





# Acustica — Musica e Strumenti ad Arco Lezione del 1 dicembre 2015

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

Entrambi sono propagazioni di vibrazioni (energia elastica) che si trasmette da un generatore (ad esempio strumento musicale) ad un ricettore (ad esempio orecchio dell'uomo).

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

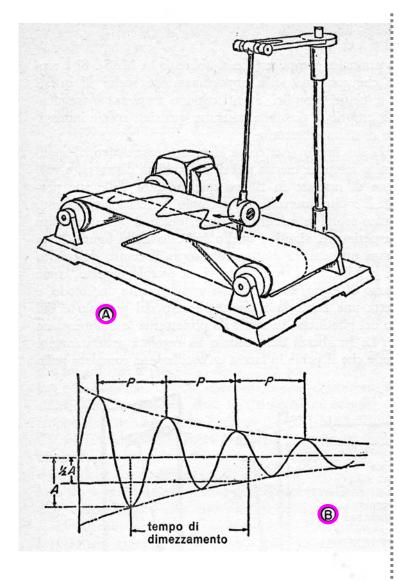
In sostanza, le onde sono oscillazioni che un sistema vibrante comunica al mezzo di trasmissione (aria) e, da esso, alla membrana timpanica dell'orecchio umano.







# Costruzione e rappresentazione grafica di una forma d'onda



A. Il pendolo oscilla in direzione perpendicolare al moto del nastro di carta.

Un pennino lascia sulla carta la forma dell'onda prodotta dalle oscillazioni.

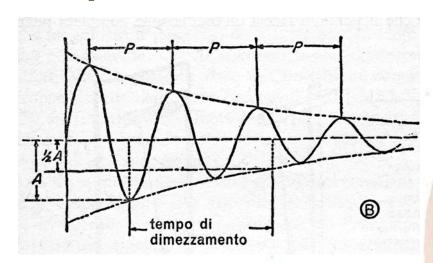
B. Queste si smorzano, per cui si registra la sinusoide smorzata.







# Frequenza e nota musicale



Per frequenza del suono si intende il numero delle onde P (periodo) che si presentano all'orecchio in un secondo. Essa si esprime in Hertz (Hz).

L'altezza di un suono musicale è espresso dal valore della sua frequenza fondamentale. Per la nota LA 3 (A3) la frequenza è fissata in 440 periodi in un secondo.

La frequenza doppia di LA 3, cioè LA 4, è 880 Hz. Si definisce in questo modo l'intervallo di ottava. La scala musicale occidentale temperata è ottenuta suddividendo l'intervallo di ottava in 12 intervalli uguali (semitoni).







# Frequenze delle note musicali

ottava		1	2	3	4	5		
nota								
DO	16,35	32,70	65,40	130,8	261,6	523,2	1046	2093
DO diesis	17,32	34,64	69,29	138,6	277,2	554,4	1108	2217
RE	18,35	36,70	73,41	146,8	293,6	587,3	1175	2350
RE diesis	19,44	38,89	77,78	155,5	311,1	622,2	1244	2489
MI	20,60	41,20	82,40	164,5	329,6	659,2	1318	2637
FA	21,82	43,65	87,30	174,7	349,2	698,5	1396	2793
FA diesis	23,12	46,24	92,50	185 —	370	740 —	1480	2960
SOL	24,50	49 —	98 —	196 —	392 —	784 —	1568	3136
SOL diesis	25,95	51,91	103,82	207,6	415,3	830,6	1661	3322
LA	27,50	55 —	110 —	220 —	440 —	880 —	1760	3520
LA diesis	29,13	58,27	116,54	233,1	466,2	932,3	1864	3729
SI	30,86	61,73	123,47	246,9	493,8	987,7	1975	3951

Tabella dei valori in Hz della frequenza fondamentale delle note che costituiscono il sistema temperato.







# I cordofoni come generatori 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.

La tavola armonica, il fondo, le fasce, etc., trasmettono 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).

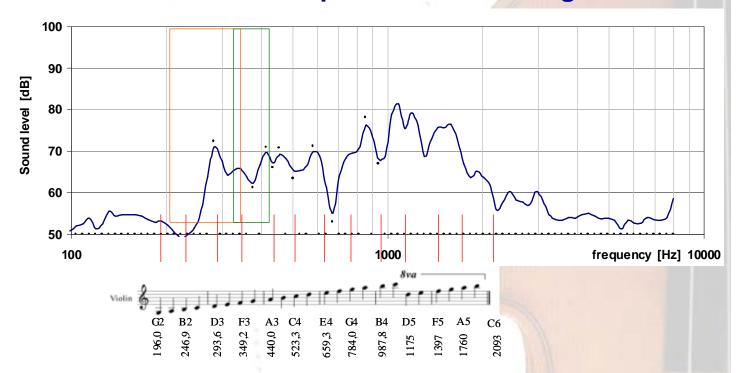






# La risposta in frequenza

Se si eccita a vibrare il corpo del violino con un suono sinusoidale "glissando" (frequency sweep) si ottiene una curva di risposta come nella figura:



Risposta in frequenza dello strumento ad una eccitazione sinusoidale del ponticello.

La curva è costituita da numerosi picchi.

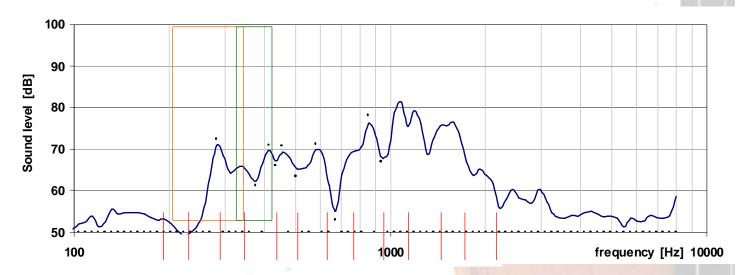
Tra essi si individuano la risonanza del volume della cassa dello strumento e la risonanza della tavola armonica.







# Curva di risposta di un violino



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

1 – suono forte che mantenga il "colore " dello strumento

2 – una uniformità di livello sonoro delle diverse note.

Acusticamente il concetto si traduce nell'avere una curva 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.







# Risposta acustica dello strumento

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 alla base della generazione e propagazione dei suoni degli strumenti musicali.

Il laboratorio sperimentale di acustica prevede specifiche misurazioni a supporto delle necessità illustrate nei seguenti capitoli.







# Classificazione e selezione del legno

Per la realizzazione della tavola armonica il legno viene fornito dal taglio radiale della pianta e si presenta come nella foto:



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

modulo E di Young rapporto di Poisson  $\sigma$  massa volumica del materiale  $\rho_m$  in  $kg/m^3$  modulo di taglio G rigidezza torsionale K rigidezza a flessione — (bending siffnes) velocità di propagazione dell'onda sonora fattore di perdita  $\eta$ 

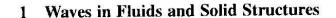


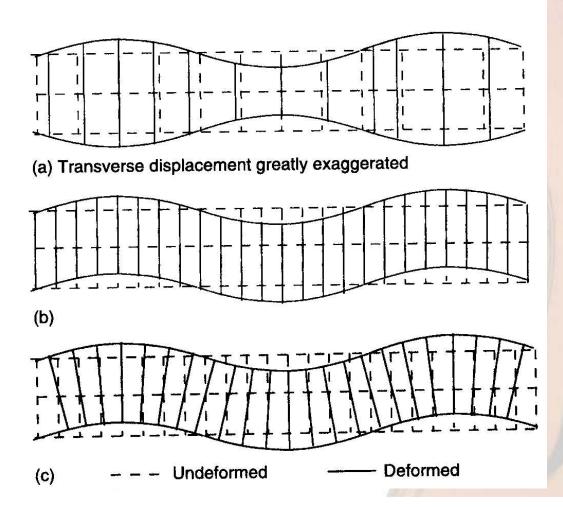




# I modi di propagazione del suono

Nell'aria, la propagazione del suono è di tipo longitudinale nel senso che la velocità delle particelle del mezzo è nella direzione della propagazione del suono. Nei corpi solidi, che reagiscono elasticamente allo sforzo di taglio, il vettore velocità può essere perpendicolare alla direzione della propagazione dell'energia meccanica.









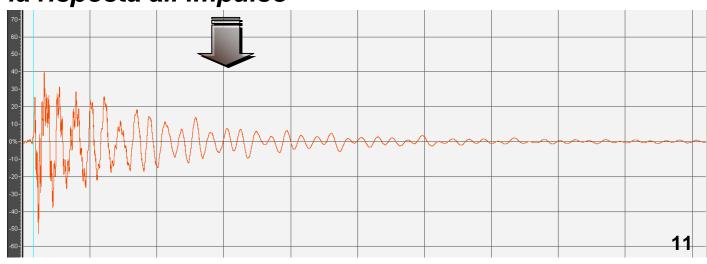


# Misura dei principali parametri

La velocità di propagazione dell'onda flessionale si misura attraverso la risposta all'impulso



la risposta all'impulso



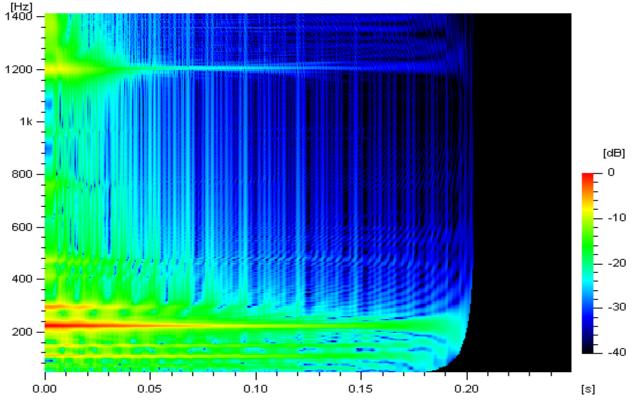






# Caratterizzazione acustica dei legni

## Spettrogramma della risposta all'impulso











# Il corpo del violino come cavità risonante

Il volume d'aria delimitato dalle tavole e dalla fascia è un risonatore di Helmholtz.

Le principali frequenze sono indicate da:

A0 – risonanza fondamentale della cavità "violino"

275 Hz - 290 Hz

B0 - risonanza della tastiera come mensola

240 HZ - 340 Hz

Queste si ricavano analizzando il suono generato soffiando debolmente sulle ff del violino e registrando il rumore ottenuto con un piccolo microfono posto in corrispondenza dell'occhio superiore della ff o all'interno dello strumento.







# Il corpo del violino come cavità risonante

È conveniente analizzare gli spettri del rumore rilevato in più punti all'interno del violino. Le diverse misure sono ripetibili se si costruisce un piccolo mantice come quello degli organi a canne. La pressione dell'aria non deve superare 100 mm di colonna d'acqua. Il getto d'aria è orientato sulle fessure mediante tubo flessibile e beccuccio sagomato in modo da evitare turbolenze in uscita.

Si può utilizzare un piccolo altoparlante in cassa chiusa con uscita di un tubo rigido da inserire nell'occhio delle ff.







# Messa a punto della tavola armonica

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 rigidezza 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.

Alcune delle fasi sopra elencate richiedono controlli di acustica.

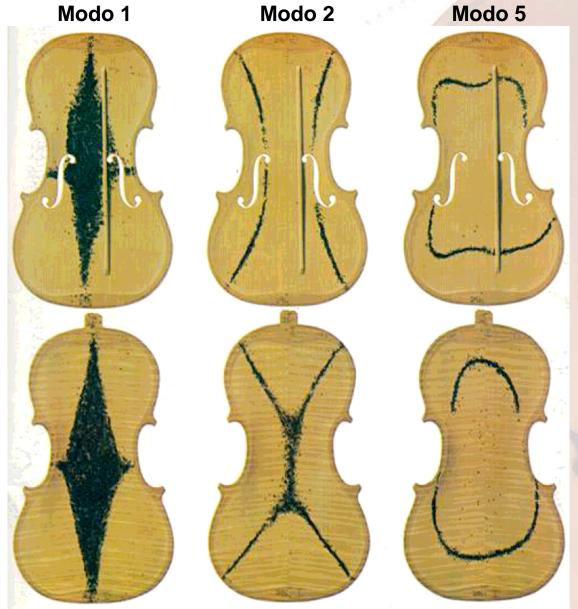






# Messa a punto della tavola armonica

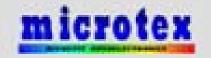
Per la determinazione dei modi propri di vibrazione delle tavole armoniche e del fondo si procede applicando il metodo classico delle figure di Chladni



Gli annerimenti corrispondono ai punti ove non sono presenti vibrazioni (punti nodali)







# Modi di vibrazione delle tavole

# Si applica il metodo classico delle figure di Chladni

La tavola armonica è appoggiata sul piano di una cassa acustica, in corrispondenza dell'altoparlante, mediante piccoli blocchetti di gommapiuma. Si cosparge la parte concava della tavola 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 descritto approfonditamente dal fisico liutaio C. M. Hutchins.



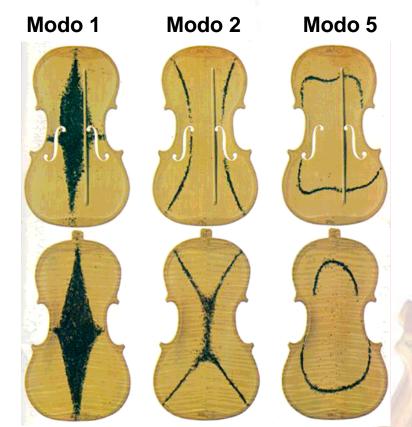




# I modi di vibrazioni delle tavole

La tavola armonica, con tagli delle  $f\!f$  e catena e la tavola del fondo finito senza fasce, presentano separatamente le 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









## I modi di vibrazioni delle tavole

Secondo diversi autori sono importanti i modi 2 e 5.

A tale proposito Hutchins asserisce che:

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.







## I modi di vibrazioni delle tavole

- C. Se il modo 5 della tavola armonica ha la stessa frequenza del modo 5 del fondo, la frequenza del modo 2 della tavola si scosterà di circa 1,4 % da quella omonima del fondo; altrimenti lo strumento sarà duro da suonare e presenterà un suono aspro, ruvido, sabbioso.
- D. Da una analisi di violini ad elevata qualità è stato rilevato che le frequenze dei modi 2 e 5 sono collocate ad un intervallo di ottava l'una dall'altra. Per entrambe le tavole i modi sono alla stessa frequenza e presentano la stessa ampiezza.
- E. Una successiva raffinatezza la si ottiene se i modi 1, 2 e 5 sono tutti ad intervallo di ottava, cioè in una serie armonica.



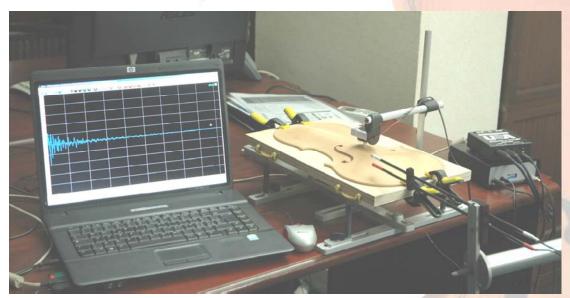




### Analisi dei modi con tecniche intensimetriche

La tavola armonica è vincolata ad una struttura rigida e viene sottoposta a vibrazione mediante uno shaker. Si ricava la risposta all'impulso con suono sweep 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.

La tavola armonica è appoggiata ad una struttura rigida mediante tasselli di gommapiuma e si utilizza il criterio di analisi descritto.



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.

Occorre sperimentare il vincolo se rigido o tasselli di gomma-piuma

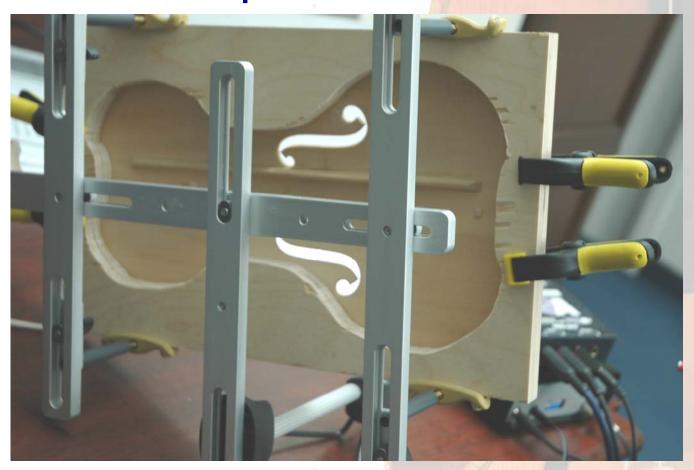






## Analisi dei modi con tecniche intensimetriche

L'analisi dei modi con tecniche intensimetriche fornisce le curve nodali e la estensione delle aree dello strumento che vibrano a determinate frequenze e con determinate ampiezze.



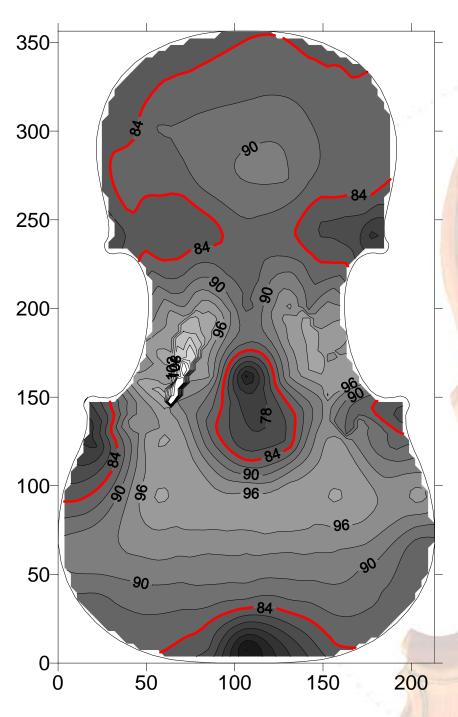
la tavola armonica è fissata su un supporto idoneo ad incastrare il bordo lungo tutto il suo perimetro







# Analisi dei modi con tecniche intensimetriche



modo di
vibrazione della
tavola armonica
di uno strumento
in bianco, privo
di anima, alla
frequenza di 262
Hz. La tavola è
da accordare per
avvicinarsi al
modo 5 della
singola tavola
armonica (pari a
300 Hz)







### 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 i modi raschiando ed alleggerendo alcuni precisi punti delle stesse. Raschiando una tavola di legno si 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.

Rimuovere del legno in una determinata area della tavola, ove si registra la massima ampiezza di oscillazione (antinodo o ventre), significa abbassare la frequenza di risonanza di quel modo. Se l'operazione è effettuata in un'area dove l'ampiezza di vibrazione è minima, significa alzare la frequenza di risonanza di quel determinato modo.







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

Assottigliando la tavola dove la flessione è significativa, 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 con il conseguente aumento della frequenza.

Le aree di flessione sono quelle dove la curvatura è massima durante il moto. Le immagini ottenute attraverso la interferometria ottica mostrano linee che si avvicinano o si allargano regolarmente (curve topografiche di equilivello).

Una pendenza regolare è indicata da linee ugualmente distanziate. Le frange di interferenza indicano una traslazione di moto senza torsione.







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

Secondo Hutchins, assottigliando la tavola di pochi decimi di millimetro a partire da uno spessore più elevato (forse l'inizio dello sguscio) verso le due estremità della tavola (dall'interno di ciascun angolo) si tenderà ad abbassare la frequenza del modo 5 piuttosto che del modo 2.

Raschiando al centro della tavola (pochi decimi di millimetro da asportare), si riduce la massa in un punto dove l'ampiezza delle oscillazioni del modo 5 è alta; si tenderà ad alzare debolmente la frequenza di risonanza del modo.

D'altro canto, assottigliando la tavola dal centro verso l'area più alta e più bassa della tavola, si tende ad abbassare la frequenza del modo 2, in quanto esse sono le aree di flessione.

Poiché la cedevolezza di una tavola in un 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.







### Il ruolo della vernice

Per molti il suono di un violino in bianco è qualitativamente superiore al suono dello stesso dopo la verniciatura.

Si ottengono: 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.