

## **INDAGINI INTENSIMETRICHE PER CARATTERIZZARE LA RISPOSTA DELLA TAVOLA ARMONICA DI UN VIOLINO**

### **Convegno AIA 2014**

Armani Alberto (1), Raffaele Pisani (2), Andrea Michetti (3), Paolo Onali (2), Chiara Devecchi (2)

- 1) Spectra S.r.l., Arcore (MB)
- 2) Studio di Ingegneria Acustica Pisani, Rivoli (TO)
- 3) Microtex S.a.s., Almese (TO)

### **1. Premessa**

La liuteria rappresenta un'arte secolare per la costruzione di strumenti a corda (violini, chitarre, contrabbassi etc.). Per la realizzazione degli strumenti i liutai seguono precisi criteri dimensionali e astuzie costruttive che si tramandano nelle botteghe secondo canoni di scuole antiche. Di fatto la messa a punto dello strumento viene eseguita dal liutaio seguendo propri criteri che si basano unicamente sulla percezione dei suoni prodotti.

Con il perfezionamento della metrologia acustica molti ricercatori hanno scelto di occuparsi dei suoni dei violini indagandone diversi aspetti quali l'analisi modale del corpo dello strumento, quella del ponticello, del manico etc.

La tavola armonica, così come gli altri elementi che costituiscono gli strumenti ad arco, viene realizzata portando ad un giusto spessore il legno per conferire ad esso l'elasticità necessaria per una buona resa acustica. Tutti gli elementi vengono assemblati per realizzare l'intero corpo dello strumento che irradierà il suono prodotto dallo sfregamento delle corde con l'archetto. La risposta del corpo dello strumento è tale da fornire "la voce caratteristica del violino" colorando il suono generato dalla vibrazione delle corde. Si individuano in pratica le diverse risonanze non solo della tavola armonica ma anche del fondo fino a quelle che si accoppiano al corpo dello strumento quali le risonanze del manico, quelle del ponticello, delle cordiere etc.

I liutai, oggi, chiedono all'acustica metodi e strumenti per valutare la risposta dei diversi componenti prima del loro assemblaggio. La tavola armonica costituisce il più importante di tali componenti. La sua costruzione richiede, oltre alla scelta del legno, anche un complesso lavoro di falegnameria per raggiungere gli spessori necessari per una bilanciata produzione del suono.

La resa acustica dello strumento finito dipende molto dalla risposta acustica della tavola armonica la quale richiede una messa a punto prima del suo incollaggio sulle fasce. Interventi correttivi a strumento finito sono possibili solo agendo sugli spessori dall'esterno.

La risposta dello strumento finito presenta caratteristiche diverse da quella della tavola armonica messa a punto in fase di costruzione per questo motivo è necessario poter prevedere, dalle indagini acustiche sulla sola tavola, la resa dell'intero strumento ultimato.

Si descrivono e si confrontano tre metodiche di analisi acustiche dello stesso violino volte, in particolare, alla misura della risposta in frequenza con particolare riferimento alla individuazione delle sue risonanze principali e dei relativi smorzamenti.

## 2. La risposta acustica della tavola armonica

In numerose botteghe di liuteria, al fine di valutare la posizione dei nodi e ventri di risonanza della tavola si procede, ancora oggi, osservando le figure di Chladni che si ottengono cospargendo la tavola con polvere di licopodio. Sovente si percepisce la qualità della risposta acustica percotendo lo strumento con le nocche delle dita.

Un metodo scientifico per determinare la risposta della tavola è quello di eccitare le risonanze del corpo del violino mediante un attuatore elettromagnetico (shaker) posto in determinati punti della tavola o sul ponticello di uno strumento finito. Si può anche procedere determinando la funzione di trasferimento tra una forza impulsiva, esercitata in un punto, e la risposta in accelerazione misurata in un altro punto dello strumento.

I tre metodi presentati richiedono una minima strumentazione e l'impiego di appositi programmi di analisi.

In primo luogo occorre definire una griglia di misura sulla tavola armonica dello strumento Foto 1. La griglia può essere proiettata o disegnata con un sistema a puntamento laser. La eccitazione può avvenire mediante shaker Foto 2 o mediante un trasduttore di forza attrezzato con una punta arrotondata, Foto 3, al fine di percuotere con debole forza, la tavola nei punti indicati dalla Figura 1.



Foto 1 – Griglia di misura, proiettata sullo strumento, per la individuazione dei punti di eccitazione e di risposta.

La forza impressa nel punto di eccitazione viene rilevata con un trasduttore (PCB modello n. 208C01) mentre la risposta della tavola viene rilevata con un accelerometro

PCB modello 352A73 di 0.3 g Foto 4. Lo strumento è tenuto da un sistema a bracci che agiscono unicamente sul bordo del fondo dello strumento e che tengono, a dovuta distanza, lo strumento da un piano di appoggio costituito da un pannello fonoassorbente in fibra di poliestere dallo spessore di 100 mm.



Foto 2 - Sistema di eccitazione del ponticello con mini shaker



Foto 3 – eccitazione con un trasduttore di forza Foto 4 - Accelerometro posizionato sulla tavola

Il sistema di eccitazione delle vibrazioni è vincolato, sul ponticello, con un apposito sistema ad incastro, in legno duro, al cui interno è sistemato un accelerometro. Le corde sono rese mute con l'impiego di feltri smorzanti e mantengono, comunque, la loro forza statica (circa 100 N) sulla tavola armonica come visibile nella Foto 2.

### 3. Risposta del corpo dello strumento

Si desume una prima risposta dello strumento, mediante l'eccitazione con una forza sinusoidale con frequenza variabile esponenzialmente nel tempo (e-sweep) da 80 a 10.000 Hz. L'accelerometro rileva le vibrazioni nei punti P40 e P50. L'andamento del livello di accelerazione in funzione della frequenza è riportato nella Figura 1. Si rilevano risonanze alle stesse frequenze ma con ampiezze diverse dovute ai particolari modi di vibrazione eccitati.

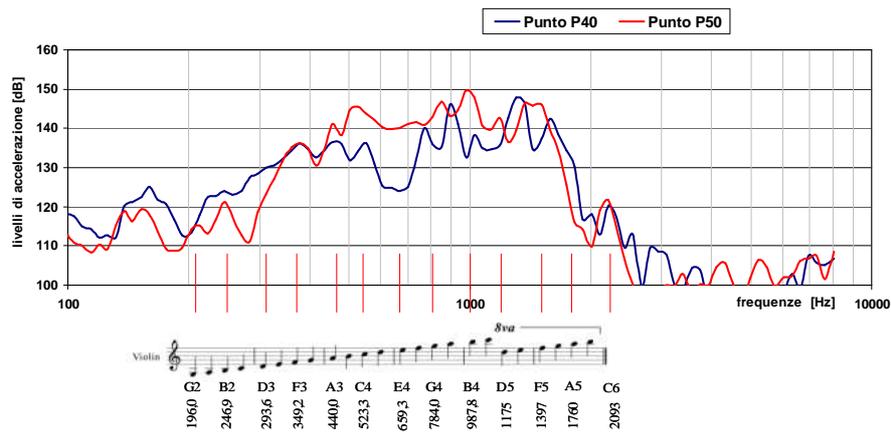


Figura 1 - Risposta in frequenza rilevata in due punti della tavola armonica con segnale e-sweep

Si determina in modo più rigoroso ma con un maggiore impegno di metodi di analisi, la funzione di trasferimento tra forza di eccitazione del ponticello e accelerazione della tavola armonica Figura 2. Il segnale impiegato, in questo caso, è un rumore a larga banda a densità spettrale costante.

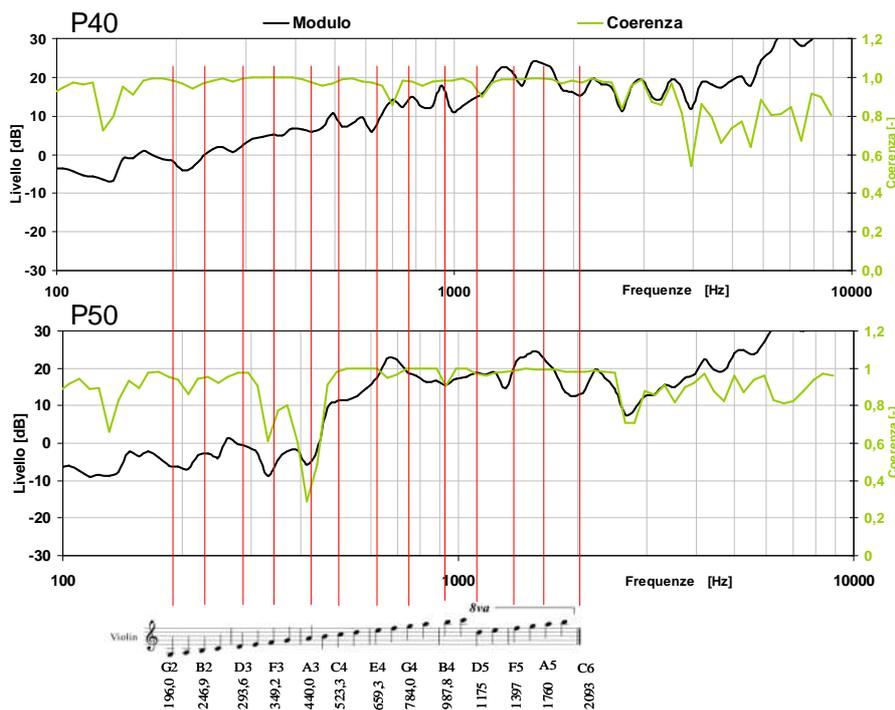


Figura 3 – funzione di trasferimento tra forza di eccitazione sul ponticello e accelerazione rilevata nei punti P40 al piede del ponticello e P50 sul corpo della tavola

La funzione di coerenza tracciata unitamente alla funzione di trasferimento rende conto della validità della stima in certe bande di frequenze.

Si procede alla determinazione della risposta in un punto della tavola con tecniche di analisi numerica più sofisticate. Di particolare aiuto è la tecnica di analisi per sintesi. La risposta, ad esempio nel punto P40, può essere ottenuta analizzando il segnale con tecniche di predizione lineare LPC. La risposta del “filtro” è riportata nella Figura 4a). Si determinano le principali risonanze e le relative larghezze di banda. Si opera una sintesi inversa del filtro utilizzando i dati misurati separando ciascuna risonanza (o modo proprio di vibrazione) determinandone le singole risposte e gli smorzamenti figura 4 b). Tale metodo di analisi è utile per valutare gli smorzamenti dei modi di risonanza. Il liutaio opera, inconsciamente, per ridurre al massimo gli smorzamenti al fine di ottenere sonorità più intense. Il legno della tavola armonica, cosiddetto “di risonanza”, acquista con il tempo e con le continue sollecitazioni se lo strumento viene usato quotidianamente, una elasticità tale da migliorare la qualità timbrica e la intensità del suono prodotto.

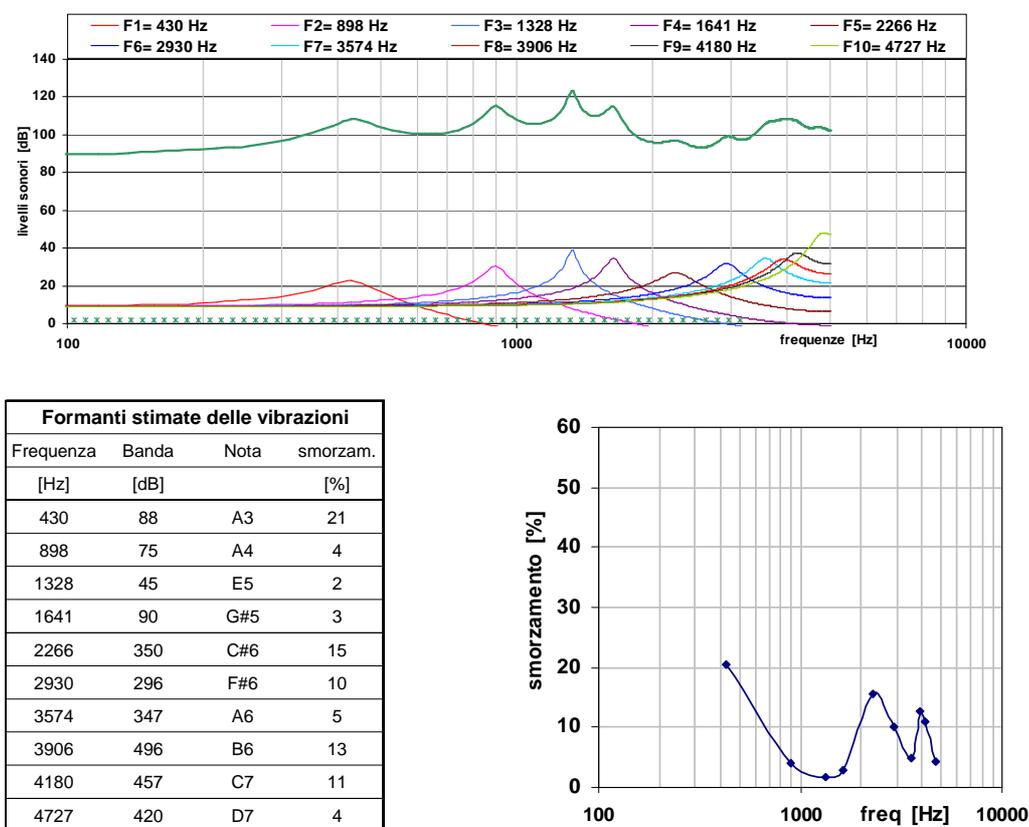


Figura 4 – determinazione della risposta nel punto P40 con tecnica di analisi LPC

#### 4. L'analisi modale del corpo dello strumento

I modi propri di vibrazione e la collocazione dei ventri e dei nodi per particolari frequenze, è ottenuta analizzando la risposta all'impulso di un sistema a multipli ingressi (eccitazioni) ed unica uscita (risposta). L'accelerometro di ridotte dimensioni è tenuto con cera al piede del ponticello. Con il martelletto attrezzato con trasduttore di forza (Foto 5) si percuote, in successione, la tavola armonica nei nodi della griglia di Foto 1. Il sistema di analisi, in fase di acquisizione, mostra in continuo la risposta all'impulso, la funzione di trasferimento e, soprattutto, la funzione di coerenza. Si possono portare correzioni se l'eccitazione impulsiva non produce, nella media, una funzione di coerenza appropriata.



Foto 5 – Sistema di percussione del corpo dello strumento con martelletto attrezzato

La sequenza di acquisizione delle funzioni di trasferimento viene ordinata dal calcolatore ed utilizzata per tracciare la mappa delle deformate per ciascuna frequenza scelta.

Si ottengono sequenze di fotogrammi nel tempo che consentono la ricostruzione visiva dei modi propri di oscillazione. I movimenti mettono maggiormente in evidenza la posizione dei nodi e dei ventri nonché le fasi di oscillazione dei diversi punti.

Nella Figura 6 si riportano le immagini relative al modo di oscillazione alla frequenza di 424 Hz che coincide con il primo modo di risonanza della tavola armonica. E' importante osservare come tale modo è rilevato anche dall'analisi LPC effettuata con eccitazione diretta del ponticello.

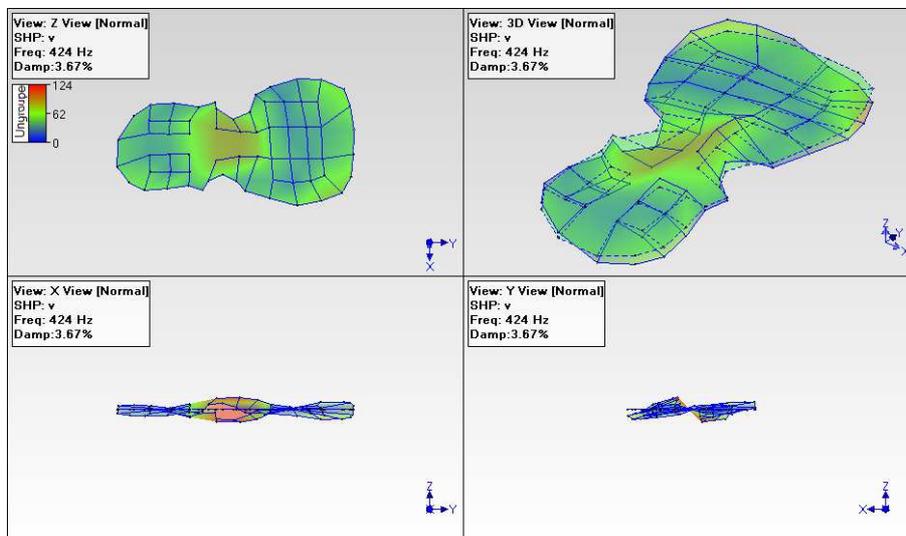


Figura 6 – Modo di risonanza della tavola armonica ottenuto con eccitazione impulsiva

L'analisi modale è di grande aiuto al liutaio in quanto consente la misura diretta degli smorzamenti. Attraverso metodi di sollecitazioni meccaniche e continue della tavola è possibile ridurre lo smorzamento interno del legno con un processo di preparazione. E' ben noto ai violinisti come la resa acustica dello strumento cambi sensibilmente, prima di un concerto se esso viene suonato per un breve tempo in una fase chiamata di riscaldamento.

La misura diretta dello smorzamento consente di prevedere, tra gli altri parametri, la resa dello strumento finito.

### 5. Le mappature acustiche

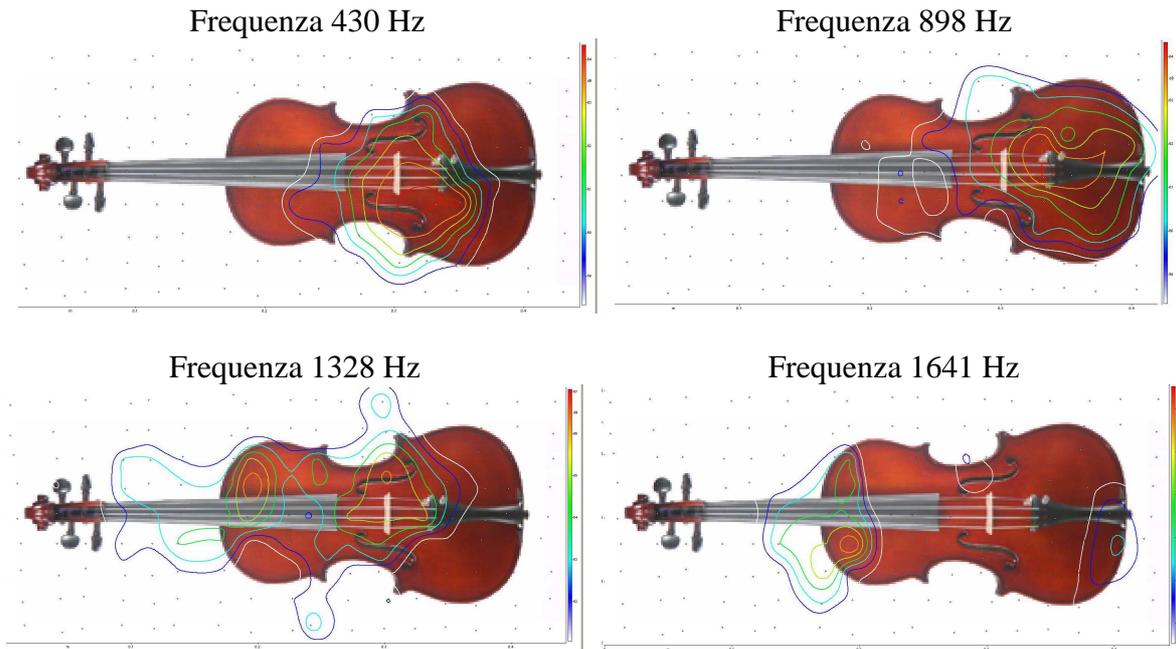
Il fenomeno dell'irraggiamento del suono da parte del corpo dello strumento può essere evidenziato attraverso indagini intensimetriche che consentano di tracciare le linee di equilivello. Le mappe possono riferirsi a linee di equilivello della componente attiva del vettore intensità ovvero alla velocità acustica in prossimità dello strumento.

Il ponticello è sollecitato da una forza a larga banda e perpendicolare alla tavola ottenuta con un segnale casuale. La sonda intensimetrica p-p scorre su un piano parallelo alla tavola armonica e la sua posizione è individuata da un sistema ottico referenziato sull'immagine (Foto 6). Il campo acustico a pochi centimetri di distanza dalla tavola presenta componenti reattive tali da incidere sulla misura del gradiente di fase tra i due microfoni se non si adottano particolari precauzioni. La distanza fra i microfoni deve essere contenuta, la distanza della sonda dalla tavola deve essere superiore almeno a 5 volte la distanza dei microfoni. L'indicazione fornita è legata anche alla forma curva della tavola armonica ed alla presenza di discontinuità di emissione sonora prodotte dai tagli ad  $f$  sulla tavola stessa. Prima di eseguire una mappatura definitiva è importante effettuare delle prove al fine di scegliere una distanza tale che riduca per le frequenze importanti l'indice di pressione-intensità residua espresso dalla differenza fra il livello di pressione ed il livello di intensità.

Nella Figura 7 si riportano le immagini ottenute dalla mappa di intensità per le frequenze indicate.



Foto 6 – Sonda intensimetrica p-p con puntatore ad infrarossi per riferire il livello di intensità misurato alla posizione della sonda che verrà spostata in prossimità della tavola



Come è possibile osservare la parte centrale del corpo dello strumento irraggia maggiormente il suono alla frequenza di 430 Hz che risulta essere il primo modo di risonanza della tavola armonica. Si evidenziano altri modi i cui centri di irraggiamento si spostano in funzione della frequenza fino ad evidenziare una emissione sonora della tavola nell'incastro del manico alla frequenza di 1641 Hz. Probabilmente tale modo risulta dalla combinazione della risonanza della tastiera con l'irraggiamento della tavola.

## 6. Bibliografia

- [1] Fahy F.J., *Sound Intensity*, Elsevier Applied Science, Barking, Essex, 1989
- [2] Bendat J.S., Piersol A.G., *Random Data: Analysis and Measurement Procedures*, Wiley, 2010

# PRESENTAZIONE

# INDAGINI INTENSIMETRICHE PER CARATTERIZZARE LA RISPOSTA DELLA TAVOLA ARMONICA DI UN VIOLINO



Armani Alberto (1), Raffaele Pisani (2), Andrea Michetti (3), Paolo Onali (2), Chiara Devecchi (2)

- 1) Spectra s.r.l., Arcore (MB)
- 2) Studio di Ingegneria Acustica Pisani, Rivoli (TO)
- 3) Microtex s.a.s., Almese (TO)

**La liuteria rappresenta un'arte secolare per la costruzione di strumenti a corda (violini, chitarre, contrabbassi, etc.). Per la realizzazione degli strumenti i liutai seguono precisi criteri dimensionali e astuzie costruttive che si tramandano nelle botteghe secondo canoni di scuole antiche.**

**Di fatto la messa a punto dello strumento viene eseguita dal liutaio seguendo propri criteri che si basano unicamente sulla percezione dei suoni prodotti.**



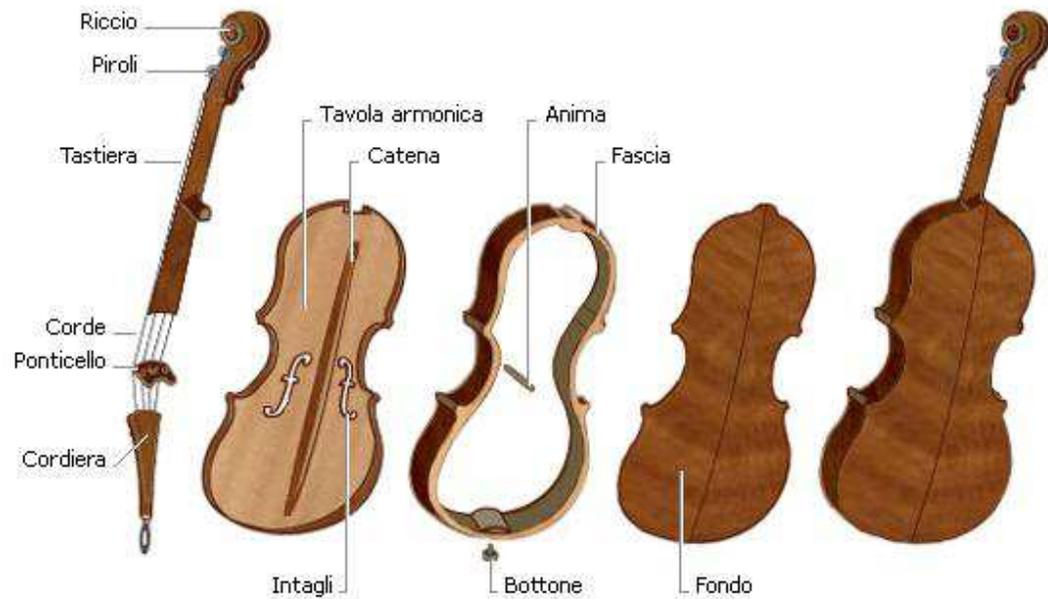
**La tavola armonica, così come gli altri elementi che costituiscono gli strumenti ad arco, viene realizzata portando ad un giusto spessore il legno per conferire ad esso l'elasticità necessaria per una buona resa acustica.**



**Tutti gli elementi vengono assemblati per realizzare l'intero corpo dello strumento che irradianà il suono prodotto dallo sfregamento delle corde con l'archetto. La risposta del corpo dello strumento è tale da fornire “la voce caratteristica del violino” colorando il suono generato dalla vibrazione delle corde. Si individuano in pratica le diverse risonanze non solo della tavola armonica, ma anche del fondo, fino a quelle che si accoppiano al corpo dello strumento quali le risonanze del manico, quelle del ponticello, delle cordiere, etc.**

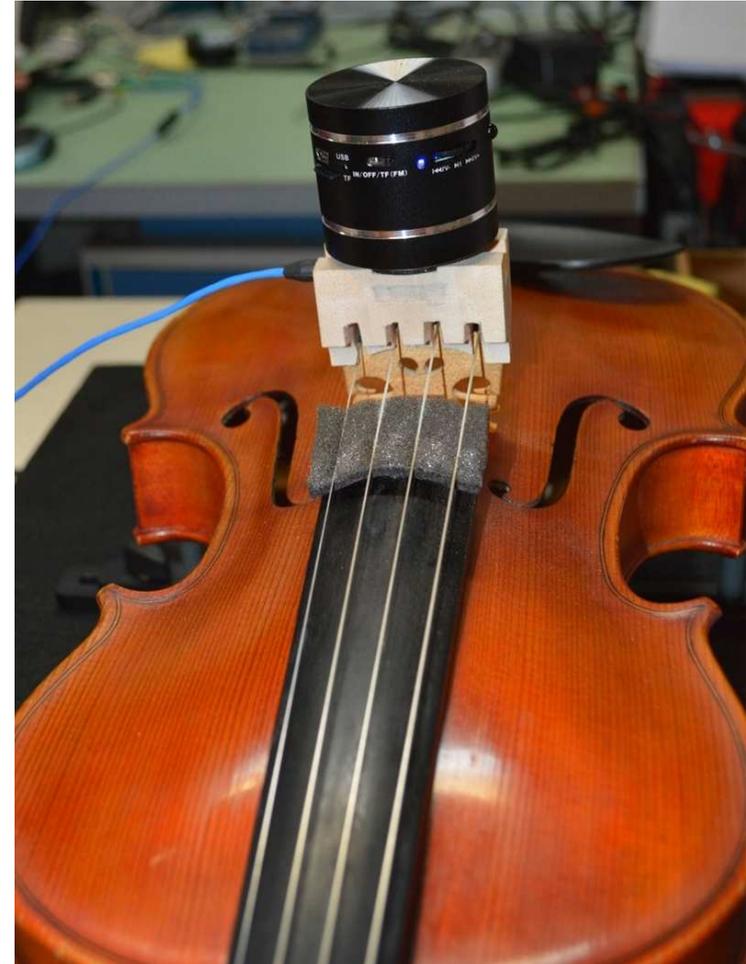
**La resa acustica dello strumento finito dipende molto dalla risposta acustica della tavola armonica la quale richiede una messa a punto prima del suo incollaggio sulle fasce. Interventi correttivi a strumento finito sono possibili solo agendo sugli spessori dall'esterno.**

**La risposta dello strumento finito presenta caratteristiche diverse da quella della tavola armonica messa a punto in fase di costruzione, per questo motivo è necessario poter prevedere, dalle indagini acustiche sulla sola tavola, la resa dell'intero strumento ultimato.**



## La risposta acustica della tavola armonica

**Un metodo scientifico per determinare la risposta della tavola è quello di eccitare le risonanze del corpo del violino mediante un attuatore elettromagnetico (shaker) posto in determinati punti della tavola o sul ponticello di uno strumento finito.**

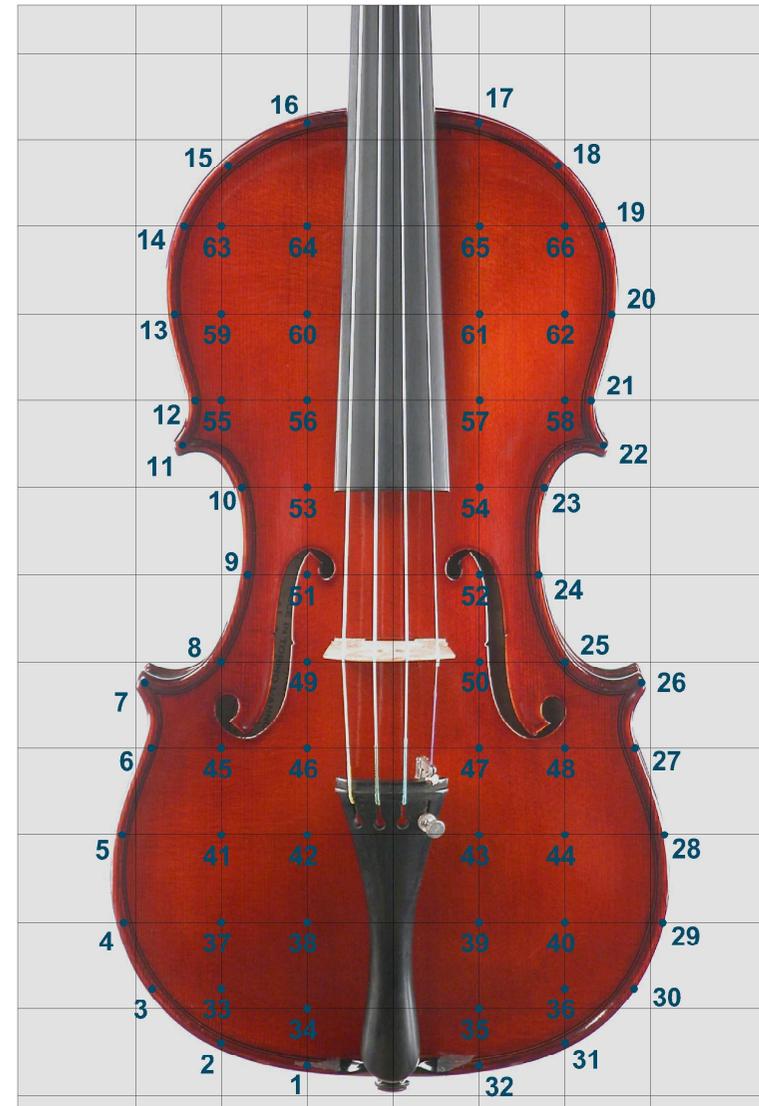


Si può anche procedere determinando la funzione di trasferimento tra una forza impulsiva, esercitata in un punto, e la risposta in accelerazione misurata in un altro punto dello strumento.

## *La risposta acustica della tavola armonica*

**I metodi richiedono una minima strumentazione e l'impiego di appositi programmi di analisi.**

**In primo luogo occorre definire una griglia di misura sulla tavola armonica dello strumento. La griglia può essere proiettata o disegnata con un sistema a puntamento laser.**



## ***La risposta acustica della tavola armonica***

### **L'eccitazione può avvenire:**



mediante shaker

mediante un trasduttore di forza attrezzato con una punta arrotondata, al fine di percuotere, con debole forza, la tavola nei punti indicati.



## ***La risposta acustica della tavola armonica***

**La forza impressa nel punto di eccitazione viene rilevata con un trasduttore (PCB modello n. 208C01) mentre la risposta della tavola viene rilevata con un accelerometro PCB modello 352A73 di 0.3 g.**

**Lo strumento è tenuto da un sistema a bracci che agiscono unicamente sul bordo del fondo dello strumento e che tengono, a dovuta distanza, lo strumento da un piano di appoggio costituito da un pannello fonoassorbente in fibra di poliestere dallo spessore di 100 mm.**

## ***La risposta acustica della tavola armonica***

**La forza impressa nel punto di eccitazione viene rilevata con un trasduttore (PCB modello n. 208C01) mentre la risposta della tavola viene rilevata con un accelerometro PCB modello 352A73 di 0.3 g.**

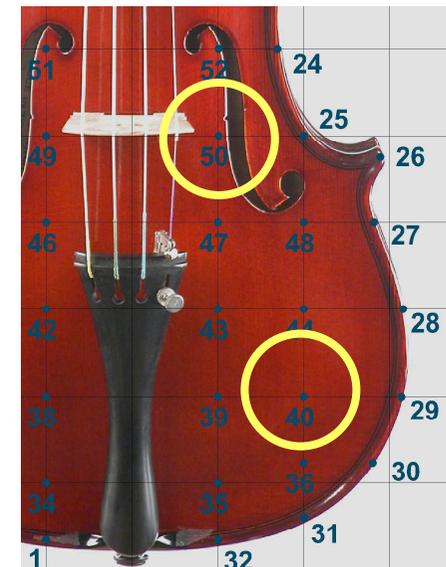
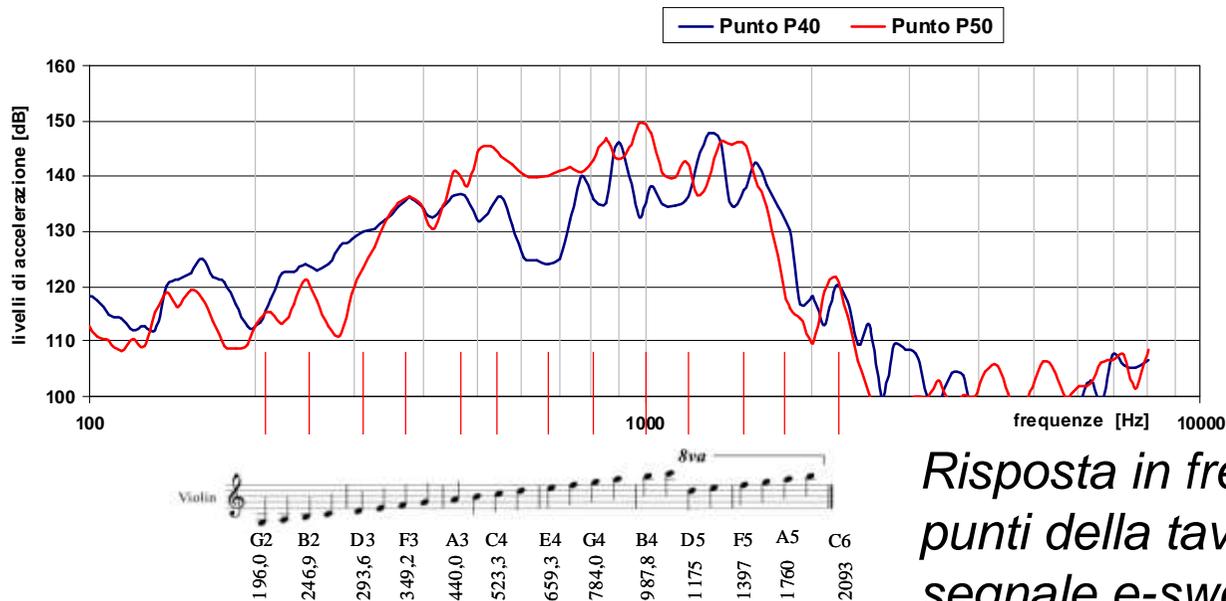
**Lo strumento è tenuto da un sistema a bracci che agiscono unicamente sul bordo del fondo dello strumento e che tengono, a dovuta distanza, lo strumento da un piano di appoggio costituito da un pannello fonoassorbente in fibra di poliesteri dallo spessore di 100 mm.**

**Il sistema di eccitazione delle vibrazioni è vincolato, sul ponticello, con un apposito sistema ad incastro, in legno duro, al cui interno è sistemato un accelerometro. Le corde sono rese mute con l'impiego di feltri smorzanti e mantengono, comunque, la loro forza statica (circa 100 N) sulla tavola armonica**

## La risposta del corpo dello strumento

Si desume una prima risposta dello strumento, mediante l'eccitazione con una forza sinusoidale con frequenza variabile esponenzialmente nel tempo (e-sweep) da 80 a 10.000 Hz. L'accelerometro rileva le vibrazioni nei punti P40 e P50.

Si rilevano risonanze alle stesse frequenze ma con ampiezze diverse dovute ai particolari modi di vibrazione eccitati.

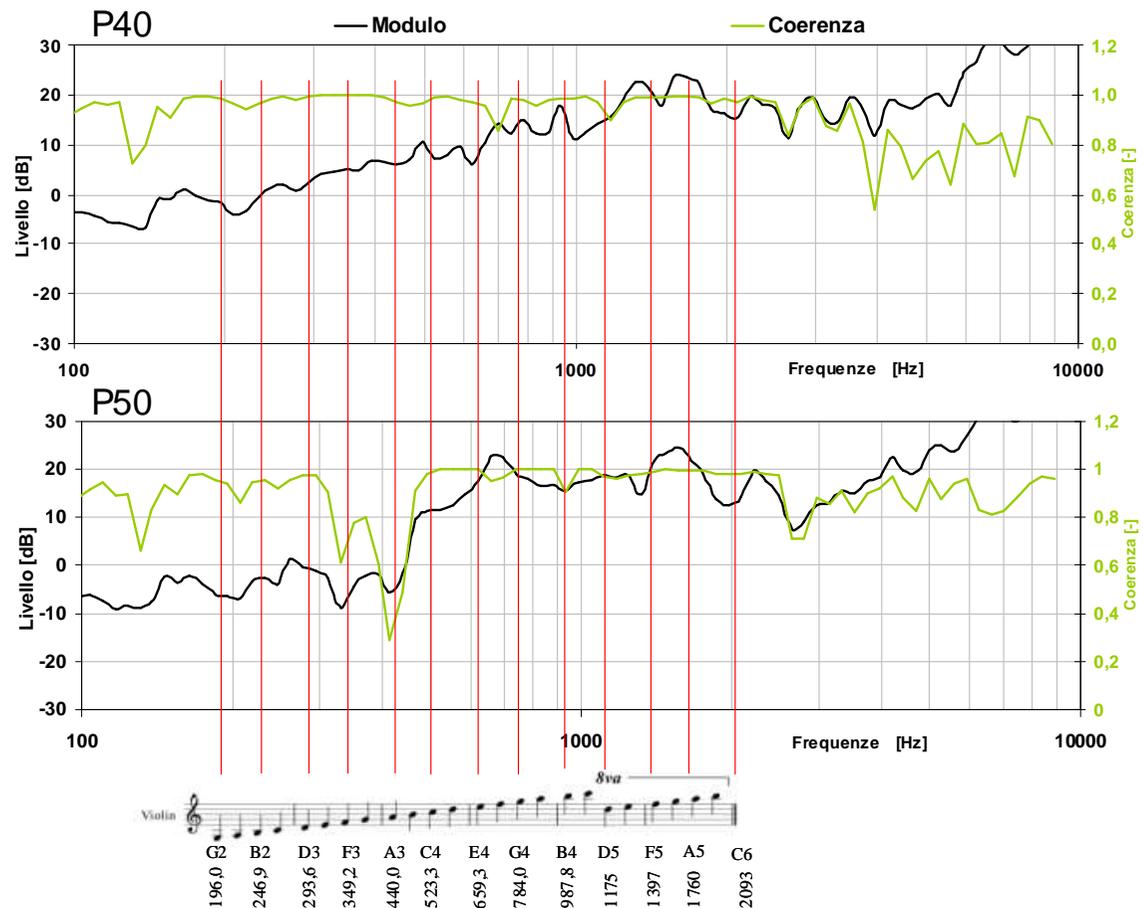


*Risposta in frequenza rilevata in due punti della tavola armonica con segnale e-sweep*

## La risposta del corpo dello strumento

Si determina la funzione di trasferimento tra forza di eccitazione del ponticello e accelerazione della tavola armonica.

Il segnale impiegato, in questo caso, è un rumore a larga banda a densità spettrale costante.



*funzione di trasferimento tra forza di eccitazione sul ponticello e accelerazione rilevata nei punti P40 al piede del ponticello e P50 sul corpo della tavola*

## ***La risposta del corpo dello strumento***

**Si procede alla determinazione della risposta in un punto della tavola con tecniche di analisi numerica più sofisticate.**

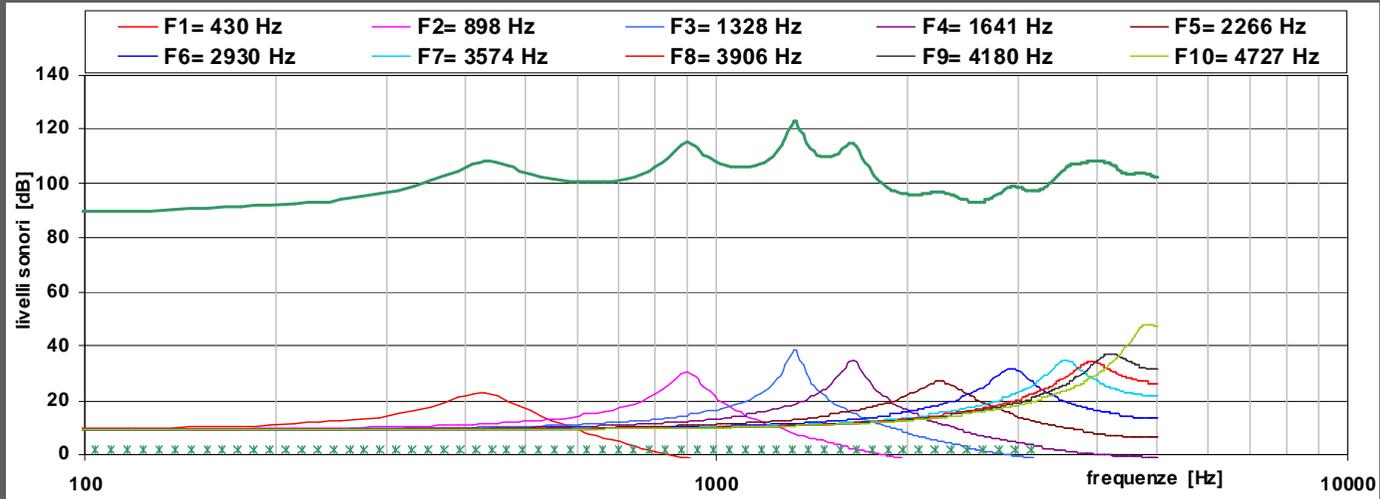
### **L'analisi per sintesi**

**La risposta nel punto P40 può essere ottenuta analizzando il segnale con tecniche di predizione lineare LPC.**

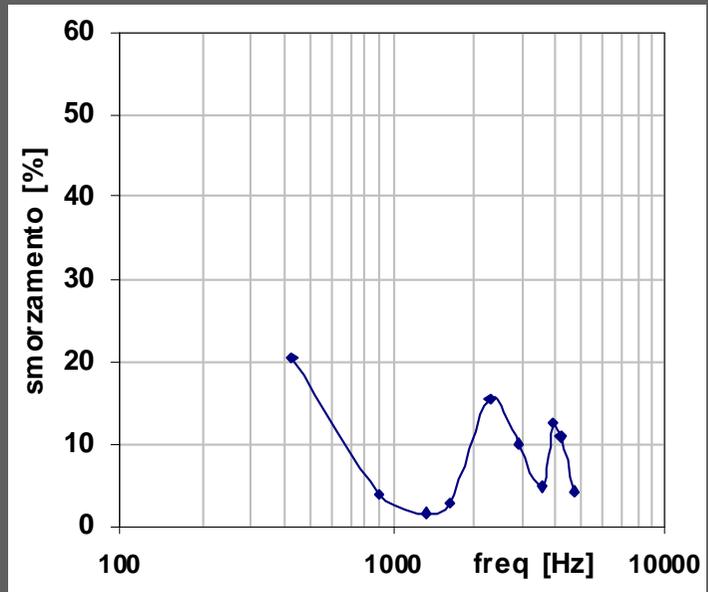
**Si determinano le principali risonanze e le relative larghezze di banda. Si opera una sintesi inversa del filtro utilizzando i dati misurati, separando ciascuna risonanza (o modo proprio di vibrazione), determinandone le singole risposte e gli smorzamenti.**

**Il liutaio opera per ridurre al massimo gli smorzamenti al fine di ottenere sonorità più intense. Il legno della tavola armonica, cosiddetto “*di risonanza*”, acquista, con il tempo e con le continue sollecitazioni se lo strumento viene usato quotidianamente, una elasticità tale da migliorare la qualità timbrica e la intensità del suono prodotto**

# L'analisi per sintesi



Formanti stimate delle vibrazioni			
Frequenza	Banda	Nota	smorzam.
[Hz]	[dB]		[%]
430	88	A3	21
898	75	A4	4
1328	45	E5	2
1641	90	G#5	3
2266	350	C#6	15
2930	296	F#6	10
3574	347	A6	5
3906	496	B6	13
4180	457	C7	11
4727	420	D7	4



*determinazione della risposta nel punto P40 con tecnica di analisi LPC*

## **L'analisi modale del corpo dello strumento**

**I modi propri di vibrazione e la collocazione dei ventri e dei nodi per particolari frequenze, è ottenuta analizzando la risposta all'impulso di un sistema a multipli ingressi (eccitazioni) ed unica uscita (risposta).**

**L'accelerometro di ridotte dimensioni è tenuto con cera al piede del ponticello.**



**Con il martelletto attrezzato con trasduttore di forza si percuote, in successione, la tavola armonica nei nodi della griglia. Il sistema di analisi, in fase di acquisizione, mostra in continuo la risposta all'impulso, la funzione di trasferimento e, soprattutto, la funzione di coerenza. Si possono portare correzioni se l'eccitazione impulsiva non produce, nella media, una funzione di coerenza appropriata.**

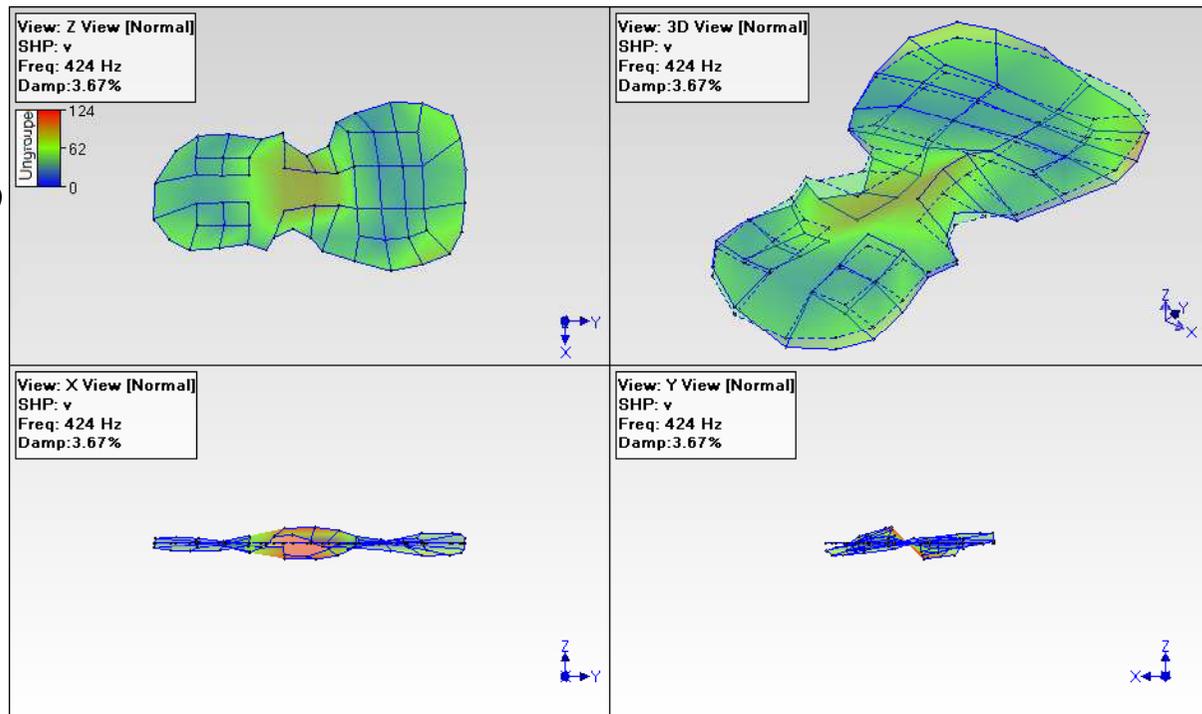
## ***L'analisi modale del corpo dello strumento***

La sequenza di acquisizione delle funzioni di trasferimento viene ordinata dal calcolatore ed utilizzata per tracciare la mappa delle deformate per ciascuna frequenza scelta.

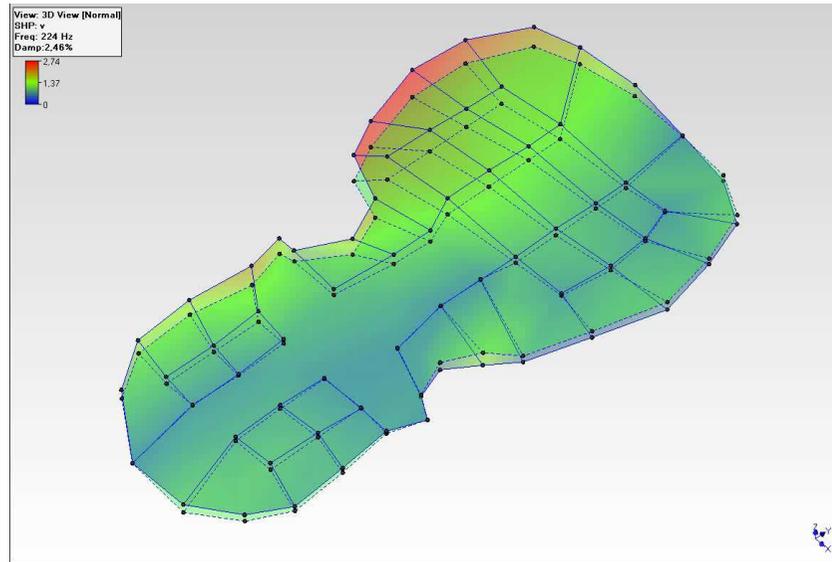
Si ottengono sequenze di fotogrammi nel tempo che consentono la ricostruzione visiva dei modi propri di oscillazione. I movimenti mettono maggiormente in evidenza la posizione dei nodi e dei ventri nonché le fasi di oscillazione dei diversi punti.

*Modo di oscillazione alla frequenza di 424 Hz che coincide con il primo modo di risonanza della tavola armonica.*

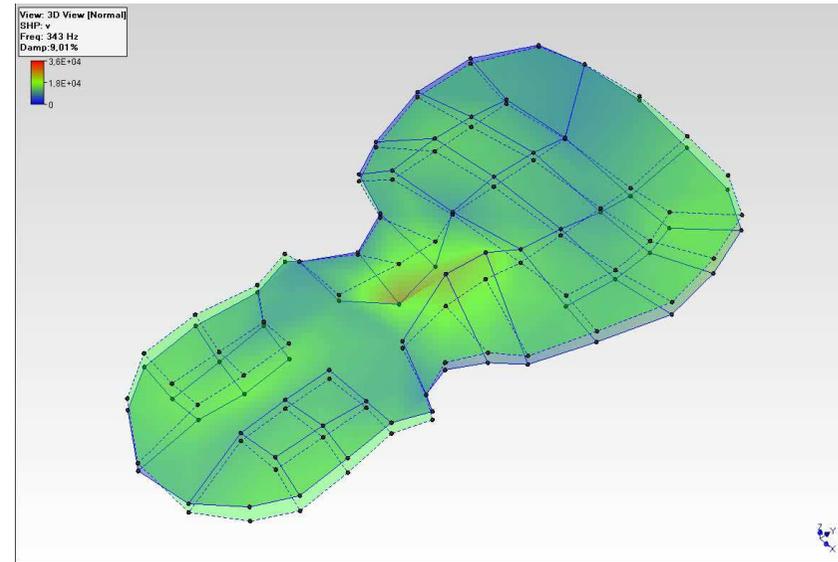
*E' importante osservare come tale modo è rilevato anche dall'analisi LPC effettuata con eccitazione diretta del ponticello.*



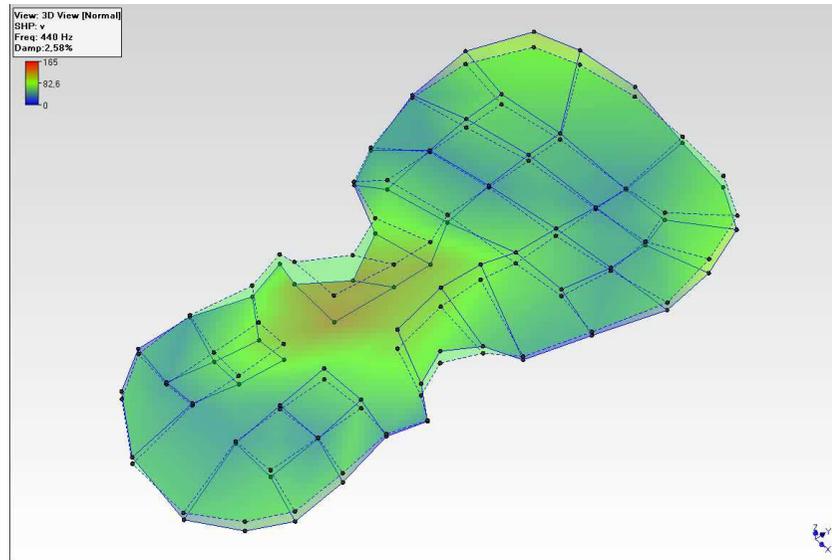
# L'analisi modale del corpo dello strumento



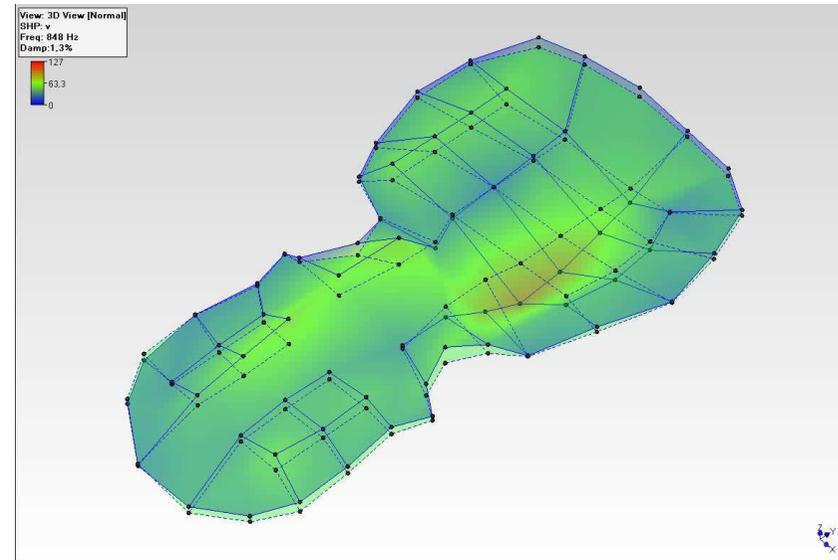
220 Hz



343 Hz



440 Hz



850 Hz 16

## ***L'analisi modale del corpo dello strumento***

**L'analisi modale è di grande aiuto al liutaio in quanto consente la misura diretta degli smorzamenti. Attraverso metodi di sollecitazioni meccaniche e continue della tavola è possibile ridurre lo smorzamento interno del legno con un processo di preparazione. E' ben noto ai violinisti come la resa acustica dello strumento cambi sensibilmente prima di un concerto se esso viene suonato per un breve tempo in una fase chiamata di riscaldamento.**

**La misura diretta dello smorzamento consente di prevedere, tra gli altri parametri, la resa dello strumento finito.**

## Le mappature acustiche

**Il fenomeno dell'irraggiamento del suono da parte del corpo dello strumento può essere evidenziato attraverso indagini intensimetriche che consentano di tracciare le linee di equilivello della componente attiva del vettore intensità ovvero della velocità acustica in prossimità dello strumento.**

**Il ponticello è sollecitato da una forza a larga banda e perpendicolare alla tavola ottenuta con un segnale casuale. La sonda intensimetrica p-p scorre su un piano parallelo alla tavola armonica e la sua posizione è individuata da un sistema ottico referenziato sull'immagine.**



*Sonda intensimetrica p-p con puntatore ad infrarossi per riferire il livello di intensità misurato alla posizione della sonda che verrà spostata in prossimità della tavola*

## ***Le mappature acustiche***

**Il campo acustico a pochi centimetri di distanza dalla tavola presenta componenti reattive tali da incidere sulla misura del gradiente di fase tra i due microfoni, se non si adottano particolari precauzioni.**

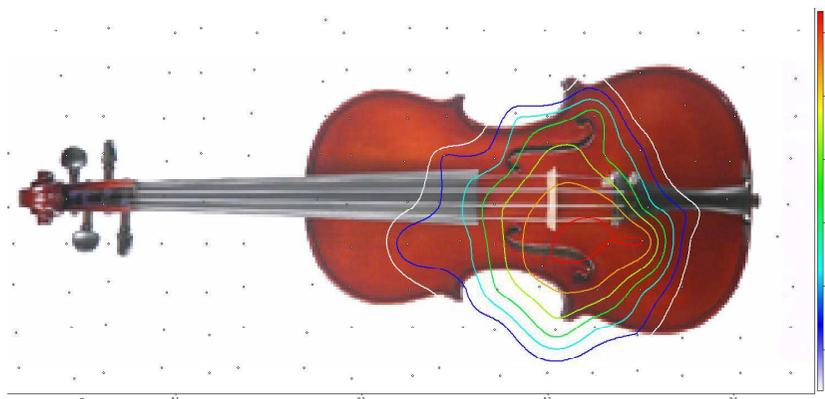
**La distanza fra i microfoni deve essere contenuta, la distanza della sonda dalla tavola deve essere superiore almeno a 5 volte la distanza dei microfoni.**

**L'indicazione fornita è legata anche alla forma curva della tavola armonica ed alla presenza di discontinuità di emissione sonora prodotte dai tagli ad  $f$  sulla tavola stessa.**

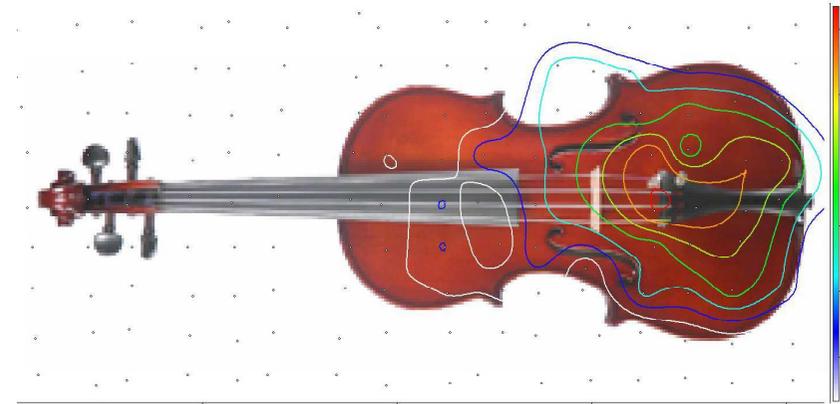


**Prima di eseguire una mappatura definitiva è importante effettuare delle prove al fine di scegliere una distanza tale che riduca per le frequenze importanti l'indice di pressione-intensità residua espresso dalla differenza fra il livello di pressione ed il livello di intensità.**

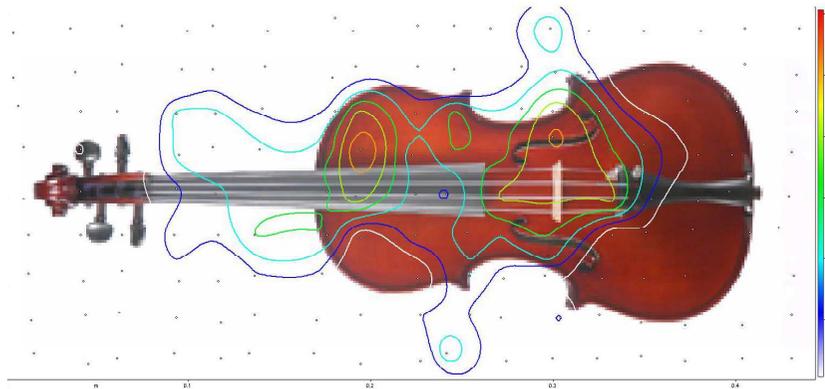
## *Le mappature acustiche*



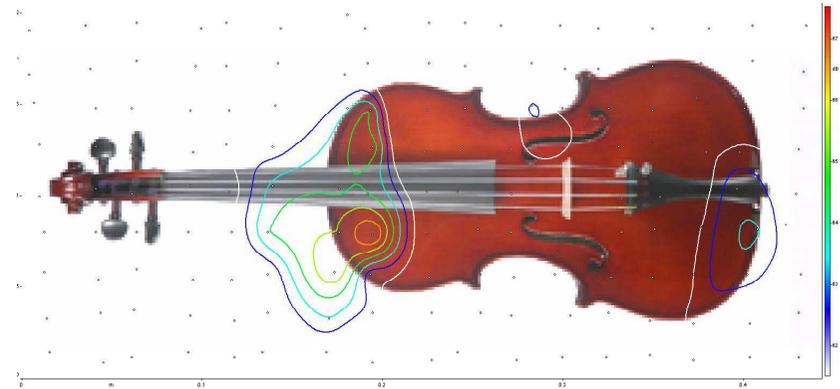
**Frequenza 430 Hz**



**Frequenza 898 Hz**



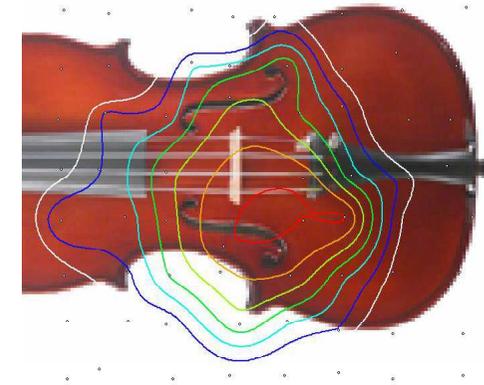
**Frequenza 1328 Hz**



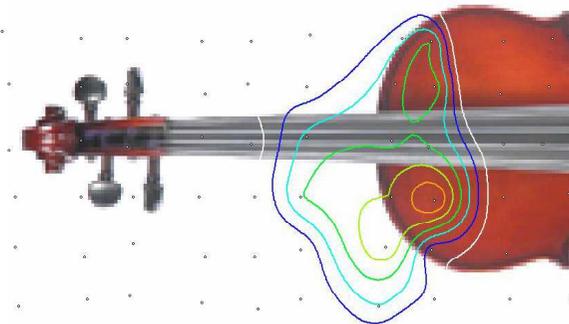
**Frequenza 1641 Hz**

## Come è possibile osservare...

la parte centrale del corpo dello strumento irraggia maggiormente il suono alla frequenza di 430 Hz che risulta essere il primo modo di risonanza della tavola armonica.



Si evidenziano altri modi i cui centri di irraggiamento si spostano in funzione della frequenza fino ad evidenziare una emissione sonora della tavola nell'incastro del manico alla frequenza di 1641 Hz.



Probabilmente tale modo risulta dalla combinazione della risonanza della tastiera con l'irraggiamento della tavola.