questa poi viene trasmessa all'anima, al fondo, alle altre parti dello strumento e all'aria circostante. La cassa armonica sia funge da amplificatore delle risonanze delle corde, che determinano la nota fondamentale che sentiamo, sia ha delle risonanze proprie, che contribuiscono principalmente a caratterizzare il timbro dello strumento.

**Risonanze principali.** La figura, risultato di uno studio di Alonso Moral e Jansson, mostra le configurazioni di vibrazione per le risonanze A0, T1, C3 e C4. A0 corrisponde alla risonanza dell'aria contenuta nella cassa, T1 è la risonanza fondamentale della tavola e C3 e C4 sono la terza e la quarta risonanza dell'intera cassa. L'esperimento, eseguito su 25 violini di alta qualità, è fatto collegando ad un particolare punto della cassa vicino alla catena un vibratore elettrico, e mappando il moto di tutti gli altri punti della cassa tramite un accelerometro. Si è visto che i quattro modi citati sopra sono i principali per

lo studio delle vibrazioni in quanto sono quelli di intensità più alta rispetto agli altri e a cui si fa maggiore riferimento per una valutazione qualitativa dello strumento. Per le prime due risonanze si possono osservare tre effetti principali:

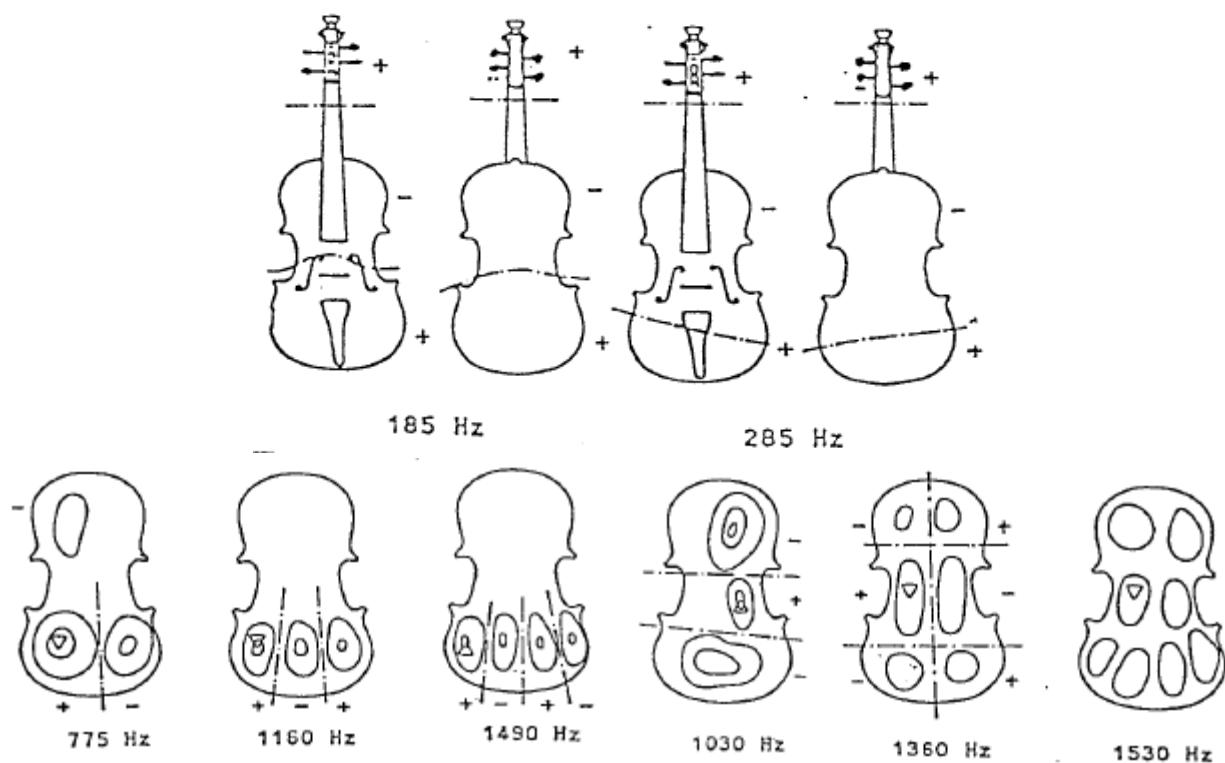
- a) la vibrazione è concentrata nella parte sinistra della cassa, guardando lo strumento dalla parte della tavola, soprattutto in corrispondenza del piedino sinistro del ponticello e lungo la catena;
- b) attraverso l'anima passa una linea nodale, poiché questa funge da supporto per la tavola;
- c) la vibrazione ha massima ampiezza in corrispondenza del foro a *effe* sinistro.

Alla risonanza A0, che rinforza il suono del violino nelle frequenze basse, il movimento della massa d'aria è massimo. Questo perché le due tavole si muovono allo stesso modo, ad un istante si allontanano l'una dall'altra e all'istante dopo si avvicinano. Alla frequenza T1, invece, la tavola armonica vibra molto più intensamente del fondo. Le altre risonanze che contribuiscono ad arricchire il suono sono le due più basse, C1 e C2, e numerose altre più alte.



Configurazioni nodali dei modi A0 (175 Hz), T1 (460 Hz), C3 (530 Hz) e C4 (700 Hz), visti sia sulla tavola sia sul fondo. I triangolini indicano il punto in cui il vibratore elettrico stimola la vibrazione, le linee nodali corrispondono alle linee tratteggiate, il segno + indica che la vibrazione è in fase rispetto a quella del vibratore, mentre il segno - che è in opposizione di fase. (J. Alonso Moral, "From properties of free top plates, of free back plates and of ribs to properties of assembled violins", *STL-QPSR journal*, vol. 25, n. 1, 1984, pp. 1-29, p. 5)

Alle due risonanze più basse diventa importante anche il contributo di altre parti dello strumento. Per la prima gli antinodi si trovano in corrispondenza della cordiera e del riccio, oltre che della zona centrale. Le linee nodali sono due, una all'altezza del ponticello e parallela ad esso, l'altra vicino al capotasto e a sua volta parallela a questo. La seconda risonanza ha una configurazione simile, però con antinodo il manico. Le configurazioni di risonanza più alte, invece, presentano varie combinazioni di antinodi.



Configurazioni nodali per C1 e C2 nella parte superiore e per le risonanze con frequenza più alta nella parte inferiore.  
(E. Jansson, *Acoustic for violin and guitar makers*, pubblicazione online di KTH-TMH, 2002, cap. 7, p. 8)

## 5. STRUMENTO COMPLETO

### 5.1 Influenza delle singole parti sullo strumento concluso

**Tavola, fondo e fasce.** Nel 1984 Alonso Moral pubblicò i risultati di un esperimento che aveva lo scopo di capire in che modo le diverse parti che formano la cassa influenzino la vibrazione dello strumento finito. Utilizzò tre tavole armoniche, tre fondi e tre set di fasce, ognuno dei tre gruppi con tre tipi di legno diverso, uno morbido, uno rigido e uno con caratteristiche intermedie. Montando i vari pezzi in modo da avere diverse combinazioni dei vari legni, ottenne 12 violini, e poté valutare la diversa influenza di tavola, fondo e fasce sullo strumento concluso. Per rappresentare le proprietà delle tavole libere fece riferimento alla frequenza e all'intensità del modo 5; studiò quindi cambiamenti nelle risonanze dello strumento finito in funzione delle variazioni del modo 5 delle singole parti. Ne ricavò che l'influenza delle fasce è minima in confronto a quella del fondo e della tavola e che quest'ultima è la parte che più condiziona le risonanze dello strumento. Alonso Moral considerò in particolare frequenze e intensità delle risonanze A0, T1, C3 e C4 dello strumento completo.

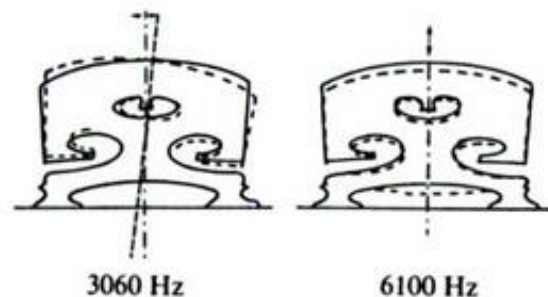
La correlazione fra la frequenza di A0 e le frequenze sia della tavola che del fondo è minima, mentre c'è una forte dipendenza fra le intensità, soprattutto con quella della tavola armonica. All'aumentare dell'intensità del modo 5 della tavola, aumenta anche quella di A0, all'aumentare dell'intensità nel fondo, invece, quella di A0 diminuisce. Per quanto riguarda T1, sia la sua frequenza che la sua intensità sono fortemente correlate rispettivamente con la frequenza e l'intensità della tavola, in proporzionalità diretta.

Non c'è alcuna dipendenza con le caratteristiche del fondo. Esiste una buona correlazione, anche se non tanto alta quanto fra T1 e la tavola armonica, fra le frequenze di entrambe C3 e C4 relativamente sia alla frequenza della tavola che a quella del fondo.

Per quanto riguarda le intensità, la correlazione è particolarmente forte fra C4 e la risonanza del fondo, quella fra C3 e C4 con la tavola è di entità moderata mentre la relazione intensità di C3 e intensità della frequenza del fondo è di proporzionalità inversa. L'influenza delle fasce, come già detto, è molto minore di quelle delle due tavole. All'aumentare dello spessore delle fasce le frequenze di A0, C3 e C4 aumentano, mentre diminuisce quella di T1. Per quanto riguarda le intensità, invece, si verifica il contrario. Le frequenze di C3 e C4 sono quelle che risentono maggiormente della variazione in spessore delle fasce, A0 in maniera più moderata e T1 ancora meno. La variazione di intensità, invece, è maggiore per C3 e T1, un po' meno per C4 ed è nulla per A0.

Considerando qualitativamente l'influenza dello spessore della cassa sul suono, possiamo dire che a spessori forti corrisponde un suono più chiaro, a spessori deboli invece un suono più scuro. Anche la curvatura influenza il timbro dello strumento: se uno strumento ha una cassa molto rigonfia, il suono sarà molto dolce, ma meno potente; se, invece, ha tavole più piatte, il suono sarà più forte e tendente a espandersi. Nel primo caso, quindi, sarà più adatto alla musica da camera, generalmente eseguita in ambienti più piccoli; nel secondo, alla musica sinfonica e soprattutto solistica, dove il suono dello strumentista deve farsi sentire al di sopra di quello dell'orchestra.

**Ponticello.** Il ponticello ha la funzione di trasferire le vibrazioni dalle corde alla tavola armonica. Poggia sulla tavola tramite due *piedini* ed è posizionato all'altezza dei tagli orizzontali dei fori a *effe*. Le risonanze principali del ponticello sono tre: la prima, con frequenza di circa 3000 Hz per il violino, corrisponde all'oscillazione destra-sinistra ed è dovuta all'oscillazione orizzontale della corda. La seconda, di circa 6000 Hz sempre nel caso del violino, corrisponde a un'oscillazione verticale ed è dovuta alla pressione esercitata dalla corda verso il basso. La terza, meno intensa delle altre due, corrisponde al moto del ponticello parallelo alla corda (avanti-indietro guardandolo dalla cordiera). La frequenza di questo modo è pari al doppio rispetto a quella di oscillazione della corda. Il ponticello si accorda togliendo legno alle pareti delle parti vuote al suo interno, per diminuire la frequenza, e togliendo legno ai lati destro e sinistro, per aumentarla. La qualità del ponticello è importante perché influenza in modo determinante il timbro dello strumento. Ciò è dimostrato anche dall'effetto della sordina: una piccola massa di plastica, di legno o di metallo che, se fissata al ponticello, rende il suono dello strumento opaco e di intensità molto più bassa.



Schematizzazione dei movimenti oscillatori delle prime due frequenze di risonanza (Andrea Frova, *Fisica nella musica*, Zanichelli, Torino 1999, p. 282. Preso da uno schema di Reinecke)

**Anima.** La posizione dell'anima è determinante nella definizione del timbro dello strumento. Quando è posta vicino al ponte il timbro è più tagliente, più lontano è più morbido. Se l'anima invece è spostata verso il centro della tavola, il suono diventa scuro, mentre se è più verso il foro a effe di destra diventa più chiaro. Per quanto riguarda le risonanze, la presenza dell'anima rende asimmetriche le linee nodali.

**Fori a effe.** Come già detto, i fori nella cassa armonica permettono l'esistenza della risonanza dell'aria A0 e, per la loro posizione nella tavola armonica all'altezza delle C, permettono alla parte centrale della tavola di muoversi più liberamente. Per questo è preferibile che i fori a *effe* non siano molto ravvicinati, in modo da avere la parte centrale il più possibile estesa. Questa, infatti, è la parte su cui poggia il ponticello, e ha una funzione determinante nella propagazione delle vibrazioni; se è troppo ridotta, la sua capacità di trasmissione è molto minore. Questo indica la loro importanza nella determinazione del timbro. Un esperimento per capire qual è l'influenza della forma dei fori sul suono dello strumento finito, un esperimento venne ideato da Jansson, Niewczyk e Fryden. Questo consiste nel misurare a più riprese le qualità sonore del violino e, prima di ogni misurazione, scavare un pezzo di legno fino a formare le due aperture a effe. I fori furono posizionati nelle fasce. Il risultato fu che la parte verticale del foro, attraverso le venature, ha molta meno influenza che le più piccole parti superiore e inferiore, attraverso le venature.

## 6. QUALITÀ TONALE DEL VIOLINO

Nella valutazione musicale della qualità di uno strumento, si considerano principalmente tre caratteristiche: il volume sonoro, l'uguaglianza e il timbro.

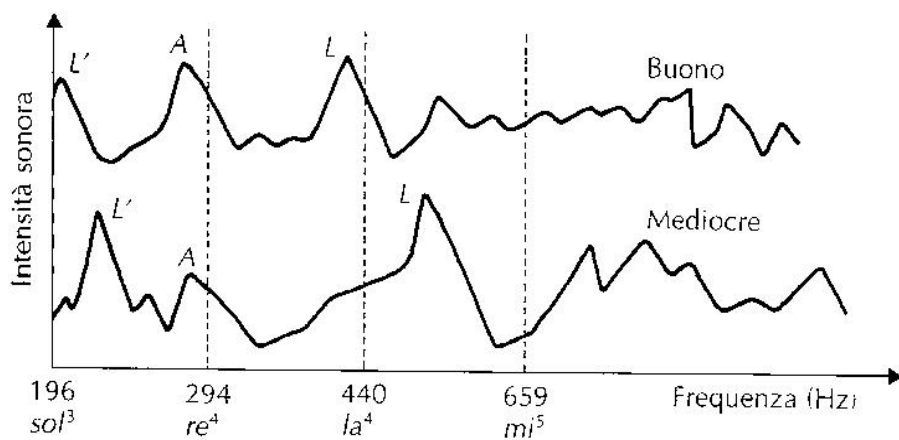
Il *volume sonoro*, grandezza che si può misurare facilmente quantitativamente, indica la "quantità di suono prodotta, il modo in cui si propaga e giunge alle orecchie dell'ascoltatore"<sup>[5]</sup>, collocato a una certa distanza dalla sorgente sonora. Per valutare il volume di suono, la grandezza da misurare è l'ampiezza delle vibrazioni emesse dallo strumento. Questa caratteristica è determinante nella scelta dello strumento, soprattutto nei casi in cui si debba suonare in grandi sale, e farsi sentire da un pubblico numeroso.

L'*uguaglianza* è "la capacità dell'istrumento di emettere suoni di intensità uniforme per tutte le note, a pari pressione dell'arco"<sup>[5]</sup>. È una caratteristica piuttosto rara: infatti quasi tutti gli strumenti presentano delle differenze in intensità al variare dell'altezza delle note, spesso nel cambiare da una corda all'altra, o nel suonare la stessa nota in corde diverse. Queste differenze di volume fra una nota e l'altra, spesso, sono effetti che disturbano l'esecuzione di un brano, e sono dovuti principalmente a difetti nella distribuzione degli spessori nelle tavole.

Il *timbro* è dato dalla sovrapposizione, diversa ad ogni frequenza e per ogni strumento, della nota fondamentale e dei suoni armonici. È una proprietà la cui valutazione dipende solo dal gusto personale dei singoli esecutori o ascoltatori: mentre per il volume e l'uguaglianza sono noti i valori che è preferibile avere, per il timbro non è possibile determinare un criterio oggettivo che indichi delle caratteristiche come migliori di altre. Né tantomeno è possibile prevedere queste caratteristiche o cercare di influenzarle in fase di costruzione.

## Confronto fra violini di diversa epoca e fattura.

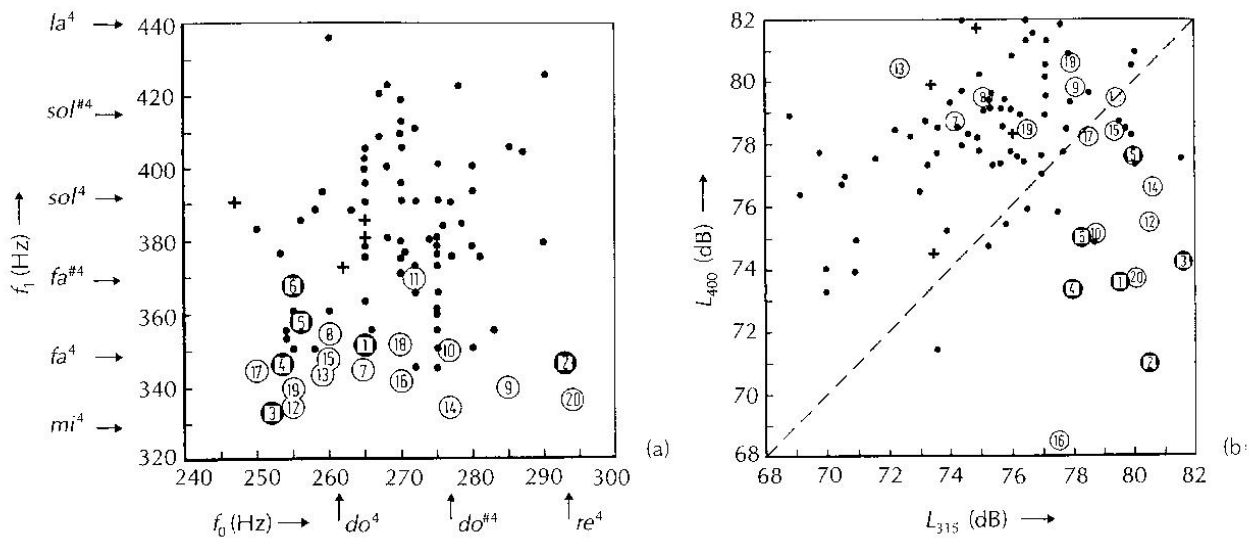
Nel 1937 Frederik Saunders, nell'articolo "The mechanical action of violin", pubblicato nell'*Acoustical Society Journal*, propose un esperimento per studiare la differenza sonora fra violini di qualità e violini scadenti. Egli fece suonare i violini in un range di frequenze che copre tutta la loro tessitura, con ogni nota a distanza di un semitono l'una dall'altra, alla massima intensità eseguibile. Il grafico intensità su frequenza che ne risulta mostra tre picchi principali: uno, identificato con la lettera A, corrispondente alla risonanza dell'aria, la risonanza principale del legno L, e la risonanza L' che ha il primo ipertono coincidente con L. Se confrontiamo il grafico di un violino scadente con quello di un violino di alta qualità, osserviamo che il primo presenta molte più fluttuazioni del secondo. Ciò non vuol dire che meno fluttuazioni ci sono, più il violino è di alta qualità: infatti le differenze di intensità contribuiscono in parte ad arricchire il timbro dello strumento. Quando queste fluttuazioni, però, diventano troppo evidenti, viene meno la qualità dell'omogeneità fra le corde e fra le stesse note suonate in corde diverse, che è una caratteristica che solo gli strumenti di buona qualità possiedono.



Grafico, intensità su frequenza, che pone a confronto due violini, di buona e mediocre qualità. Le frequenze segnate corrispondono alle quattro corde vuote degli strumenti. A è il picco corrispondente alla risonanza dell'aria, L alla risonanza principale del legno, L' alla risonanza che ha primo ipertono coincidente con L. (F. Saunders, "The mechanical action of violin", *Acoustic Society Journal*, 1937, riportato in Andrea Frova, *Fisica nella musica*, Zanichelli, Torino 1999, p. 288)

Nel 1963, alla Conferenza di Acustica Musicale di Stoccolma, Jürgen Meyer presentò alcuni studi che mettevano a confronto un centinaio di violini qualitativamente molto diversi l'uno dall'altro. Di essi, sei erano Stradivari, quattordici di altri liutai italiani antichi, e tutti gli altri di liutai moderni o costruiti in fabbrica. Per ogni violino, misurò la frequenza della risonanza dell'aria e la frequenza della prima risonanza del legno. Poi considerò due bande di frequenza di ampiezza 1/3 di ottava e centrate a 315 e 400 Hz, e ne misurò le intensità. I valori trovati sono mostrati nei due grafici sottostanti. Meyer osservò che tutti i violini italiani antichi avevano una frequenza della risonanza del legno più bassa di quella degli altri violini più recenti o di minor qualità. Per quanto riguarda invece le intensità, si può notare che tredici

strumenti italiani antichi, compresi i sei Stradivari, hanno intensità della banda a 315 Hz più alta di quella a 400 Hz. Quasi tutti gli altri, invece, presentano la caratteristica opposta.



(a) in ascissa la frequenza della risonanza dell'aria  $f_0$ ; in ordinata la frequenza della prima risonanza del legno  $f_1$ . Ogni punto nel grafico corrisponde ai valori che caratterizzano un particolare violino: quelli contrassegnati da numeri da 1 a 6 rappresentano gli Stradivari, quelli da numeri da 7 a 20 i violini italiani antichi. Vediamo che i violini antichi sono concentrati nella parte inferiore del grafico, e presentano tutti un basso valore di  $f_1$ .

(b) in ascissa il livello  $L_{315}$  della banda centrata a 315 Hz; in ordinata il livello  $L_{400}$  della banda centrata a 400 Hz. La linea tratteggiata rappresenta il confine delle due zone, superiore e inferiore, dove l'intensità di emissione è maggiore, rispettivamente, a 400 e a 315 Hz. Quasi tutti i violini moderni e di fabbrica si trovano al di sopra della linea, tredici di quelli antichi, fra cui gli Stradivari, sono al di sotto.

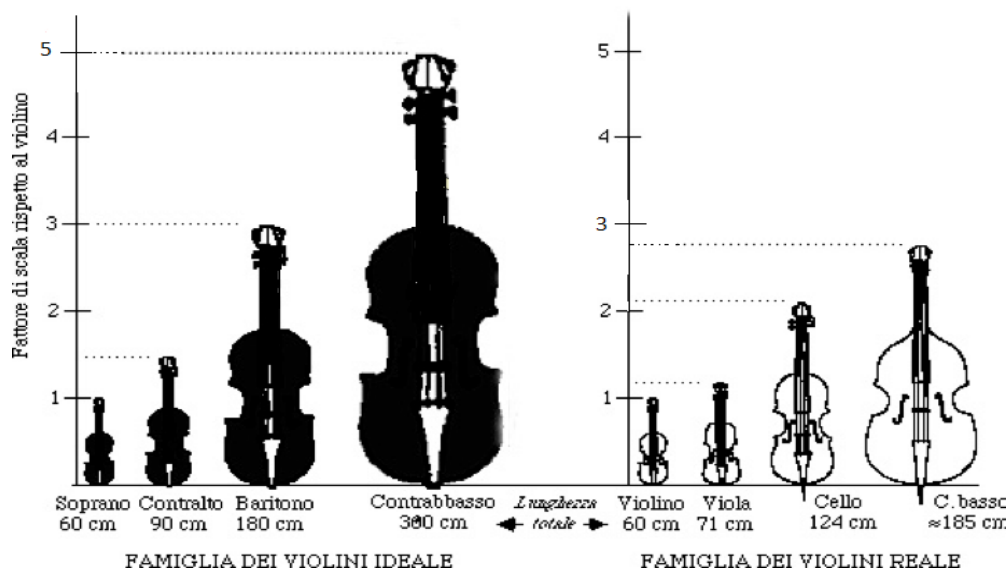
(J. Meyer, "The tonal quality of the violin", *Atti Conferenza SMAC di Stoccolma*, 1983, riportato in Andrea Frova, *Fisica nella musica*, Zanichelli, Torino 1999, p. 306)

È molto difficile confrontare oggettivamente violini antichi e moderni, e capire come quelli antichi erano al momento della loro costruzione. Il legno, infatti, è un materiale "vivo", soggetto a cambiamenti, a seconda delle condizioni a cui viene sottoposto. Se uno strumento viene suonato per molto tempo, le molecole del legno acquistano una maggiore capacità di vibrazione, il timbro acquista colore e lo strumento diventa più facile da suonare, perché risponde più velocemente alle sollecitazioni dell'esecutore. È anche per questo che, spesso, i violini antichi sono considerati di qualità di gran lunga superiore a qualsiasi strumento moderno: perché hanno una ricchezza di timbro e una duttilità nell'essere suonati che è il frutto di secoli di assuefazione alla vibrazione e all'emissione del suono. Perciò è impossibile avere un confronto oggettivo sulla qualità di costruzione, anche se ovviamente si può indagare sulle differenze attuali degli strumenti. È possibile però che, col passare degli anni, i violini moderni assumano alcune caratteristiche che ora non hanno e che sono tipiche degli strumenti antichi.

## 7. DIMENSIONI E TESSITURA DEGLI STRUMENTI AD ARCO

La struttura degli strumenti ad arco oggi usati, violino, viola, violoncello e contrabbasso, è arrivata alla forma attuale tramite una serie di cambiamenti e sperimentazioni nel corso di vari secoli. Già nel XVII secolo si giunse al perfezionamento della struttura del violino (anche se verranno fatte modifiche fino all'ottocento), ad opera soprattutto dei liutai delle famiglie Amati, Stradivari e Guarneri, i maggiori rappresentanti delle scuole di liuteria cremonese e bresciana.

Il suono così ricco e brillante del violino è il risultato della combinazione delle risonanze proprie della cassa e quelle delle corde: è fondamentale, quindi, il rapporto fra le dimensioni della cassa armonica e la tessitura dello strumento. I tre strumenti più gravi quindi dovrebbero mantenere gli stessi rapporti di scala del violino e, in particolare, le dimensioni dovrebbero aumentare tanto quanto le frequenze coperte dalla tessitura si abbassano. Avendo il violino una lunghezza totale di circa 60 cm, la viola, accordata una quinta sotto, dovrebbe essere lunga circa 1.5 volte il violino, ovvero 90 cm. La lunghezza del violoncello, che è accordato un'ottava sotto la viola, dovrebbe essere 3 volte quella del violino, 180 cm. Quella del contrabbasso 5 volte, 290 cm. Strumenti di tali dimensioni sono però impossibili da suonare, e le lunghezze di viole, violoncelli e contrabbassi reali sono rispettivamente 70-75 cm, 130 cm e 170 cm. Per compensare gli inconvenienti dovuti alle minori dimensioni delle casse, i liutai hanno adottato altri accorgimenti per aumentare l'inerzia della cassa, quali la modifica degli spessori e della forma di tavole e fasce. Per lo stesso motivo anche le corde sono state rese più grosse e pesanti. In particolare per la viola, nel corso dei secoli sono stati fatti molti esperimenti per migliorarne il timbro ed è anche per questo che adesso, fra i quattro archi, è l'unico strumento che non ha dimensioni standard. Nonostante i compromessi adottati abbiano portato a dimensioni e frequenze ben equilibrate, i tre strumenti più gravi non sono delle copie esatte del violino trasportate a diverse tessiture. Ciascuno di loro, infatti, ha un particolare timbro che lo caratterizza e lo distingue dagli altri.



Confronto fra le lunghezze reali di violino, viola, violoncello e contrabbasso, e le dimensioni ideali.

(Andrea Frova, *Armonia celeste e dodecafonica*, BUR, Milano 2006, p. 177)

Negli anni 60, C. Hutchins e F. Saunders, con la collaborazione del compositore Henry Brant, oltre ai vari strumenti sperimentali utilizzati nei loro studi, proposero e costruirono una nuova famiglia di strumenti ad arco. Questa nuova famiglia è chiamata “ottetto di violini” ed è composta da otto strumenti tutti di diverse dimensioni e accordature. L’idea di costruire questi strumenti sperimentali nacque proprio dall’esigenza di avere strumenti ad arco che, a qualsiasi tessitura, avessero tutti un suono ricco e brillante come quello del violino e omogeneo fra i diversi strumenti. Prendendo come riferimento il violino, che venne chiamato mezzosoprano e in parte modificato, due degli strumenti, il violino soprano e il sopranino, hanno accordatura più alta e dimensioni più piccole. Gli altri cinque strumenti sono i violini contralto, tenore, baritono, basso piccolo e basso grande, ordinati secondo tessitura più grave e dimensioni crescenti. In quanto ad accordatura, gli strumenti corrispondenti a violino, viola, violoncello e contrabbasso sono rispettivamente mezzosoprano, contralto, baritono e basso grande, che hanno però dimensioni maggiori dei primi. Proprio per la maggiore dimensione, già il violino contralto si suona verticalmente come il violoncello. Nonostante soprattutto alcuni di essi, come i violini contralto e baritono, abbiano un timbro molto ricco, questi strumenti non sono attualmente usati in ambito concertistico ma solo a scopo di ricerca. Ciò è dovuto principalmente al fatto che i nuovi strumenti hanno timbri molto simili, mentre quelli dei classici sono molto diversi fra loro. È proprio su questa diversità di timbri che i compositori si sono basati per scrivere le loro musiche, che suonate con i nuovi strumenti avrebbero un effetto molto diverso.

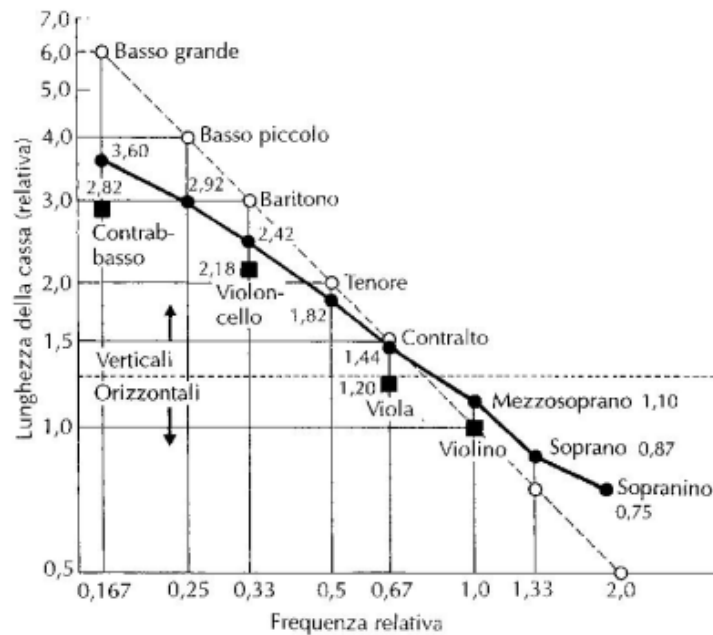


Grafico che mette a confronto le lunghezze degli strumenti ad arco classici e dei “violini” appartenenti all’ottetto di C. Hutchins, con le dimensioni ideali che tali strumenti dovrebbero avere a una data accordatura. Sull’asse delle ordinate è mostrata la lunghezza degli strumenti, considerata in proporzione a quella del violino, posta uguale a 1. Sull’asse delle ascisse è mostrata la frequenza di accordatura della prima corda, presa, come per la lunghezza, in riferimento a quella del violino (posta anche qui uguale a 1). Entrambe le scale sono logaritmiche. I cerchietti bianchi corrispondono agli strumenti ideali, di dimensioni e accordature scalati idealmente sul violino; i cerchietti neri corrispondono all’ottetto di violini; i quadratini neri, invece, corrispondono ai quattro strumenti classici. (Andrea Frova, *Fisica nella musica*, Zanichelli, Torino 1999, p. 292. Grafico originario di un lavoro di Hutchins, modificato in seguito da Fletcher e Rossing e poi da Frova)

## 8. CONCLUSIONE

Abbiamo visto che nello studio del meccanismo di vibrazione di un qualsiasi strumento ad arco bisogna tener conto di un gran numero di parametri. Infatti, nonostante gli studi che sono stati fatti negli anni passati, e che ancora si stanno facendo, durante la fase di costruzione non è possibile prevedere con precisione il comportamento vibratorio dello strumento finito. Ancora non sono chiari i meccanismi di accoppiamento fra le numerose risonanze dei vari pezzi che compongono lo strumento, anche se si è riusciti a collegare sperimentalmente alcune caratteristiche di quest'ultimo con grandezze fisiche delle singole parti. Attualmente sono vari i gruppi di ricerca che si occupano di studiare e fare esperimenti sugli strumenti ad arco. Fra questi ricordiamo la *Catgut Acoustical Society*, fondata nel 1963 da C. Hutchins, F. Saunders, J. Shelleng e R. Fryxell, che si propone di incrementare e diffondere la conoscenza dell'acustica musicale, in particolare degli strumenti ad arco, e promuovere le sue applicazioni pratiche. La CAT, dalla sua fondazione, pubblica le sue ricerche due volte l'anno e attualmente conta circa 800 membri. Dal 2004 fa parte della *Violin Society of America*, a cui appartengono anche numerosi liutai che utilizzano i moderni strumenti di ricerca acustica nel loro lavoro di costruzione, e presentano i loro risultati sperimentali agli incontri annuali della VSA. Un altro gruppo di ricerca, che iniziò i suoi studi sui violini e l'arco una quarantina di anni fa, è quello svedese della Royal Institute of Technology KTH, con sede a Stoccolma. Di esso fanno parte per esempio E. Jansson e A. Askenfeldt. In Australia, un gruppo che si occupa dell'acustica degli strumenti musicali in generale è quello della *New South Wales University* di Sidney. Fra gli altri, due importanti collaboratori per le attuali ricerche sugli strumenti ad arco sono J. Woodhouse di Cambridge in Inghilterra, e G. Bissinger della *East Carolina University* negli USA.

## GLOSSARIO ESSENZIALE DI ALCUNI TERMINI MUSICALI

1) **INTERVALLO**: distanza in altezza fra due note. L'unità di misura della distanza nel nostro sistema di intonazione è il semitono. A seconda della quantità di semitoni che si possono contare fra due note, l'intervallo corrispondente viene chiamato in modi diversi:

*Seconda*: se la differenza fra le due note è di 1 o 2 semitoni (rispettivamente chiamata seconda *minore* o seconda *maggiore*);

*Terza*: se la differenza fra le due note è di 3 o 4 semitoni (rispettivamente chiamata terza *minore* o terza *maggiore*);

*Quarta*: se la differenza fra le due note è di 5 semitoni;

*Quinta*: se la differenza fra le due note è di 7 semitoni;

*Sesta*: se la differenza fra le due note è di 8 o 9 semitoni (rispettivamente chiamata sesta *minore* o sesta *maggiore*);

*Settima*: se la differenza fra le due note è di 10 o 11 semitoni (rispettivamente chiamata settima *minore* o settima *maggiore*);

*Ottava*: se la differenza fra le due note è di 12 semitoni.

Due note a distanza di ottava vengono percepite uguali dal nostro orecchio. Per questo i nomi delle note si ripetono uguali se separate da una distanza di tale lunghezza.

Esistono intervalli che comprendono più di 12 semitoni (chiamati nona, decima, undicesima e così via); questi sono sempre riconducibili agli otto fondamentali, abbassando la nota più acuta di una o più ottave: per esempio, l'intervallo di nona viene chiamato seconda, quello di decima terza, quello di undicesima quarta ecc.

2) **NUMERAZIONE DELLE OTTAVE**: per distinguere due note con lo stesso nome ma di altezza diversa, si segnalano anche con un numero, che indica l'ottava a cui appartengono (di solito si fa riferimento alla tastiera del pianoforte, la cui estensione ricopre più di 7 ottave). Alcuni esempi: *do<sub>3</sub>*, è il do centrale della tastiera, *sol<sub>2</sub>*, *la<sub>5</sub>* ecc.

3) **GRAVE** e **ACUTO**: aggettivi che indicano la posizione in altezza di una nota; per nota *grave* si intende una nota di frequenza bassa, per nota *acuta* una nota di frequenza alta.

4) **TESSITURA**: estensione in frequenza coperta da tutti i possibili suoni emessi da uno strumento.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Andrea Frova, *Fisica nella musica*, Zanichelli, Torino 1999.
- [2] Andrea Frova, *Armonia celeste e dodecafonìa*, BUR, Milano 2006.
- [3] Carleen Maley Hutchins, “L’acustica dei piani armonici di violino”, *Le Scienze*, 1981, n.160, pp. 86-99.
- [4] John C. Shelleng, “La fisica delle corde di violino”, *Le Scienze*, 1974, n.68, pp. 82-90.
- [5] Umberto Azzolina, “La liuteria italiana”, *Le Scienze*, 1970, n.17, pp. 72-84.
- [6] Erik Jansson, *Acoustic for violin and guitar makers*, pubblicazione online di KTH-TMH, 2002.
- [7] Jesus Alonso Moral, “From properties of free top plates, of free back plates and of ribs to properties of assembled violins”, *STL-QPSR journal*, vol. 25, n. 1, 1984, pp.1-29.
- [8] Massimo de Bonfils, *Materiali e suono nel violino*, Musica Nova, Roma 2013.