

Acustica – Musica - Strumenti ad Arco

Lezione del 1 dicembre 2015

1 INTRODUZIONE

L'acustica è la scienza che si occupa di suoni e rumori.

Entrambi sono manifestazioni fisiche del fenomeno della propagazione di vibrazioni (energia elastica) che si trasmettono da un generatore (ad esempio strumento musicale) ad un ricevitore (ad esempio orecchio dell'uomo).

Affinché tale fenomeno avvenga occorre che vi sia un mezzo (aria, legno, acqua, etc.) che funzioni da supporto alla propagazione dell'energia elastica.

In sostanza le onde sono oscillazioni che un sistema vibrante comunica al mezzo di trasmissione (aria) e da esso alla membrana timpanica dell'orecchio umano.

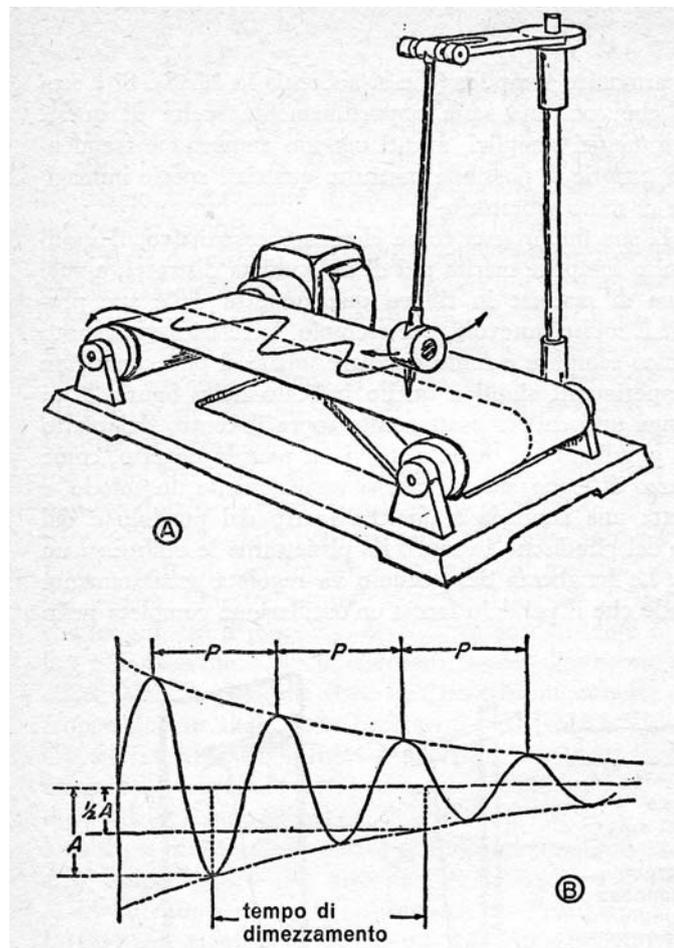


Figura 1 – *Rappresentazione grafica di una onda sinusoidale smorzata. Il pendolo oscilla in direzione perpendicolare al moto del nastro di carta A. Un pennino lascia sulla carta la forma dell'onda prodotta dalle oscillazioni. Le oscillazioni si smorzano per effetto degli attriti e della resistenza dell'aria per cui si registra la sinusoide smorzata B*

2 I CORDOFONI COME GENERATORE DI SUONI

Un violino, ad esempio, è un generatore di suoni musicali in quanto la corda, messa in vibrazione dall'archetto, trasmette l'energia meccanica al corpo dello strumento attraverso il ponticello.

Il corpo dello strumento (la tavola armonica, il fondo, le fasce, etc.) trasmette le vibrazioni all'aria.

Tutte le corde suonate possono emettere le note della scala musicale nell'ambito della tessitura dello strumento stesso.

Tutte le note dovrebbero avere la stessa intensità sonora soggettiva (Loudness).

Se si eccita a vibrare il corpo del violino con un suono sinusoidale "glissando" (frequency sweep) si ottiene una curva di risposta del tipo di **Figura 3**.

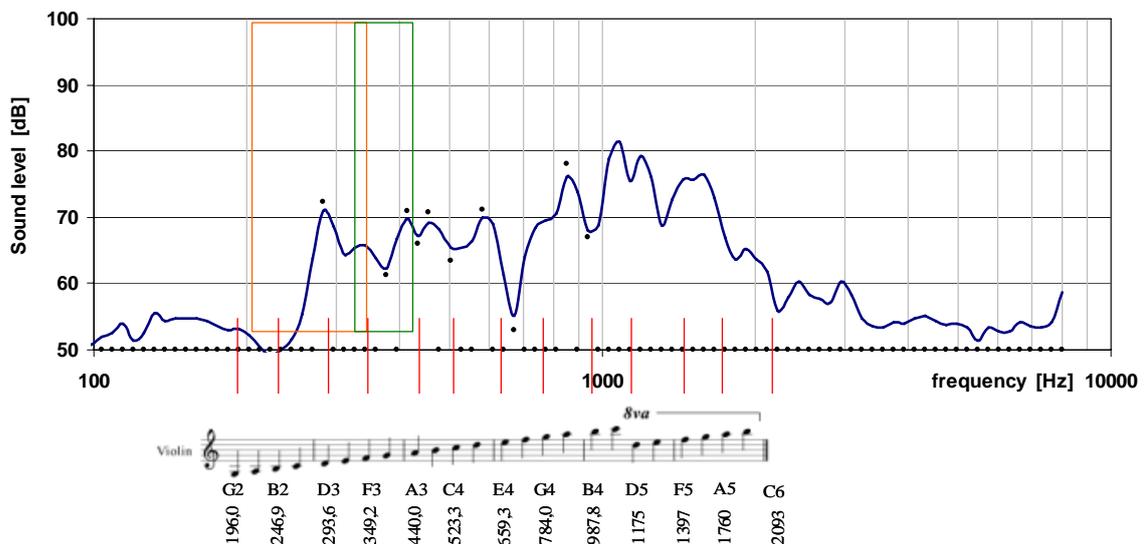


Figura 3 - risposta in frequenza dello strumento ad una eccitazione sinusoidale del ponticello. E' evidente la risonanza del volume della cassa dello strumento e la risonanza della tavola armonica

La curva mostra le risonanze proprie dell'aria contenuta all'interno del violino, le risonanze della tavola armonica, quelle del fondo etc.

È compito del liutaio costruire uno strumento che presenti due principali caratteristiche:

- 1 – suono forte che mantenga il "colore " dello strumento
- 2 –uniformità di livello sonoro o, meglio, intensità soggettiva percepita delle diverse note.

Acusticamente il concetto si traduce nell'avere una curva di Figura 3 più "piatta" o uniforme e collocata più in alto possibile (livelli sonori più elevati).

Così facendo, però, si snatura il suono dello strumento che diventa irriconoscibile.

È l'orecchio del liutaio o del musicista che riconosce la qualità del suono di uno strumento legato anche a numerosi altri fattori quali:

- il transitorio di attacco,
- il timbro espresso sommariamente dalla ampiezza delle armoniche che accompagnano il suono.
- la prontezza di risposta e smorzamento della nota
-

Il risultato finale è l'insieme di fattori che il liutaio deve tener presente durante la costruzione dello strumento.

Molte qualità dei componenti che costituiscono lo strumento possono essere quantificate numericamente attraverso opportune analisi di laboratorio. È prioritario il concetto che le misurazioni siano di facile uso e di rilevante importanza per il liutaio. Purtroppo (o per fortuna) l'acustica sperimentale richiede la conoscenza di alcuni basi teoriche che devono essere conosciute per comprendere la fisica della generazione e propagazione dei suoni degli strumenti musicali.

Un laboratorio sperimentale di acustica a servizio del liutaio deve poter effettuare specifiche misurazioni a supporto delle necessità illustrate nei seguenti capitoli.

3 FISICA

Lo strumento ad arco può essere pensato come un generatore di suoni musicali in quanto essi caratterizzati da una struttura armonica, un transitorio, la possibilità di generare intervalli melodici ed armonici delle note definite nell'ambito di un qualsiasi sistema musicale. Nella pratica il violinista si esercita per mantenere gli intervalli nel sistema occidentale "temperato" a 12 semitoni che costituiscono i gradi di una scala temperata nell'ambito di una ottava.

La fisica del violino riguarda la descrizione del meccanismo in base al quale i suoni vengono generati e trasmessi nell'ambiente di ascolto. Per comprendere ed approfondire tali meccanismi occorre suddividere l'insieme dello strumento in parti singole che vengono assemblate in un corpo unico dal liutaio. Per questo è corretto avanzare teorie ricorrendo ad un modello che si adatti alle esigenze del liutaio man mano che si approfondiscono, in pratica, le diverse conoscenze scaturite dalle sperimentazioni condotte.

Lo strumento suona in quanto il suo corpo è eccitato da forze periodiche e transitorie comunicate ad esso dalle corde poste in vibrazione dall'azione di sfregamento dell'archetto. Atteso che il comportamento fisico dello strumento è complesso in quanto le diverse parti unite non sono indipendenti e si influenzano reciprocamente coinvolgendo anche la struttura fibrosa del legno, occorre evitare discussioni accademiche che non aiutano il liutaio nelle sue attività pratiche volte a realizzare uno strumento di qualità.

Ciò premesso si ritiene di dover descrivere e separare singolarmente il comportamento dei singoli elementi che costituiscono lo strumento percorrendo una delle tante strade che le diverse scuole di liuteria hanno tracciato.

Nella sua rappresentazione modellistica più elementare si può pensare ad un primo modello di funzionamento come rappresentato schematicamente da:

- a) una corda rigidamente vincolata da un lato dal capotasto e dall'altro "quasi vincolata" al ponticello. Mobilità del ponticello.
- b) Un sistema di accoppiamento della corda con la tavola armonica mediante il ponticello (si trascura per ora l'effetto del segmento di corda tra ponticello e cordiera).

- c) Una tavola armonica che può essere pensata come un sistema di “amplificazione per risonanza” del suono generato dalla corda.
- d) Un’anima che rappresenta uno dei sistemi di collegamento meccanico tra tavola armonica e corpo dello strumento (fondo più fasce laterali + manico)
- e) Un insieme di meccanismi secondari, ma non per questo meno importanti, costituiti dalle forme, dai tagli ad *effe*, dalla catena, dagli spessori, dall’elasticità dei materiali, etc. la cui descrizione in questa schematizzazione appesantirebbe il modello elementare descritto.

Si rende necessario descrivere il comportamento di alcuni elementi che costituiscono lo strumento da un punto di vista fisico connesso con l’irraggiamento di energia sonora nello spazio circostante (anche sala da concerto).

Si premette, però, che il suono generato nei solidi e nell’aria si propaga con velocità diverse che dipendono dalle caratteristiche meccaniche dei materiali e dalla loro reazione agli sforzi applicati: compressione e rarefazione per l’aria; compressione, torsione, sforzo di taglio e flessione per i solidi.

Per questo motivo l’onda sonora, portatrice di energia acustica, deve essere pensata come costituita da due grandezze collegate (pressione sonora e velocità di oscillazione della particelle nell’aria; sforzi e deformazioni nei solidi).

3.1 **Corpo solido di dimensioni infinite**

In questa fase non è il caso di addentrarci nelle equazioni che regolano il fenomeno ondoso della propagazione del suono. Si vuole, invece, illustrare il significato di alcune grandezze fisiche legate alla propagazione nell’aria e nei solidi:

- a) la velocità di propagazione della fase di un’onda elastica;
- b) lo smorzamento interno del materiale visto come il decadimento dell’intensità del suono impulsivo generato da un colpo o dissipazione di energia;
- c) le frequenze di risonanza del provino di legno, della tavola etc.

La propagazione dell’onda sonora o vibrazionale è diversa nei fluidi e nei solidi.

Nell’aria, ad esempio, la propagazione del suono è di tipo longitudinale nel senso che la velocità delle particelle del mezzo è parallela alla direzione della propagazione del suono

Figura 4.

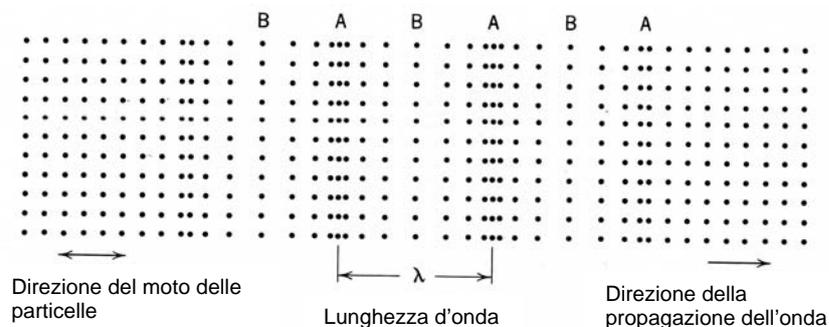


Figura 4 – Modo di propagazione dell’onda longitudinale: le rarefazioni e le compressioni si ripetono nello spazio di una lunghezza d’onda

Nei corpi solidi il moto delle particelle può essere anche perpendicolare alla direzione di propagazione dell'onda sonora. Infatti questi reagiscono elasticamente anche allo sforzo di taglio per cui lo spostamento o il vettore velocità delle particelle può essere perpendicolare alla direzione della propagazione dell'energia meccanica **Figura 5**.

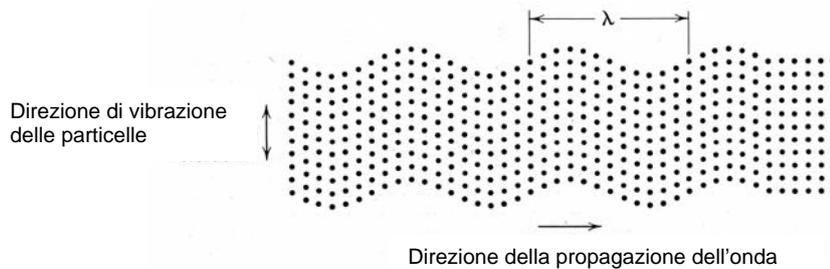


Figura 5 – *Modo di propagazione di un'onda trasversale. Le compressioni e rarefazioni sono sostituite dallo scorrimento nel senso trasversale delle particelle. La lunghezza d'onda si deduce dalla distanza in cui le particelle ritornano nella loro posizione iniziale.*

Nelle piastre sottili si possono formare modi di propagazione diversi ed anche combinati **Figura 6**.

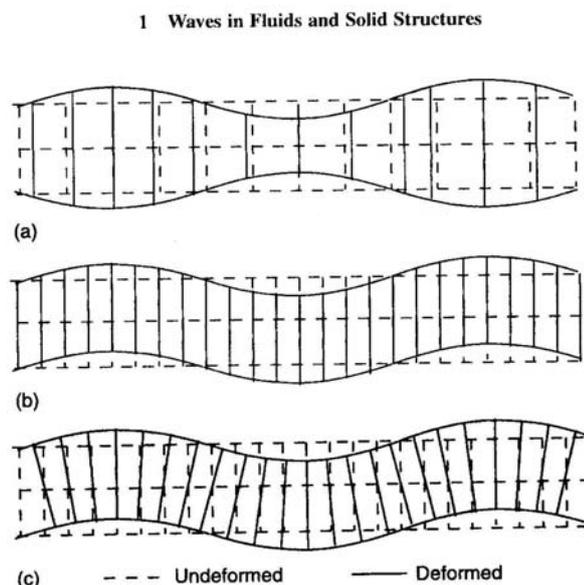


Figura 6 – *modi di propagazione dell'onda in una piastra. a) onda quasi longitudinale; b) onda trasversale o di taglio, c) onda flessionale*

Le tavole dei violini si comportano come membrane per cui il modo di propagazione è quello dell'onda flessionale c). La velocità di propagazione della fase in relazione a ciascun modo di vibrazione è diversa.

La fisica studia le proprietà dei corpi ritenuti omogenei cioè i materiali le cui proprietà elastiche non cambiano con le direzioni. Il legno, invece, ha proprietà elastiche diverse in

relazione al taglio delle tavole in quanto le fibre costituiscono delle discontinuità nella materia omogenea.

Si possono, quindi, definire e quantificare, per gli scopi di liuteria, i seguenti parametri:

1. rigidità del legno rispetto ad una direzione in relazione all'orientamento delle fibre;
2. smorzamento dell'energia interna del materiale;
3. velocità di propagazione del suono rispetto ai modi eccitati.

Si torna su questi argomenti più avanti.

3.2 Le oscillazioni - Il caso delle corde

La corda ha moti di oscillazione perpendicolare al suo asse. Da un punto di vista fisico essa ha una massa distribuita uniformemente sulla sua lunghezza. La corda è vincolata agli estremi, è soggetta ad una tensione iniziale e può essere indotta ad oscillare in due modi:

oscillazioni transitorie in quanto un suo punto viene inizialmente spostato dalla posizione di equilibrio e successivamente rilasciato (es. corda di una chitarra);

oscillazioni forzate in quanto viene esercitata, in un suo punto, una forza continua nel tempo (esempio corda di un violino).

Si può supporre che una corda flessibile non offra resistenza apprezzabile alla flessione ed al taglio e che per spostamenti piccoli la sua tensione resti costante.

In questo caso il primo modo di risonanza corrisponde ad una lunghezza d'onda $\lambda = 2L$ cioè al doppio della lunghezza della corda Figura 7.

La frequenza fondamentale è determinata dividendo la velocità di propagazione a per il doppio della lunghezza della corda. La velocità di propagazione è funzione della tensione S

della corda e della massa per unità di lunghezza ρ_L secondo la relazione $a = \sqrt{\frac{S}{\rho_L}}$.

Le condizioni di vincolo ai due estremi (condizione di spostamento nullo) determinano, quindi,

i primi due nodi che si verificano, in condizioni di risonanza per $f_1 = \frac{a}{2L}$

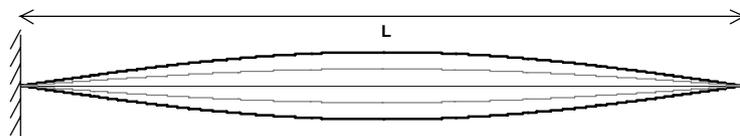


Figura 7 – Primo modo di vibrazione della corda $\frac{\lambda}{2}$;

Il secondo modo di vibrazione, successivo al primo, è quello che genera la seconda armonica. Esso è il suono prodotto dalla corda quando tra i due estremi si innesca una intera lunghezza d'onda λ . In questo caso i punti nodali (spostamento nullo nel tempo) saranno tre: due agli estremi ed uno al centro.

I modi successivi si otterranno per lunghezze d'onda più corte (frequenze più alte o armoniche); operando successive divisioni della lunghezza d'onda $\lambda = 2L$, di modo che tra gli estremi della corda si formino un maggior numero nodi che dividono la lunghezza della corda in parti uguali cioè $L/3$, $L/4$ etc..

Nel caso in cui alla corda sarà imposto di vibrare in tre segmenti di pari lunghezza con un ventre al centro e due ulteriori nodi tra gli estremi si genererà la terza armonica del modo

fondamentale cioè la lunghezza d'onda del suono sarà $\lambda = \frac{2L}{3}$ **Figura 8**

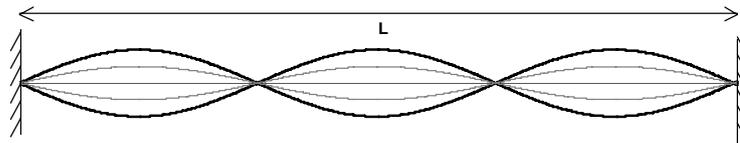


Figura 8 – Modo di risonanza in terza armonica di una corda lunga L .

L'esempio della corda è stato riportato anche per introdurre il concetto degli armonici di un suono fondamentale.

4 CLASSIFICAZIONE E SELEZIONE DEI LEGNI

Per la realizzazione della tavola armonica dello strumento il legno utilizzato viene ricavato dal taglio radiale della pianta di abete rosso e si presenta come da **Foto 1**



Foto 1 – Tavole grezze per la costruzione della tavola armonica di un violino

I parametri meccanici che caratterizzano il legno, da un punto di vista acustico, sono:

Modulo E di Young – espresso dal rapporto tra forza S (stress) per unità di area e la deformazione (strain) come l'allungamento per unità di lunghezza di un'asta. Si esprime in N/m^2 (Newton/ m^2)

Rapporto di Poisson σ - per una barra circolare è il rapporto tra la deformazione trasversali e longitudinali rispetto alla direzione di applicazione del carico. Per un materiale perfettamente isotropo il modulo di Poisson teorico è pari a 0,25. Il valore

massimo che può assumere è invece pari a 0,50. Valori tipici del modulo di Poisson variano fra 0,25 e 0,35. Da determinarsi in relazione all'orientamento delle fibre

La massa volumica del materiale ρ_m in kg/m^3

Il modulo di taglio G rapporto tra lo sforzo di taglio e la deformazione al taglio N/m^2

La rigidità torsionale K – relazione tra torsione (momento torcente) e deformazione al taglio. m^4

Momento d'inerzia polare – m^4

La rigidità a flessione – (bending stiffness) per unità di larghezza $B = Et^3/12$ [$\text{N}\cdot\text{m}$] per una piastra o barra omogenea: t è lo spessore della piastra o barra in direzione della flessione

La velocità di propagazione dell'onda sonora. Dipende dal modo di propagazione e, per un'onda flessionale, in molti casi è funzione della frequenza.

Fattore di perdita η - senza dimensioni, descrive la frazione di energia immagazzinata che è persa in ciascun ciclo espresso in radianti (pag. 439 Beranek). $\eta = 2\zeta$ alla frequenza di risonanza dove $\zeta = C/C_c$ è il rapporto di smorzamento o frazione di smorzamento critico viscoso.

I parametri sopra descritti consentono di caratterizzare pienamente il materiale (legno) e di calcolare la velocità di propagazione del suono.

In pratica per una piastra o barra rettangolare la velocità di propagazione dell'onda è data dalla relazione:

$$c_b = \sqrt[4]{\frac{\omega^2 B}{\rho_s}}$$

legata alla velocità di propagazione di onde longitudinali su piastre di dimensioni infinite. La relazione riportata mette in evidenza la dipendenza della velocità di fase dalla frequenza cioè dalla nota.

4.1 Le misurazioni di acustica sui legni

Tra i parametri elencati risultano importanti, per la scelta del legno, le seguenti misurazioni:

- a) **Misura del fattore di perdita** per la piastra Foto 2. Si può misurare il fattore di perdita sospendendo il materiale e percolendo lo stesso con un martelletto. Si registra la risposta all'impulso e, quindi, si misura il tempo di riverberazione.

Si può utilizzare il criterio dell'appoggio sui coltelli o l'appoggio su blocchetti di materiale morbido Foto 3. Il fattore di perdita $\eta = 2\zeta$ può essere determinato per l'intero corpo del violino se è definito il rapporto tra potenza sonora irradiata e potenza sonora immessa al ponticello. La prima è misurabile in camera anecoica con misura dell'intensità (o pressione in campo libero) sulla superficie di una sfera con raggio superiore ad 1 m. La seconda può essere misurata considerando la parte reale della mobilità $\Re(Y(f))$ dove $Y(f)$ è il rapporto tra velocità e la forza applicata. In analogia con un circuito elettrico di tipo serie la velocità è la tensione applicata ad una rete elettrica, la forza è la corrente nella maglia del circuito vista dai morsetti in cui è

applicata la tensione elettrica V . La parte reale della mobilità è, per analogia, la parte reale dell'impedenza vista ai morsetti del circuito.



Foto 2 – Misura della frequenza di risonanza e del fattore di perdita di una tavola grezza che sarà utilizzata per la realizzazione della tavola armonica del violino..



Foto 3 – La velocità di propagazione dell'onda flessionale si misura attraverso la risposta all'impulso. Un sistema di eccitazione (a sinistra) pone in vibrazione la tavola. Un accelerometro (a destra) rileva le vibrazioni ricavandone la risposta all'impulso. Da essa si deducono le frequenze di risonanza e gli smorzamenti.

b) Misura della velocità di propagazione dell'onda flessionale

Si misura la risposta all'impulso colpendo la tavola sospesa come nella Foto 2 oppure eccitando le vibrazioni flessionali mediante shaker Foto 3. L'accelerometro registra un segnale impulsivo come rappresentato nella **Foto 4**. L'analisi armonica del segnale fornisce le frequenze di risonanza del provino di dimensioni note, il tempo di decadimento fornisce lo smorzamento dell'energia sonora in una determinata banda di frequenze.

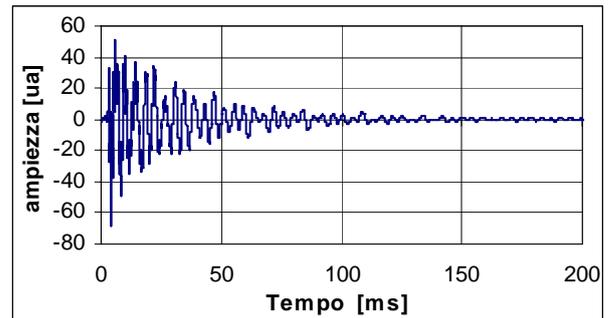
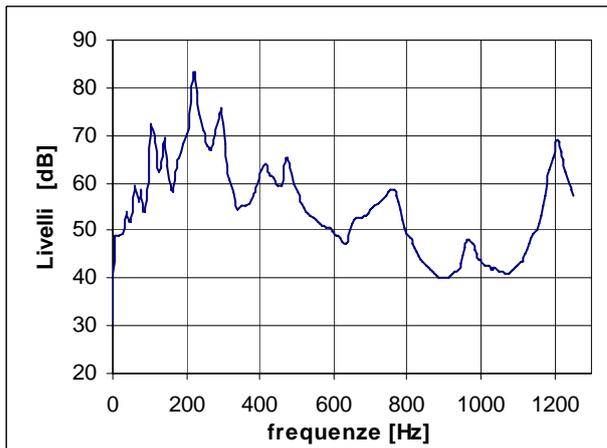
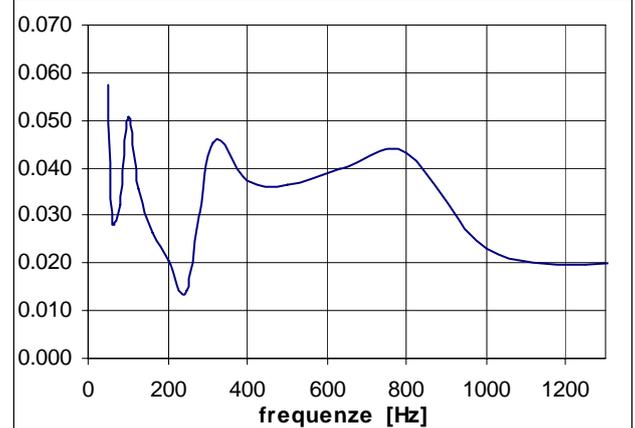


Foto 4 - Sistema di eccitazione e rilevamento delle vibrazioni della tavola

Risposta all'impulso ottenuta impiegando un segnale modulato in frequenza "glissando"



Risposta in frequenza della tavola. Il picco massimo è alla frequenza di 225 Hz



Smorzamento del legno desunto dal decadimento della risposta all'impulso. $\xi = 0.014$

Figura 9 – Misura delle frequenze di risonanza e degli smorzamenti di una tavola grezza prima dell'assemblaggio della tavola armonica

Note le dimensioni della tavola, la sua massa volumica (densità) e le frequenze proprie di risonanza si ricava la velocità di propagazione dell'onda flessionale con la relazione

$$c_b = \sqrt[4]{\frac{\omega^2 B}{\rho_s}} = \sqrt{\omega} \sqrt[4]{\frac{EI}{m}} \quad \text{dove } I \text{ è il momento di inerzia ed } m \text{ la massa del provino.}$$

Approfondimenti sulle tecniche di misurazione dei parametri del legno saranno argomento di una prossima lezione.

5 REALIZZAZIONE E MESSA A PUNTO DELLE TAVOLE

Si costruisce la tavola armonica in più fasi:

- a) sgrossatura ed incollaggio dei legni
- b) finitura esterna superiore (sgusciatura, realizzazione del filetto, delle fessure *ff* etc.
- c) finitura finale con la formazione degli spessori. In questa fase di messa a punto si incolla la catena. Si devono misurare sperimentalmente le frequenze di risonanza o modali della catena, della tavola e della catena + tavola. Occorre misurare anche la rigidità vista dal punto di applicazione della forza per rappresentare staticamente la deformazione propria dei primi modi di oscillazione: (Si veda oltre il modo 1, modo 2 e modo 5).
- d) realizzazione del fondo dello strumento in costruzione e ripetizione delle misure sperimentali della rigidità dei singoli modi.
- e) realizzazione delle Fasce e chiusura del violino.

Le fasi c) e d) richiedono sperimentazioni con idonea strumentazione da assemblare.

Per la determinazione dei modi propri di vibrazione delle tavole armoniche e del fondo si può procedere con due criteri: Utilizzando il metodo classico delle figure di Chladni o applicando le mappature degli spostamenti per ciascuna frequenza di risonanza attraverso la tecnica intensimetrica.

5.1 Le figure di Chladni

Il metodo è più immediato in quanto evidenzia più facilmente i modi di risonanza delle tavole. Occorre realizzare una cassa acustica con un altoparlante Woofer di dimensioni contenute (cassa da progettare per ottenere una risposta significativa alle frequenze da 50 Hz a 1500 Hz). Si utilizza un oscillatore elettronico ad onde sinusoidali collegato ad un frequenzimetro per la misura della frequenza e ad un amplificatore di potenza che alimenta l'altoparlante. La tavola armonica è appoggiata su piccoli blocchetti di gommapiuma opportunamente disposti sul piano ove si apre la fessura circolare dell'altoparlante (punti nodali del modo che si vuole evidenziare). Si cosparge la parte concava della tavola (rivolta verso l'alto) con poca polvere leggera (ad esempio il tè) e si pone in risonanza la tavola variando la frequenza dell'oscillatore. Si ottengono le figure di Chladni il cui impiego è stato ampiamente utilizzato dal liutaio e fisico Carleen Maley Hutchins (Scientific American Oct. 1981 vol. 245 N. 4 – "The Acoustics of Violin Plates") (Figura 10).

Oggi tale metodo semplice ed immediato è utilizzato in molte botteghe di liuteria.

Le particolari forme che si creano variando la frequenza dell'oscillatore sono collegate direttamente ai primi modi di risonanza della tavola.

Il liutaio acquisisce una notevole esperienza nell'interpretare le figure di Chladni che gli consente di poter intervenire sugli spessori per raggiungere le condizioni ottimali che, in gergo, si traducono in una "accordatura della tavola".

Occorre non perdere di vista il problema pratico delle risonanze delle tavole le cui frequenze e curve nodali cambiano a seconda delle condizioni ai vincoli. Nel caso delle tavole la situazione di risonanza cambia quando le stesse vengono assemblate per chiudere la cassa dello strumento.

Le tre fotografie che seguono illustrano il processo di formazione della figura di Chladni relativa al secondo modo di risonanza o modo 2.

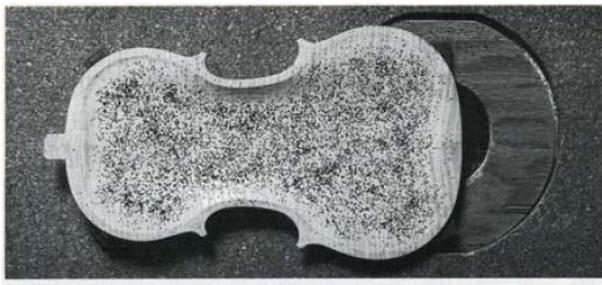
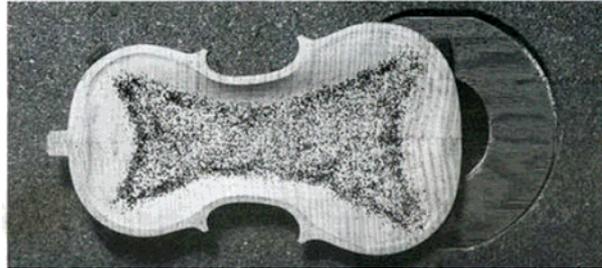
	<p>Si cosparge la tavola con fine polvere quale limatura di alluminio o tè. La polvere è distribuita uniformemente mediante pennello. Si poggia la tavola su 4 tasselli di gommapiuma disposti sul piano della cassa acustica ove è praticata l'apertura circolare dell'altoparlante.</p>
	<p>Si manovra la manopola dell'oscillatore per variare la frequenza sinusoidale d'uscita fino a raggiungere la frequenza che pone in vibrazione la tavola. La precisa risonanza si rileva dal rimbalzo più ampio dei granuli di polvere.</p>
	<p>Si attende che i granuli di polvere scendano e si raggruppino nei punti ove l'ampiezza di oscillazione delle tavole è nulla. Le linee che si formano sono quelle che disegnano le linee nodali di oscillazione: ampiezza della vibrazione nulla</p>

Figura 10 – *Formazione delle curve nodali relative al modo 2 della tavola di fondo di un violino in costruzione (dall'articolo di Hutchins)*

Un diverso modo di indagine con le figure di Chladni e quello di sospendere la tavola armonica ad un vibratore mediante un magnete. I tasselli di gommapiuma hanno la funzione di mantenere in orizzontale la tavola ed il contatto con i bordi è minimo **Foto 5**.



Foto 5 – *Formazione del modo 2 (297 Hz) della tavola armonica mediante eccitazione nel punto di contatto del ponticello. La tavola è sostenuta dal magnete fissato alla bobina mobile dell'eccitatore elettromeccanico*

5.2 *l'analisi dei modi basata su tecniche intensimetriche.*

La tavola armonica è vincolata ad una struttura rigida o sospesa su blocchetti di gommapiuma e viene sottoposta a vibrazione mediante uno shaker. Si ricava la risposta all'impulso con suono sweep **Foto 6** e si determinano le frequenze di risonanza. La frequenza di risonanza, in questo caso, si calcola ricavando lo spettro dell'impulso nel dominio della frequenza. Può essere conveniente eccitare con rumore bianco la tavola e ricavare lo spettro della velocità di vibrazione mediante accelerometro. Il trasduttore, però, carica la tavola e crea spostamenti delle aree di maggior ampiezza di oscillazione.

Tecniche possibili di misura delle velocità di vibrazione della tavola sui nodi di una griglia senza alcun contatto sono quelle che impiegano una sonda ad intensità acustica e quella che impiega un velocimetro laser.

La tavola armonica, come detto, oltre ad essere vincolata rigidamente al supporto può essere appoggiata ad esso mediante tasselli di gommapiuma (libera di vibrare). Si realizzano, in questo modo, due condizioni estreme di vincolo che portano a risonanze diverse. Le fasce laterali del violino creano un vincolo quasi rigido come quello delle fasce laterali dello strumento **Foto 7**.

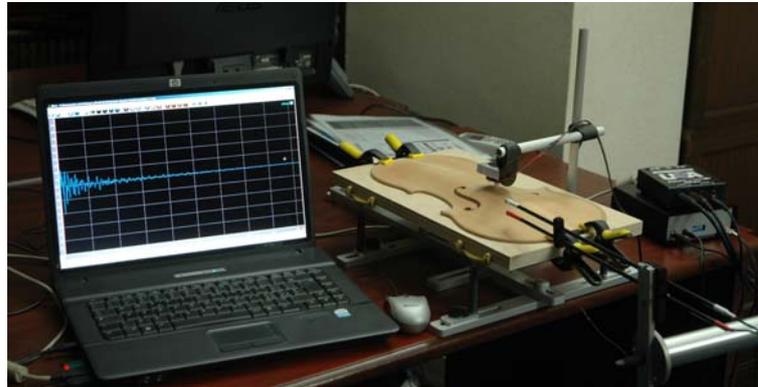
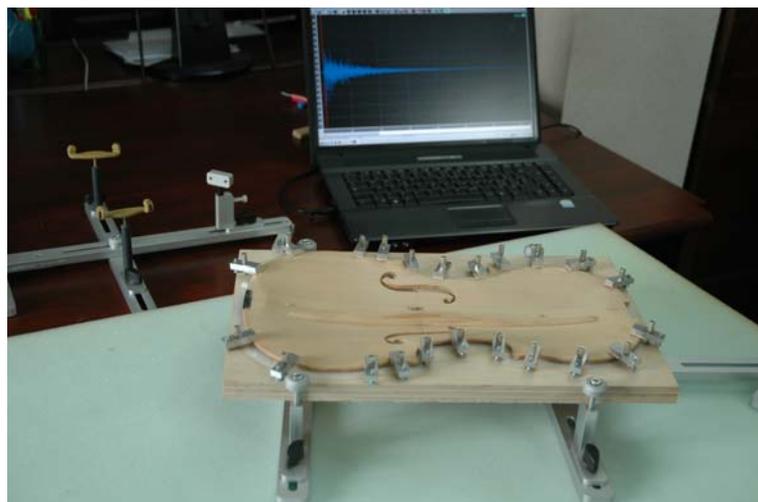


Foto 6 – *Eccitazione della tavola con shaker e rilievo del suono con due microfoni (intensità acustica). Si determina la risposta all'impulso della tavola e, quindi, i modi di risonanza. È più agevole rilevare direttamente la risposta della tavola con una sinusoide sweep..*

La individuazione delle curve nodali avviene mediante mappatura delle risonanze rese evidenti dalla componente della velocità di vibrazione perpendicolare alla tavola. Si eccitano le vibrazioni della tavola mediante un rumore bianco generato dallo stesso analizzatore di intensità che viene utilizzato. Si misura la componente della velocità acustica dell'aria nella direzione perpendicolare alla tavola. Per questo si utilizza una sonda con due microfoni posti a 17 mm di distanza tra loro ed a 5 – 10 mm di distanza dalla tavola ipotizzando che la velocità di oscillazione dell'aria a contatto con la tavola sia la stessa dello strato superiore della tavola. Misure sono state effettuate su tavole più rigide mediante un accelerometro per confermare la validità del metodo. Una taratura più precisa può essere effettuata mediante velocimetro laser.



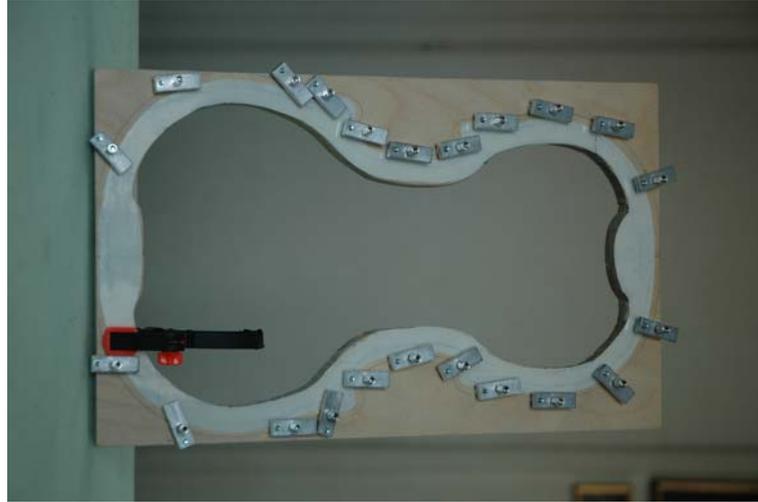


Foto 7 – la tavola armonica è fissata su un supporto idoneo ad incastrare il bordo lungo tutto il suo perimetro.

Si possono ottenere mappe di vibrazione alle diverse frequenze **Figura 11**. Le figure indicano le superfici del violino che vibrano alle diverse velocità.

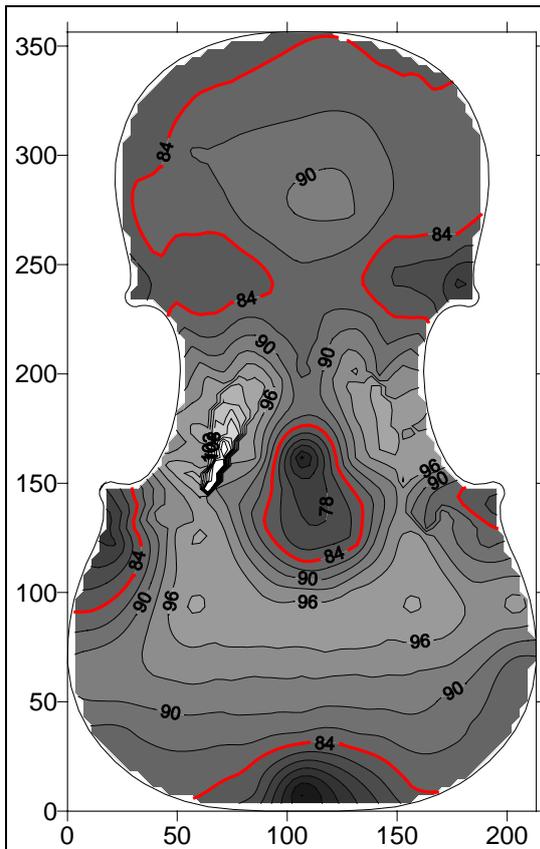


Figura 11 a– Mappa delle velocità di vibrazione alla frequenza di 262 Hz

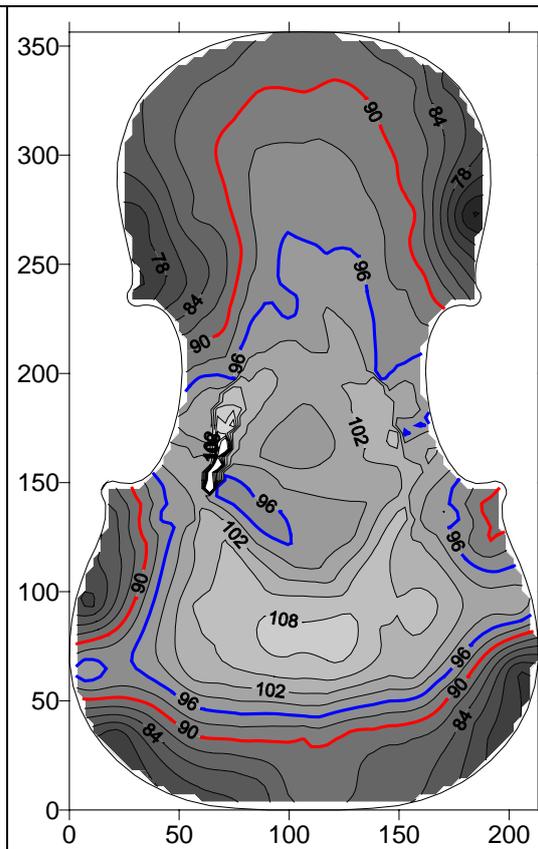


Figura 11 b– Mappa delle velocità di vibrazione alla frequenza di 412 Hz

Si possono disegnare aree ove la velocità di vibrazione è la stessa. Si possono misurare le superfici e, dai valori della velocità e dell'area si può calcolare la potenza sonora irradiata. Più estesa è la superficie e più elevato è il valore della velocità più intenso sarà il suono emesso da quella superficie.

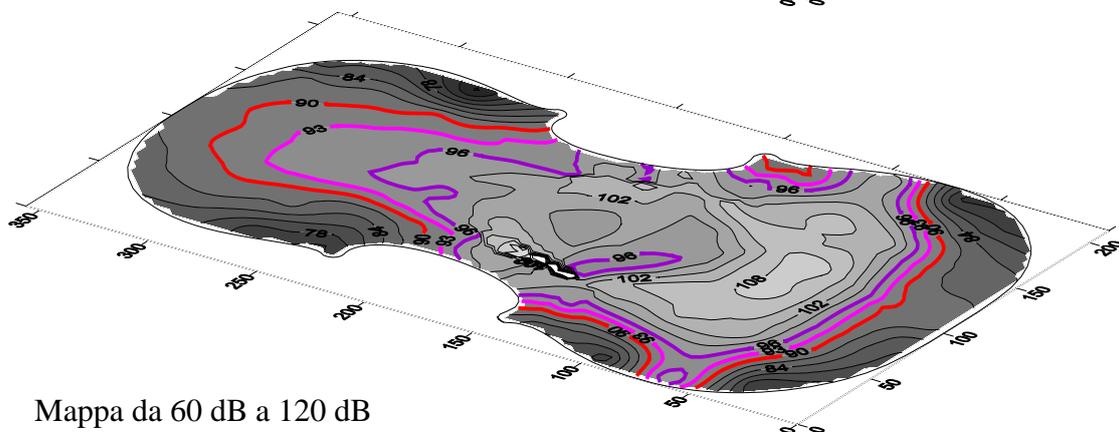
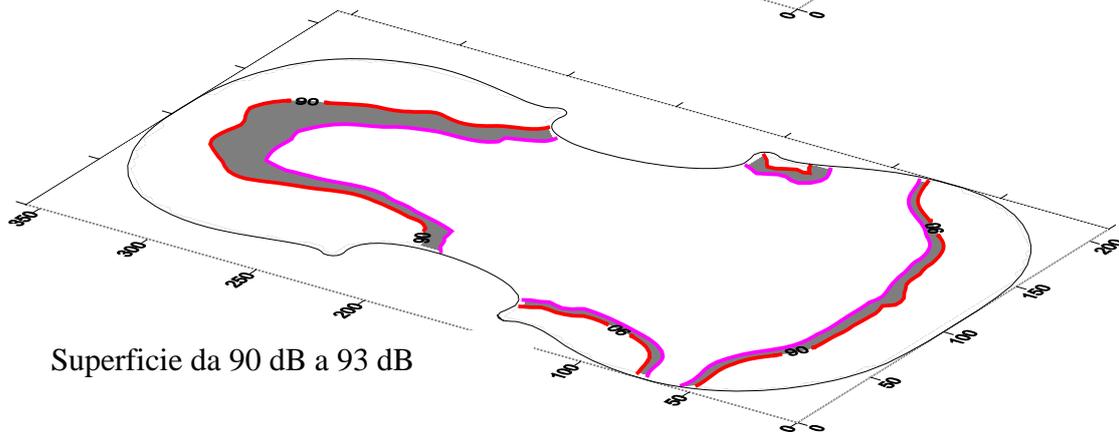
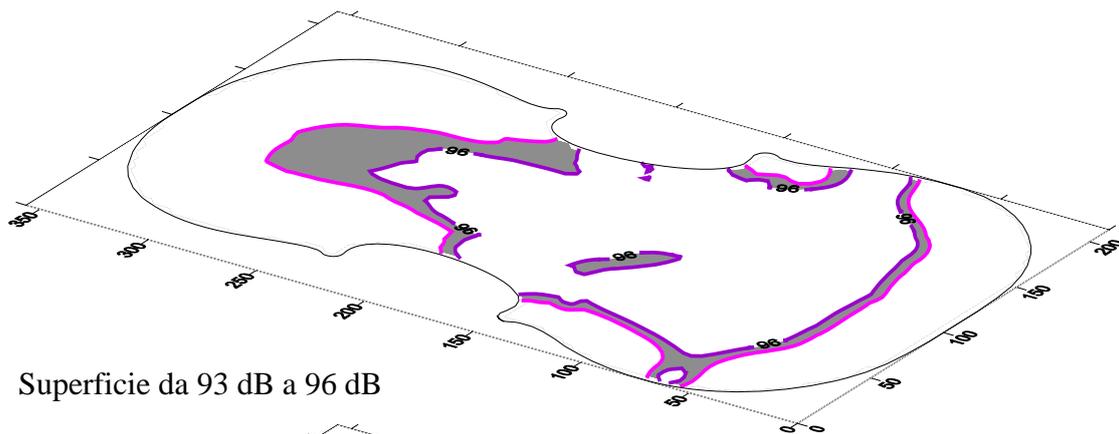


Figura 12 – sovrapposizione di aree della tavola armonica che vibrano alla stessa velocità alle frequenze e livelli indicati per ciascuna figura.

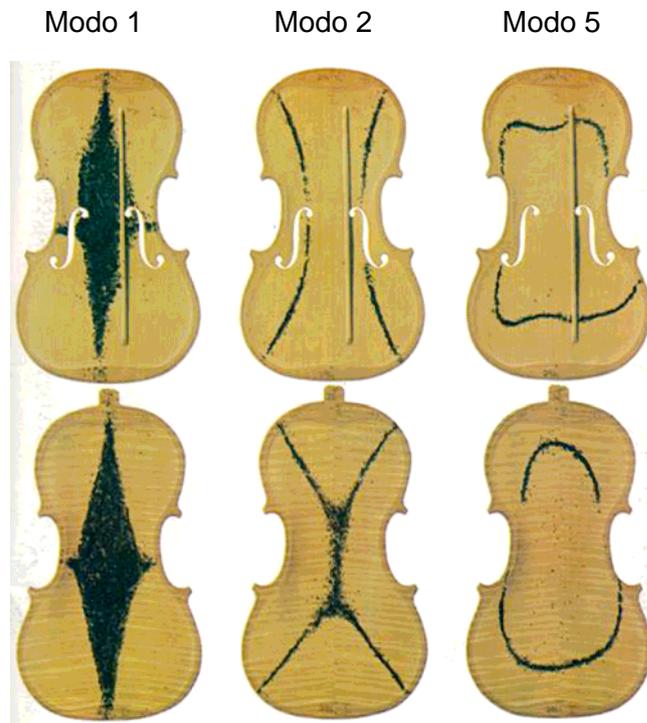


Figura 13 – Linee nodali ottenute ponendo in vibrazione le tavole cosparse di leggera polvere (tè). Le risonanze avvengono eccitando le stesse con altoparlante che emette un suono sinusoidale prossimo alla frequenza del modo. L'operatore varia la frequenza dell'oscillatore fin quando non vede saltellare i granuli di polvere. Legge sul frequenzimetro la frequenza di risonanza del modo che produce rimbalzi della polvere più ampi. (copertina articolo di Carleen Maley Hutchins – Scientific American ottobre 1981)

Nella tabella che segue si riportano separatamente per la tavola armonica con tagli delle *ff* e catena e per la tavola del fondo finita e senza fasce le principali seguenti frequenze di risonanza.

Modo di risonanza	Tavola armonica	Fondo
Modo 1	80 Hz	114 Hz
Modo 2	147 Hz	167 Hz
Modo 3	222 Hz	222 Hz
Modo 4	-	230 Hz
Modo 5	304 Hz	349 Hz
Modo 6	342 Hz	403 Hz

Secondo diversi autori sono importanti i modi 2 e 5 “accordati” secondo precisi criteri desunti dalle figure di Chladni che si formano ponendo in vibrazione le tavole.

Si ritengono importanti, per il liutaio, le osservazioni della Hutchins sui modi 1, 2 e 5:

- A. uno strumento di buona qualità risulta tale quando il modo 5 ha una ampiezza più grande degli altri modi. La frequenza del modo 5 della tavola armonica si scosta di un tono dalla frequenza del modo 5 del fondo. Se la frequenza del modo 5 della tavola è più alta di quella del fondo il suono dello strumento finito sarà “vivace”. Se la frequenza, al contrario, è più bassa il suono sarà “scuro”.
- B. Facilità di esecuzione e suono morbido si raggiungono quando la frequenza del modo 2 della tavola armonica si avvicina di 1,4% (circa 5 Hz) a quella del modo 2 del fondo.
- C. Se il modo 5 della tavola armonica ha la stessa frequenza del modo 5 del fondo allora la frequenza del modo 2 della tavola dovrà scostarsi di circa 1,4 % da quella omonima del fondo. In caso contrario lo strumento sarà duro da suonare e presenterà un suono aspro, ruvido, sabbioso.
- D. Una analisi di violini di elevata qualità ha dimostrato che per ciascuna tavola (quella superiore e quella del fondo) le frequenze dei modi 2 e 5 sono collocati ad un intervallo di ottava l’uno dall’altro. Alle frequenze corrispondenti presentano ampiezze più elevate.
- E. Una ulteriore raffinatezza è quella di accordare il modo 1 della tavola armonica ad una ottava più bassa del modo 2 così che le frequenze dei modi 1, 2 e 5 siano tutti ad un intervallo di ottava cioè in una serie armonica. Questa serie armonica, però, non può essere ottenuta sulla favola del fondo per una diversa struttura rispetto alla tavola armonica.

6.4 Prove manuali di rigidità dei modi 1, 2 e 5

Affinché si possano innescare determinati modi di risonanza occorre che le rigidità della tavola per flessione lungo le linee nodali siano adeguate.

Si possono percepire le rigidità dei diversi modi mediante prove a flessione con appositi dinamometri per la misura della forza applicata e misuratori dei spostamento per la determinazione dei cedimenti.

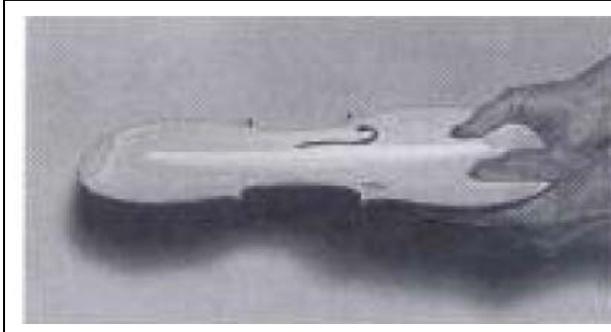
Il liutaio può procedere manualmente affidandosi alla sua esperienza ed alla sua sensibilità come viene di seguito indicato.

Stima della rigidità lungo l’asse nodale relativo al modo 1



Torcendo la tavola in modo che il lato sulla mano sinistra si sposti verso l’alto mentre quello della mano destra verso il basso si simula la torsione caratteristica del **modo 1** percependo soggettivamente la rigidità della tavola alla torsione.

Stima della rigidità lungo l'asse nodale relativo al modo 2



Se si afferra la tavola come in figura e si premono i pollici in modo da curvare la tavola spingendo verso il basso l'asse centrale si simula la torsione caratteristica lungo l'asse nodale del **modo 2** che coincide con la rigidità della tavola in questo senso. L'operazione si ripete sull'altro lato della tavola.

Stima della rigidità lungo l'asse nodale relativo al modo 5



Se si afferra la tavola come in figura e si premono i pollici in modo da curvare la tavola nella direzione trasversale all'asse (sempre premendo i pollici verso il basso) si percepisce la rigidità alla torsione del **modo 5**.

6.5 Come si ottiene l'accordatura dei modi 2 e 5

Nelle tavole, i cui spessori sono prossimi a quelli ritenuti finiti (da 3 a 4 mm per la tavola armonica e da 3 a 6 mm per il fondo) è possibile accordarne le frequenze dei modi raschiando ed alleggerendo la tavola in alcuni e precisi punti che corrispondono alle vibrazioni dei modi 2 e 5.

L'operazione di raschiature della tavola di legno riduce sia la massa sia la sua rigidità alterando anche la capacità di assorbire energia meccanica. Si procede per passi assottigliando la tavola di alcuni decimi di millimetro per volta.

In generale asportando del legno assottigliando una determinata area della tavola ove si registra la massima ampiezza di oscillazione di quel modo (antinodo o ventre) si tende ad abbassare la sua frequenza di risonanza. Se l'operazione è effettuata in un'area dove l'ampiezza di vibrazione è minima (in prossimità dei nodi) si tende ad alzare la frequenza di risonanza di quel determinato modo.

Assottigliando la tavola dove la flessione è più ampia significa ridurre maggiormente la cedevolezza più che la massa cosicché la frequenza scende.

Rimovendo il legno raschiando in aree ove la flessione è minima significa ridurre la massa più che la cedevolezza per cui aumenta la frequenza di quel modo.

Le aree di flessione sono quelle dove la curvatura è massima durante il moto. Le immagini ottenute attraverso la interferometria ottica mostrano linee che da ravvicinate (in prossimità

dei nodi) si allargano regolarmente (come le curve topografiche di equilivello). Una spaziatura uniforme delle frange di interferenza indicano un movimento uniforme o un moto senza curvature pronunciate. Al contrario una brusca variazione di pendenza anche in determinate direzioni mostrano una irregolarità di moto con torsione (aree, cioè, che non vibrano in fase).

Per il modo 5

	<p>Raschiando in un'area a sagomatura crescente intorno alle due terminazioni della tavola, iniziando appena dentro ciascun angolo, si tende ad abbassare la frequenza del modo 5 più che quella del modo 2.</p> <p>Raschiando invece dal centro della tavola si tende ad aumentare la frequenza del modo 5. Infatti è in questo punto della tavola che le oscillazione del modo 5 sono più ampie.</p>
--	--

Per il modo 2

	<p>Riducendo lo spessore o raschiando dal centro delle due aree della tavola si tende ad abbassare la frequenza del modo 2 in quanto tali zone sono a maggiore flessione per il modo 2.</p>
---	---

Poiché la cedevolezza di una tavola in un determinato punto può essere diversa dalla cedevolezza nello stesso punto di un'altra tavola (dipende dalle caratteristiche del legno usato), occorre procedere all'accordatura di ciascuna singola tavola con il metodo descritto osservando le caratteristiche figure di Chladni.

6.6 L'intensimetria acustica

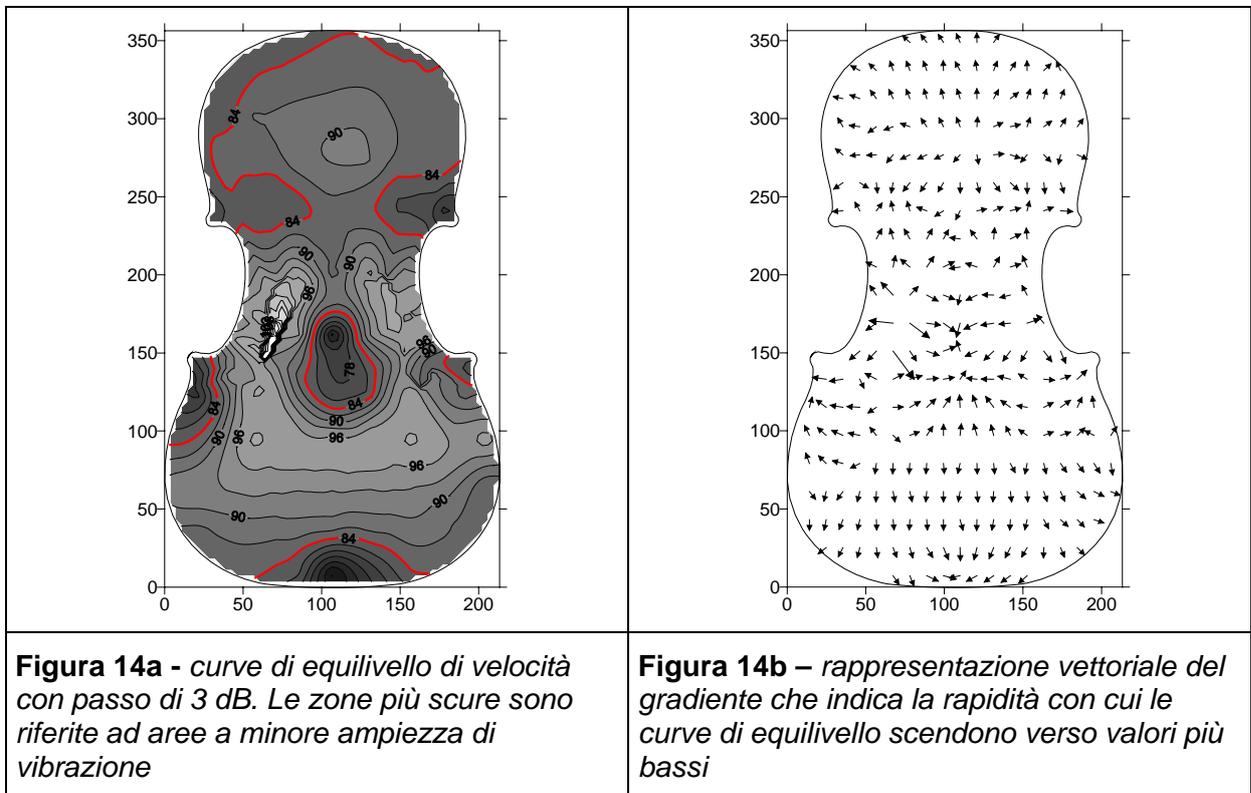
L'impiego dell'intensimetria acustica in campo vicino alla tavola può essere di aiuto in quanto fornisce più informazioni delle figure di Chladni. L'analisi intensimetrica su una superficie vibrante quale è quella delle tavole del violino fornisce due importanti parametri:

- L'ampiezza della velocità di vibrazione di ciascun punto della tavola
- L'ampiezza e la direzione del vettore velocità che rappresenta la pendenza e la direzione in cui si orientano le curve di equilivello.

Le immagini ottenute con l'intensimetria acustica, **Figura 14** si riferiscono alla frequenza di 262 Hz del modo relativo NON alla sola tavola armonica ma alla Tavola già incollata sulle fasce e sul fondo.

Una pendenza regolare in cui varia l'ampiezza della velocità di vibrazione è indicata da linee ugualmente distanziate. Anche in questo caso le curve indicano una oscillazione del moto senza torsione. Il vettore indica la direzione in cui cambia la pendenza mentre la lunghezza indica la rapidità con cui varia la pendenza.

Variazioni brusche di direzione ed ampiezza del vettore velocità indicano aree morfologicamente tormentate.



La sovrapposizione dell'immagine vettoriale alla rappresentazione in mappa delle curve di equilivello chiarisce il significato e l'importanza della mappa vettoriale.

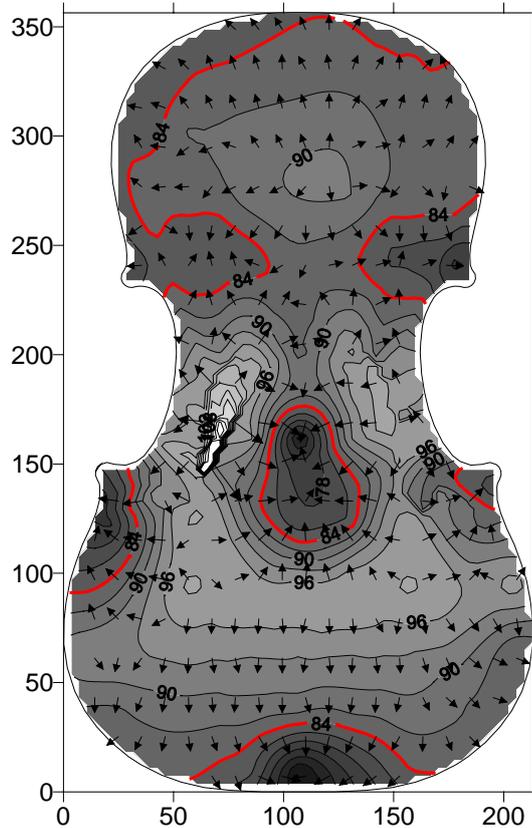


Figura 15 – Sovrapposizione della mappa vettoriale alla mappa di equilivello alla frequenza di 262 Hz.

Una rappresentazione più significativa è fornita dalla mappa della griglia utilizzata per la interpolazione dei valori su ciascun nodo. La deformazione della griglia indica le zone a maggior velocità acustica. È significativo l'innalzamento della velocità in corrispondenza della f più vicina alla catena. Infatti si è vicini alla frequenza di risonanza della cavità della cassa chiusa del violino in costruzione e pari a 275 Hz.

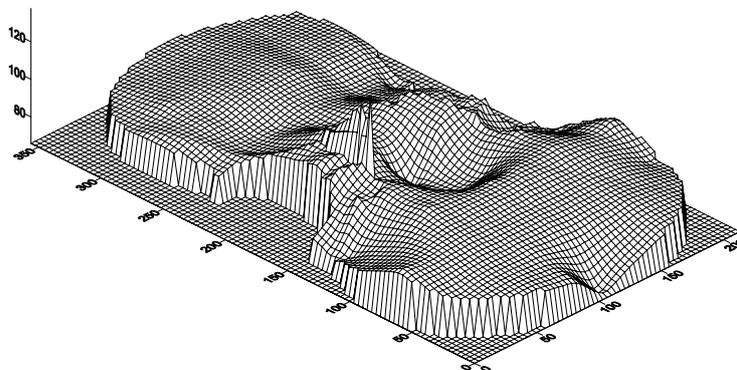


Figura 16 – Rappresentazione della griglia di analisi con l'elevazione pari al livello della velocità di vibrazione alla frequenza di 262 Hz

6.7 I modi di un violino in bianco a cassa chiusa.

Le figure di Chladni descritte si possono realizzare solo sulle tavole in quanto il lato concavo, rivolto verso l'alto, impedisce ai granuli di polvere di scivolare e perdersi all'esterno. Un corpo di violino a cassa chiusa **Foto 8** non può essere sottoposta all'indagine con il metodo di Chladni. L'intensimetrica acustica consente di individuare le principali frequenze di risonanza e tracciare le curve di equilivello.



Foto 8 – La tavola armonica di un corpo di un violino in bianco prima dell'accordatura finale ove si agirà esclusivamente raschiando la superficie esterna.

Prima di effettuare la mappatura della ampiezza di vibrazione della tavola occorre determinare le principali frequenze di risonanza.

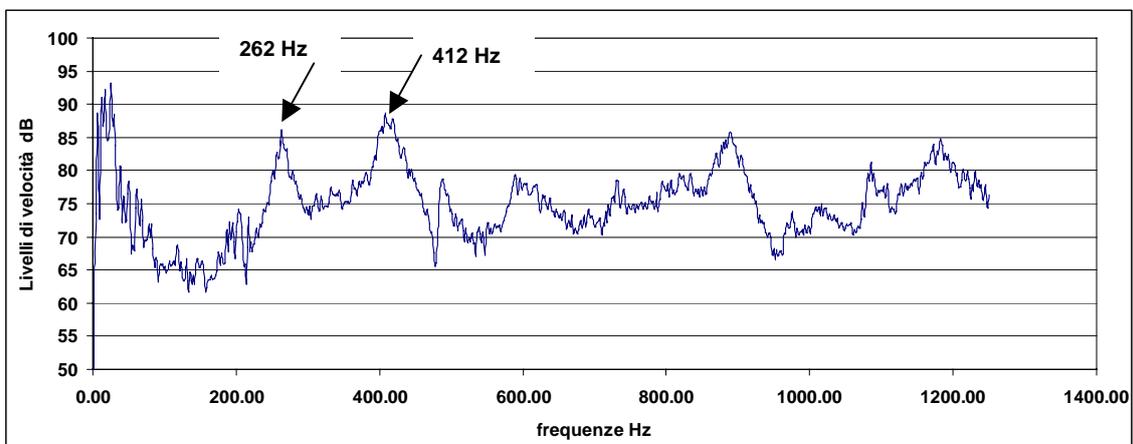


Figura 17 – Risposta in frequenza della tavola armonica in cassa chiusa. Frequenze considerate negli esempi riportati nel testo.

Un primo principale modo è alla frequenza di 262 Hz che è più basso del modo 5 ma potrebbe essere il modo 2 la cui frequenza è più alta della frequenza canonica 225 Hz per effetto dell'innalzamento del valore prodotto dal vincolo delle fasce sul bordo.

Un secondo modo, di rilevante intensità, è quello alla frequenza di 412 Hz le cui curve di livello sono riportate nelle **Figure 18 e 19**.

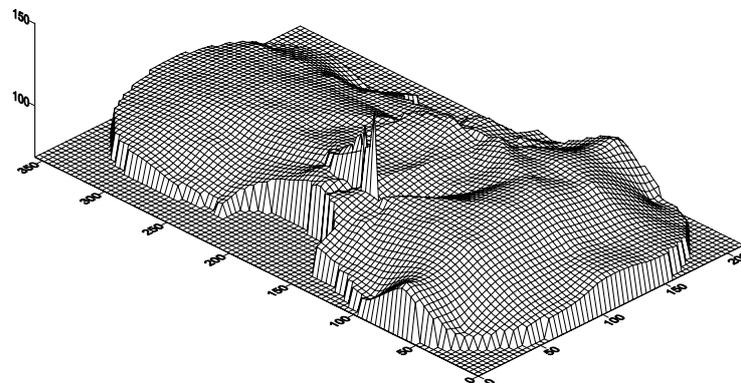
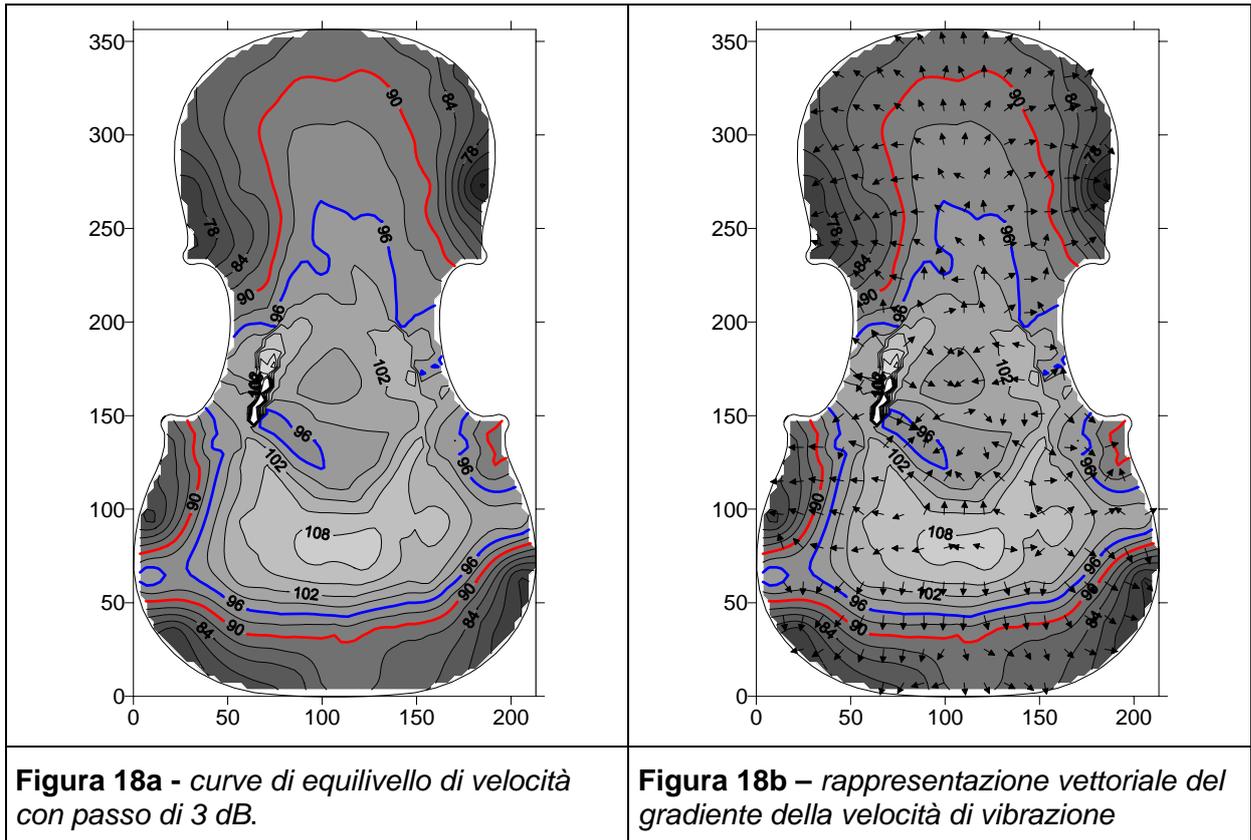


Figura 19 - Immagine della griglia che mostra una maggiore estensione delle superfici alla frequenza di 412 Hz.

Si può concludere, alla luce di quanto detto a proposito della intonazione delle tavole, le frequenze modali delle singole tavole sono diverse da quelle del corpo del violino a cassa chiusa.

Per quest'ultimo il confronto delle figure 16 e di quelle della Figura 19 indicano che occorre ridurre lo spessore al centro della tavola tra le due *ff* per uniformare il modo di vibrazione alla frequenza di 202 Hz a quello del modo a 412 Hz.

6.8 Il ruolo della vernice

Per molti il suono di un violino in bianco è qualitativamente superiore al suono dello stesso dopo la verniciatura. Si ottiene un aumento dello smorzamento, una variazione del modulo di Young della cedevolezza etc. che portano a spostare l'accordatura ottenuta come precedentemente descritto.

Le misurazioni di acustica prima e dopo la verniciatura sono necessarie per comprendere le caratteristiche smorzanti delle vernici utilizzate e misurare l'entità dello scostamento dell'accordatura effettuata sul violino in bianco.

Hutchins a tal proposito scrive: L'effetto della vernice sulle facce esterne delle due tavole prima del loro assemblaggio apporta significative variazioni del modo 5 **Figura 20**.

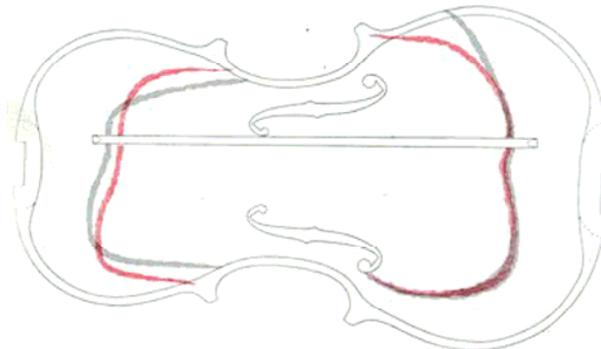


Figura 20 – Curve nodali del modo 5. In rosso le curve di Chladni della tavola armonica della viola con due mani di vernice ad olio. In grigio le curve nodali della tavola armonica dopo 6 mani di vernice e 2 anni di utilizzo sullo strumento. La curva grigia si riferisce alla stessa tavola dopo che è stata rimossa dallo strumento.

L'accordatura della tavola continua a variare per due anni prima che la vernice si indurisca e che assuma il suo assetto finale di stabilità nel tempo.

Bibliografia

L.H. Morset – “ Measurements of radiation efficiency and internal mechanical loss applied to violins

J. Woodhouse – “ The Acoustics of “A0 – B0 Mode Matching” in the Violin – Acustica vol. 84 1998

Carleen Maley Hutchins – Scientific American – October 1981

Pisani Michetti Cena “analisi del modo di risonanza della tavola armonica di uno strumento in bianco”.

Sangano, 8 dicembre 2015