

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

DIPARTIMENTO DI TECNICA E GESTIONE DEI SISTEMI INDUSTRIALI

LAUREA TRIENNALE IN INGEGNERIA GESTIONALE

TESI DI LAUREA

**RICERCA DI NUOVI MATERIALI PER LA PRODUZIONE
DI CORDE PER STRUMENTI MUSICALI**

RELATORE: PROF. PAOLO FERRO

CORRELATORE: ING. FILIPPO BUSATO

LAUREANDO: DIEGO BERGAMIN (Matr. 580310)

ANNO ACCADEMICO 2010/2011

Indice

Sommario.....	4
Introduzione	5
CAPITOLO 1: Generalità sui Cordofoni.....	7
1.1. Introduzione	7
1.2. Le parti principali che compongono il violino	8
1.3. Nozioni di acustica applicate agli strumenti musicali	9
1.3.1. Vibrazione di una corda pizzicata.....	10
1.3.2. Vibrazione di una corda sfregata	11
1.4. Vibrazione del corpo del violino.....	14
1.5. Le corde antiche.....	16
1.6. Caratteristiche richieste da una corda	18
CAPITOLO 2: Gli Acciai	20
2.1. Acciai a Basso tenore di Carbonio	20
2.2. Acciai a Medio tenore di Carbonio.....	21
2.3. Acciai ad Alto tenore di Carbonio	22
2.4. Acciai Inossidabili.....	22
CAPITOLO 3: Processi di Produzione delle corde: La Trafilatura.....	24
3.1. Storia della Trafilatura	24
3.2. Generalità sull'operazione di Trafilatura	25
3.2.1. Le lavorazioni per deformazione plastica a freddo.....	26
3.2.2. Le proprietà meccaniche.....	27
3.2.3. Deformabilità plastica	27
3.2.4. L'incrudimento	28
3.3. Fasi di lavorazione	29
3.3.1. Pulizia meccanica o chimica: decapaggio.....	29
3.3.2. Preparazione dell'estremità del semilavorato	30
3.3.3. Lubrificazione	30
3.3.4. Calore sviluppato.....	30
3.4. Impianto fili.....	31
CAPITOLO 4: Analisi Microstrutturale	33
4.1. Oggetto dell'Analisi	33
4.2. Preparazione dei Campioni	33
4.2.1. Troncatura.....	34
4.2.2. Inglobamento	34
4.2.3. Preparazione Meccanica	35
4.3. Attacco chimico	37

4.4.	Analisi al Microscopio Ottico.....	39
4.4.1.	Generalità sulla Microscopia Ottica	39
4.4.2.	Micrografie	41
4.4.3.	Analisi delle micrografie	44
CAPITOLO 5: Analisi Meccanica		46
5.1.	Prova di Trazione	46
5.2.	Prove di Resistenza a Trazione.....	48
5.2.1.	Le grandezze più importanti per la caratterizzazione dei materiali.....	49
5.3.	Analisi dei Dati	54
5.4.	Osservazioni	55
5.5.	Prove di Microdurezza Vickers	59
5.5.1.	Impronte.....	60
5.5.2.	Misurazione dell'impronta	61
5.5.3.	Preparazione del campione.....	62
5.6.	Esecuzione del test sui campioni.....	62
5.7.	Osservazioni	65
CAPITOLO 6: Prove di Corrosione		67
6.1.	Introduzione	67
6.2.	Corrosione dei materiali metallici.....	67
6.3.	Tipi di corrosione.....	69
6.3.1.	Corrosione generalizzata.....	69
6.3.2.	Corrosione galvanica	69
6.3.3.	Corrosione interstiziale	70
6.3.4.	Vaiolatura (pitting)	70
6.3.5.	Corrosione intergranulare.....	70
6.3.6.	Dissoluzione selettiva	71
6.3.7.	Corrosione-erosione.....	71
6.3.8.	Tensocorrosione.....	72
6.4.	Rivestimenti metallici.....	72
6.5.	Tecniche di rivestimento.....	73
6.5.1.	Placcatura per laminazione	74
6.5.2.	Rivestimento a spruzzo	74
6.5.3.	Rivestimento per immersione	74
6.5.4.	Rivestimenti per diffusione	75
6.5.5.	Riduzione chimica.....	76
6.5.6.	Elettrodeposizione	76

6.6.	Prova di Corrosione	77
6.6.1.	Preparazione dei provini	78
6.6.2.	Esecuzione della prova.....	78
6.6.3.	Analisi dei campioni allo stereoscopio.....	79
6.7.	Osservazioni	83
CAPITOLO 7: Prove Acustiche.....		85
7.1.	Introduzione	85
7.2.	Onde sinusoidali.....	85
7.3.	L'uomo e la scienza del suono	86
7.4.	Caratteri Fisici, Musicali e Psicologici del suono.....	88
7.4.1.	La Sonorità	89
7.4.2.	L'Altezza	91
7.4.3.	La Durata	91
7.4.4.	Il Timbro	92
7.5.	Analisi dell'Emissione Sonora delle diverse corde.....	94
7.5.1.	Descrizione della prova	94
7.6.	Osservazioni	99
Conclusioni		101
Ringraziamenti		104
Bibliografia		105

Sommario

Le problematiche relative alle corde per strumenti musicali sono strettamente legate oltre che alla resa acustica anche alla resistenza meccanica e soprattutto chimica. Per questo motivo solitamente i materiali impiegati per questo scopo sono acciai armonici ad alto limite elastico rivestiti con materiali polimerici o metallici resistenti alla corrosione. Sfortunatamente tali rivestimenti non sono efficaci a lungo termine costringendo quindi la sostituzione delle corde già dopo qualche settimana dal loro utilizzo. Il lavoro di tesi consiste nell'individuare nuove tipologie di materiali come ad esempio acciai inossidabili (che non necessitano quindi di rivestimento). Si eseguiranno analisi metallurgiche, analisi della frattura, analisi di resistenza meccanica e chimica. Si dovrà inoltre testare la resa acustica dei nuovi materiali mediante confronto dell'analisi in frequenza con le corde attualmente presenti in commercio.

Introduzione

Questo lavoro di tesi riprende il lavoro eseguito dal laureando Enrico Berto con la sua tesi intitolata “Caratterizzazione Meccanica e Microstrutturale di Corde per Strumenti Musicali”.

Nella sua tesi, ha confrontato vari tipi di corde per chitarra acustica in commercio eseguendo analisi microstrutturali, meccaniche e acustiche per ciascuna corda.

Alla fine del suo lavoro si era lasciata in sospeso la possibilità di eseguire le stesse prove su materiali innovativi al fine di trovare dei validi sostituti alle corde tuttora in commercio.

Con questa tesi si intende riprendere quanto lasciato in sospeso eseguendo un confronto fra un filo di acciaio inox della qualità AISI 302 (in Appendice A è riassunta la composizione dell'acciaio forniteci dal produttore) e un diametro di 0,30 mm e un tipo di corda attualmente in commercio del diametro di 0,26 mm corrispondente alla nota Mi di frequenza 660 Hz.

Il filo di acciaio inox è stato gentilmente inviato dall'azienda TFA FILINOX.

Anziché con la chitarra, come nell'altra tesi, le corde in esame verranno suonate con un violino.

Dei due tipi di corda si cercherà di individuare e confrontare le caratteristiche microstrutturali, meccaniche e acustiche e la loro resistenza alla corrosione.

Le analisi sono state realizzate presso i laboratori del Dipartimento di Tecnica e Gestione dei Sistemi Industriali dell'Università di Padova.

Nel primo capitolo viene presentata una panoramica generale sulla classificazione dei cordofoni. Vengono descritte successivamente le parti principali del violino con i relativi principi di funzionamento ed alcune nozioni di acustica applicate agli strumenti musicali. Infine è stata riportata una breve trattazione sulla storia delle corde. Il secondo capitolo tratta gli acciai descrivendone la classificazione generale e le varie caratteristiche.

Nel terzo capitolo viene presa in considerazione la tecnica di produzione, la trafilatura, che permette di ottenere fili di diametri molto sottili come quelli oggetto dell'analisi.

Il quarto capitolo riguarda l'analisi metallografica delle corde attraverso la sola analisi microstrutturale in quanto le caratteristiche dell'acciaio inox ci sono state fornite con il campione di filo e la composizione della corda di violino sarà simile a quelle analizzate nella tesi menzionata precedentemente (acciaio armonico rivestito).

Il quinto capitolo descrive l'analisi meccanica costituita dalle prove di trazione e di microdurezza effettuate sui provini, ricavati dalle diverse corde. Da ciò si sono potuti determinare i valori di grandezze caratteristiche, quali il modulo di elasticità, carico di rottura e l'allungamento percentuale dopo rottura.

Il sesto capitolo riguarda le prove di corrosione che hanno evidenziato il comportamento delle diverse corde nei confronti del processo corrosivo.

L'ultimo capitolo è stato dedicato alla qualità del suono emesso da una corda e la sua composizione. Delle due corde verranno analizzati lo spettro delle frequenze e le caratteristiche del timbro.

CAPITOLO 1

Generalità sui Cordofoni

1.1. Introduzione

La categoria dei cordofoni comprende tutti gli strumenti il cui suono viene prodotto dalla vibrazione di corde tese. Secondo il mezzo di eccitazione, questi si distinguono in tre sottoclassi:

- 1) ad arco, quando la corda è posta in vibrazione dalla pressione di un archetto;
- 2) a pizzico, quando la vibrazione è prodotta “pizzicando” la corda direttamente con le dita, con un plettro o mediante un meccanismo comandato da tastiera;
- 3) a martelletti, quando la corda è percossa per mezzo di appositi martelletti azionati da tastiera.

Il principio fisico fondamentale, secondo cui “minore è la lunghezza del mezzo vibrante e più acuto sarà il suono prodotto”, parimenti valido per gli altri strumenti, va applicato, con lo stesso risultato, anche agli strumenti a corda.

Le corde possono essere di lino, seta, nylon, metallo (acciaio, ferro, ottone, rame) o minugia (budella di animali, specialmente ovini). Di norma vengono montate sullo strumento in modo che un'estremità risulti bloccata contro un elemento fisso (la cordiera), mentre l'altro capo è collegato a un dispositivo mobile (il pirolo o bischero) che ruotando aumenta o diminuisce la tensione della corda stessa, permettendole di raggiungere l'intonazione giusta. Una corda libera (cioè che vibra in tutta la sua lunghezza) emette una determinata nota; per ottenere ciascuna delle altre note si tocca la corda in un punto preciso premendola contro la tastiera (il manico) dello strumento (tastiera che può essere fornita di stanghette trasversali che facilitano l'intonazione, come nella chitarra, oppure libera come nel violino e negli strumenti della sua famiglia): così facendo il segmento vibrante della corda viene accorciato e l'altezza del suono cresce in proporzione permettendo di eseguire l'intera scala. I cordofoni includono anche strumenti suonati pizzicando le corde direttamente con le dita (tra cui numerose varianti di arpa, chitarra classica e liuto) o con un plettro (mandolino, banjo),

il clavicembalo e vari tipi di virginale. Per questi ultimi strumenti è prevista la presenza di una tastiera, come nel pianoforte. Il termine "archi" è oggi comunemente utilizzato per indicare violini, viole, violoncelli, contrabbassi e i loro predecessori nella musica antica.

1.2. Le parti principali che compongono il violino

Un violino è dotato di quattro corde, di acciaio o budello, intonate a Sol₂, Re₃, La₃ e Mi₄ (196, 294, 440 e 660 Hz). Corde di piccolo diametro spostano piccole quantità di aria e di conseguenza producono piccoli suoni. Tuttavia la vibrazione delle corde mette in vibrazione il corpo del violino amplificando la forza del suono prodotto. Il corpo del violino è costruito in modo da vibrare a un elevato intervallo di frequenze.

Una esplosione di un violino è visibile in Figura 1.1. La parte superiore del corpo è solitamente fatta di abete rosso, un legno leggero ma molto resistente ed elastico, adatto a trasmettere le vibrazioni, che a questo scopo viene selezionato di venatura diritta e regolare. La fascia laterale e il fondo sono in legno di acero dei Balcani un legno duro e più "sordo" il cui compito è quello di riflettere più che di trasmettere il suono. Due fori a f vengono intagliati nella tavola armonica e una striscia di legno detta catena è incollata sotto un piede del ponticello, mentre sotto l'altro piede si trova una piccola asticella di legno chiamata anima che si estende dalla parte superiore a quella inferiore del corpo. Le corde sono attaccate alla cordiera, passano per il ponticello, attraversano la tastiera e oltre il capotasto sono tesi dai pirolì o bischeri.

Le parti della montatura - come pirolì, capotasto, cordiera, reggicordiera, bottone - sono realizzati in legno duro da ebanisteria, soprattutto ebano, palissandro o bosso, capotasto e reggicordiera a volte sono in osso, la tastiera è quasi sempre di ebano, la cordiera a volte è di metallo, plastica o carbonio.

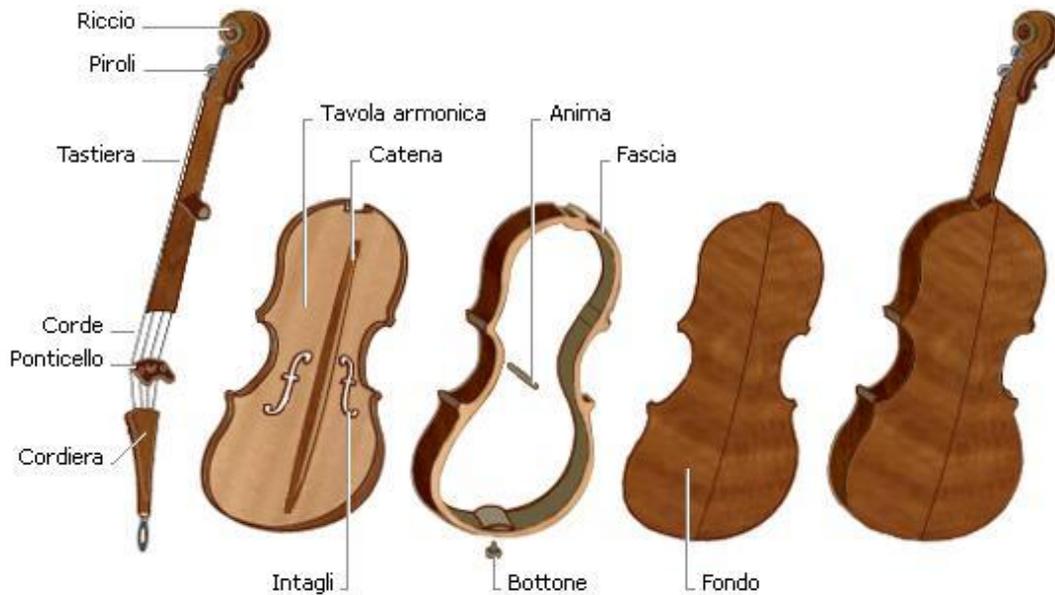


Figura 1.1 Parti del violino

La tavola armonica, costruita molto sottile per garantire precise proprietà di vibrazione, è sottoposta a una forza verticale esercitata dalle corde di circa 100 N. Senza l'anima e la catena la tavola armonica non sopporterebbe una simile pressione. Queste ultime hanno anche una importante funzione acustica oltre che strutturale in modo da trasmettere la vibrazione a tutta la tavola armonica (catena) e al fondo dello strumento (anima).

L'archetto è composto da un fascio di crini di cavallo tenuti in tensione da un'asticella di legno resistente e molto flessibile. La tensione dei crini può essere regolata tramite un meccanismo a vite chiamato nasetto. L'archetto ha una lunghezza di circa 73 cm. Per ottenere un maggiore attrito necessario per far vibrare le corde, il violinista passa i crini su di un composto di colofonia (detta comunemente "pece") ed altre resine che lascia sui crini una polvere fine e bianca con un lieve effetto adesivo.

1.3. Nozioni di acustica applicate agli strumenti musicali

Le corde del violino possono essere pizzicate con le dita o sfregate con l'archetto ottenendo un effetto diverso. La vibrazione della corda varia a seconda dei due metodi usati.

1.3.1. Vibrazione di una corda pizzicata

Quando una corda di uno strumento musicale viene eccitata sfregandola, pizzicandola o percuotendola il risultato della vibrazione può essere considerato come la combinazione dei modi normali di vibrazione e risonanza. Ad esempio una corda pizzicata al centro produce una vibrazione composta da quella fondamentale più le armoniche dispari.

La Figura 1.2 mostra come i modi associati alle armoniche dispari, quando ognuna di queste è presente nella giusta proporzione, possano sommarsi in un istante nel tempo per ottenere la forma iniziale della corda.

I modi 3, 7, 11, ecc., devono essere opposti in fase rispetto ai modi 1, 5, e 9 in ordine per avere un massimo nel centro.

Dato che tutti i modi mostrati in Figura 1.2 hanno diverse frequenze di vibrazione rapidamente vanno fuori fase e la forma della corda cambia rapidamente dopo essere stata pizzicata. Quello che accade è che due identici impulsi si propagano in direzioni opposte rispetto il centro. La forma della corda in ogni momento può essere ottenuta sommando i modi nelle rispettive proporzioni, ma è molto difficile fare questo perché ogni modo si trova in un punto diverso del suo ciclo.

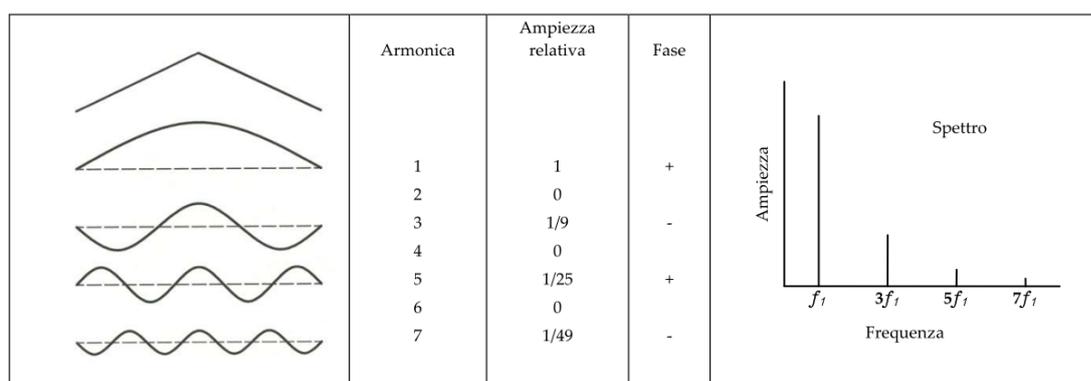


Figura 1.2 Modi dispari di vibrazione sommati nelle appropriate amplificazioni e fasi per una corda pizzicata al centro

Se la corda viene pizzicata in un punto diverso dal centro ovviamente la composizione dei modi costituenti è diversa. Per esempio se la corda viene pizzicata a un quinto della sua lunghezza le proporzioni dei vari modi sono mostrati in Figura 1.3. Si può notare inoltre che la quinta armonica è mancante. Se la corda venisse pizzicata a un quarto

verrebbe soppressa la quarta. Nell'esempio della corda pizzicata a metà mancava la seconda armonica e di conseguenza ogni multiplo di essa.

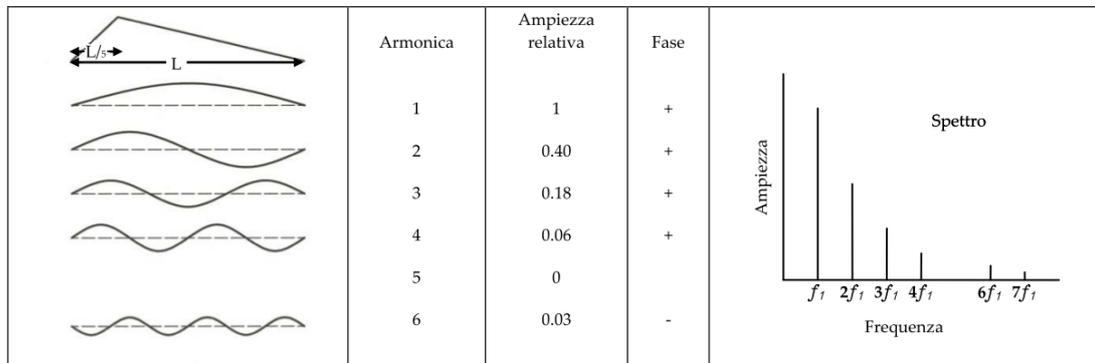


Figura 1.3 Somma dei modi per ottenere la forma di una corda pizzicata a un quinto della sua lunghezza

In generale se la corda di lunghezza L viene pizzicata a una lunghezza L/n mancherà l'armonica n . Si può notare però che a parità di frequenza di vibrazione nelle Figure 1.2 e 1.3 l'ampiezza relativa è leggermente diversa a causa delle proprietà acustiche dello strumento.

1.3.2. Vibrazione di una corda sfregata

Quando l'arco viene fatto passare sulla corda di un violino, la corda sembra vibrare avanti e indietro tra due confini curvi simili a una corda libera che vibra nel suo modo fondamentale (la seconda curva nella Figura 1.2).

Ma la semplicità del moto è apparente. Se noi eseguiamo fotografie ad alta velocità alla corda sfregata con l'archetto, ci accorgeremo che la corda in realtà è quasi rettilinea con una curva a gomito in un punto; in certi istanti la curva a gomito è identica alla forma iniziale rappresentata nelle Figure 1.2 e 1.3. Più di cento anni fa Hermann Von Helmholtz scoprì cosa realmente accade. Il profilo a gomito corre lungo i confini curvi che si vedono, ma lo fa a una velocità tale che i nostri occhi non sono in grado di apprezzarne il percorso e così vediamo solo i confini.

Durante gran parte della vibrazione la corda è soggetta all'azione dell'archetto. Successivamente si stacca di colpo e torna rapidamente fino a quando non viene

catturato di nuovo dall'archetto in movimento. Il moto della corda è mostrato nella Figura 1.4.

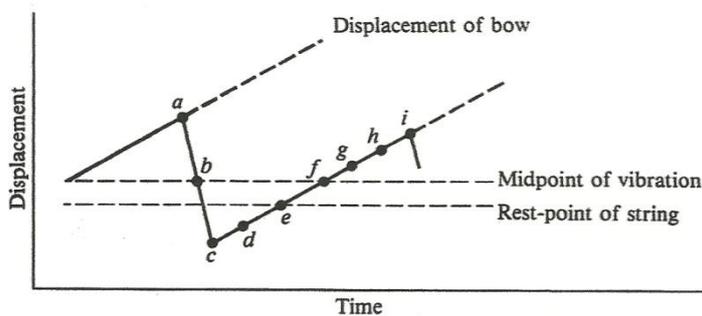


Figura 1.4

Spostamento di archetto e corda al punto di contatto. Da notare che il punto medio di vibrazione è leggermente spostato rispetto al punto di riposo della corda

Fino al punto di rilascio *a* e ancora da *c* a *i*, la corda si muove alla velocità costante dell'archetto. Da *a* a *c*, la corda ha un rapido ritorno finché non viene catturata in un punto differente dell'archetto.

La relazione tra il movimento a dente di sega in Figura 1.4 e il moto dalla piega che percorre avanti e indietro la corda può essere compreso meglio con riferimento alla Figura 1.5 che mostra la corda in successivi istanti del ciclo di vibrazione. All'istante di rilascio (*a*) la piega ha appena superato l'arco. In (*b*) la curva ha raggiunto il ponticello dal quale viene riflessa e comincia a percorrere la parte inferiore del profilo in (*c*), (*d*) e (*e*) finché non raggiunge la sommità in (*f*) e viene nuovamente riflessa. Al punto *c* in Figura 1.4 e di conseguenza in (*c*) di Figura 1.5 la corda è catturata dall'archetto e muove verso l'alto alla velocità di questo. Nella serie di figure rappresentate a destra nella Figura 1.5 l'archetto è stato tolto e la velocità della corda è indicata dalle frecce.

L'aderire e "scivolare" della corda contro l'archetto in movimento è determinata in parte dall'attrito tra i crini e la corda. È noto che la forza di attrito tra due oggetti è minore quando i due scorrono l'uno sull'altro rispetto quando muovono insieme senza slittamento. Una volta che la corda comincia a scorrere, essa si muove abbastanza liberamente finché non è catturata nuovamente dall'archetto.

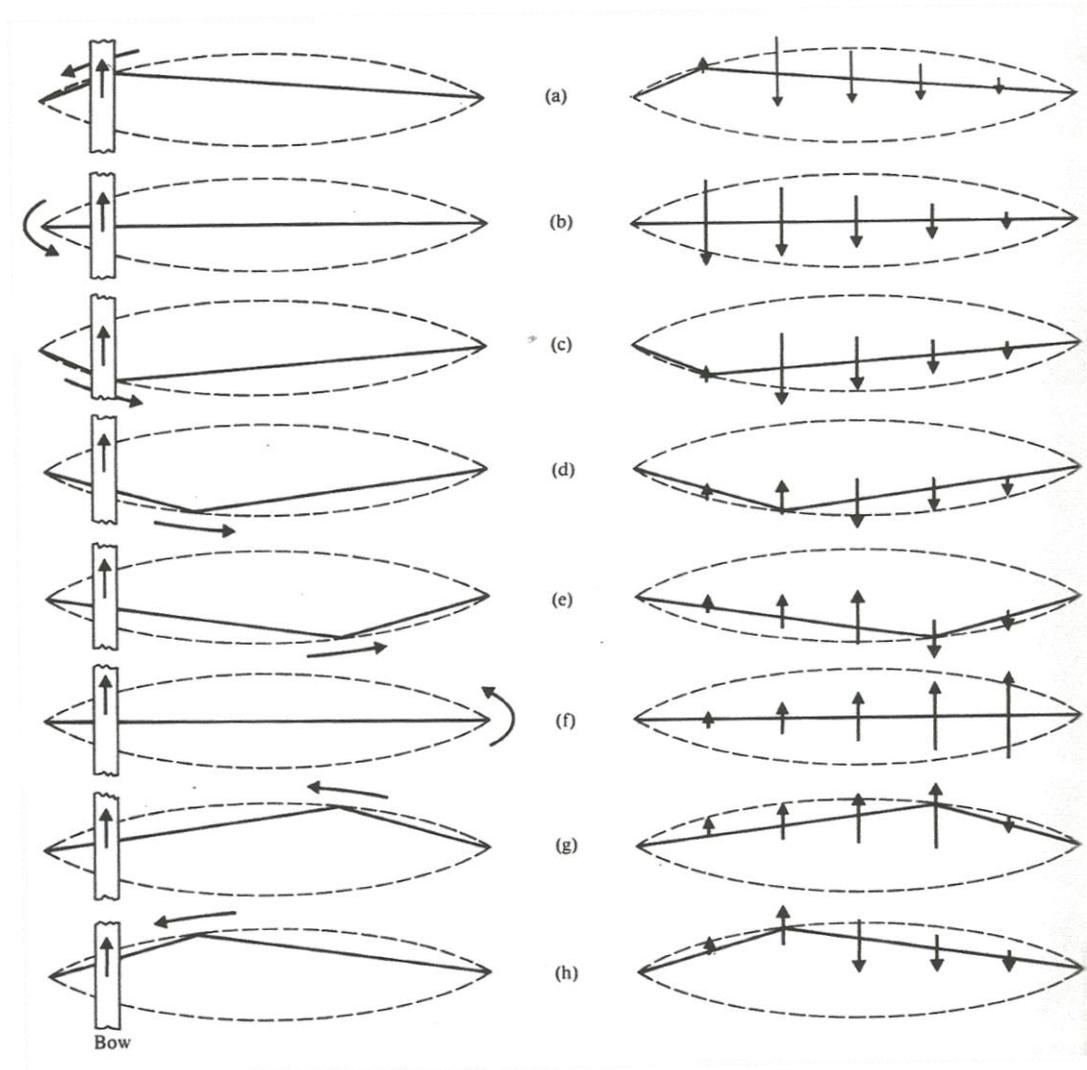


Figura 1.5 forma in istanti successivi durante il ciclo di vibrazione di una corda sfregata

È importante notare comunque che l'inizio e la fine dello slittamento è innescato dall'arrivo della piega (lo slittamento comincia quando la piega arriva dal capotasto e finisce quando arriva di nuovo dal ponticello).

Siccome il tempo richiesto per un giro completo dipende dalla lunghezza della corda e dalla velocità dell'onda (la quale, a sua volta dipende dalla tensione e dalla massa), la frequenza di vibrazione di una corda rimane la stessa anche al variare delle condizioni di sfregamento. Se l'attrito da solo determina l'inizio e la fine dello slittamento, la vibrazione sarebbe irregolare anziché regolare.

I limiti alle condizioni di sfregamento sono i limiti alle condizioni alle quali la curva può innescare l'inizio e la fine dello slittamento tra arco e corda. Per ogni posizione dell'arco, esiste una forza di sfregamento massima e una minima. Più vicino al

ponticello si passa l'archetto, minore è l'intervallo tra la forza massima e minima di sfregamento che il violinista deve imprimere. Suonando vicino al ponticello si ottiene un suono brillante e forte ma richiede una notevole forza e la mano ferma di un violinista esperto. Suonare lontano dal ponticello produce un suono gentile ma meno brillante.

Un ulteriore studio della Figura 1.5 ci aiuterà a capire come l'ampiezza della vibrazione è determinata dalla velocità e dalla posizione dell'arco. Poiché la velocità della piega attorno al percorso curvo è essenzialmente indipendente dalla velocità e posizione dell'arco, l'ampiezza della vibrazione può aumentare o a causa dell'incremento di velocità o a causa dell'avvicinamento al ponticello dell'arco. In un punto vicino al ponticello la curva di spostamento della corda è simile a quella in Figura 1.4 e invertendo il moto dell'arco la curva viene specchiata rispetto all'asse e così la piega in Figura 1.5 che si muoveva in senso orario si muove in senso antiorario. Al centro della corda invece la velocità della corda (pendenza della curva di spostamento) è la stessa in entrambe le direzioni.

La corda che vibra trasmette una forza laterale sul ponticello che a sua volta la trasmette alla tavola armonica. Nel caso ideale di una corda completamente flessibile che vibra tra due estremi fissi, questa forza ha una forma a dente di sega con uno spettro delle armoniche che varia in ampiezza come $1/n$. In pratica la forma dell'onda della forza è modificata dalla rigidità della corda, dalle proprietà meccaniche del ponticello e da altri fattori.

1.4. Vibrazione del corpo del violino

Un importante fattore della qualità del suono di un violino è il comportamento vibrazionale del suo corpo. Spesso lo si descrive in termini di normali modi di vibrazione, che consistono nei moti accoppiati della tavola armonica, del fondo e dell'aria racchiusa. Minori contributi sono dati anche dalla fascia laterale, dal collo e dalla tastiera.

Per determinare i modi normali di vibrazione, è consuetudine applicare una forza oscillante al ponticello e osservare il movimento delle varie parti del violino. Questo

può essere fatto elettricamente tramite accelerometri o otticamente per mezzo di interferometria olografica.

Nella Figura 1.6 sono illustrati sei modi di vibrazione a bassa frequenza di un violino.

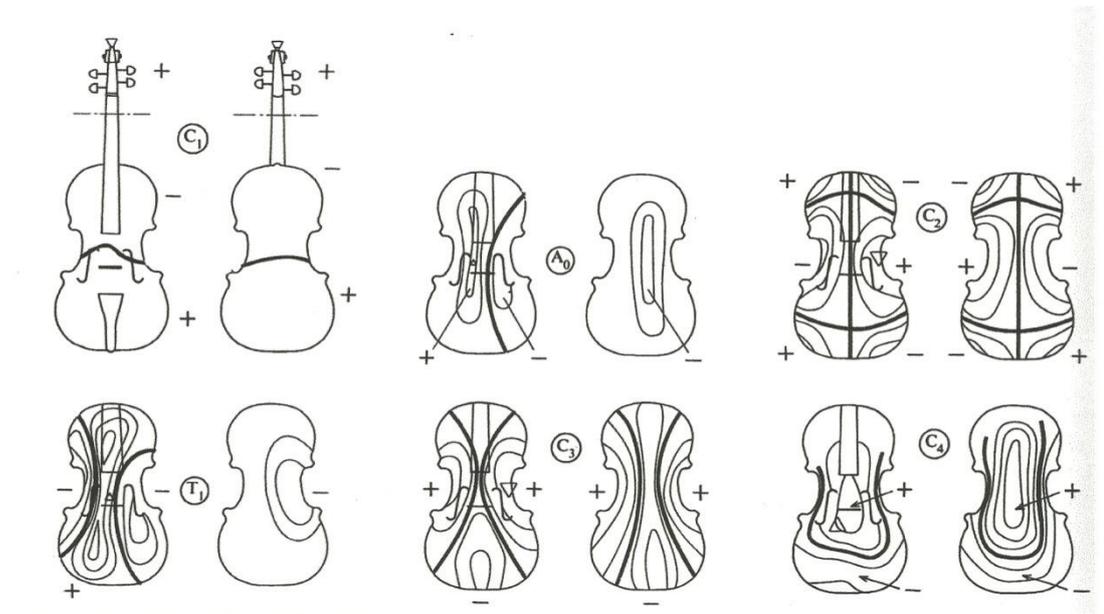


Figura 1.6 Forme modali per sei modi di vibrazione in un violino:

C_1 (185 Hz): flessione monodimensionale

A_0 (275 Hz): flusso d'aria in ingresso e in uscita dai fori a f

C_2 (405 Hz): flessione bidimensionale

T_1 (460 Hz): movimento principale della tavola armonica

C_3 (530 Hz), C_4 (700 Hz): flessione bidimensionale

Tavola armonica e fondo sono mostrati per ciascun modo. Le linee spesse indicano linee nodali; la direzione del moto è indicata da + o -. Il punto guida è indicato da un piccolo triangolo.

I modi del corpo ("corpus") C_1 e C_2 irradiano un piccolo suono, anche se contribuiscono all'effetto finale. Gli altri quattro modi sono indicati nella curva di risposta in frequenza in Figura 1.7 dove la coordinata verticale è la velocità divisa la forza (chiamata *ammettenza meccanica* o *mobilità*).

Entrambi i modi A_0 ("aria") e T_1 ("top") coinvolgono un notevole movimento di aria dentro e fuori i fori a f . Questi modi irradiano il suono in maniera efficace e sono dominanti nello spettro sonoro a bassa frequenza di molti violini.

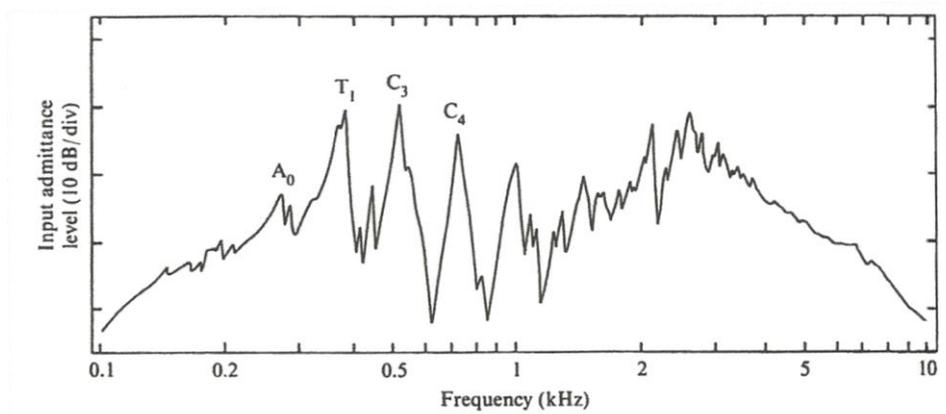


Figura 1.7 Ammettenza d'ingresso (mobilità del punto guida) di una violino Guarnieri spinto sul fondo

Sopra 1 kHz, i modi di vibrazione o risonanza sono raggruppati assieme, come si può notare nella figura ed è difficile identificare i modi individuali. Di interesse considerevole è la concentrazione della risonanza tra i 2 e i 3 kHz.

1.5. Le corde antiche

Le corde antiche erano fabbricate da un unico materiale: il budello.

Il budello è un materiale il cui impiego si perde nella notte dei tempi; si sono infatti ritrovate tracce di corde di budello in alcuni liuti egizi del XIV sec a.C.

Si può quindi presumere che il primo materiale usato dall'uomo per produrre una corda, o perlomeno qualcosa di molto simile, fu il budello, e in particolare quello d'agnello.

Un altro materiale è in possesso delle stesse caratteristiche del budello: la seta. Questa pregiatissima fibra era ugualmente usata nella produzione di corde per strumenti musicali. La sua diffusione fu molto maggiore nell'est europeo che non nel bacino del Mediterraneo, e questo essenzialmente a causa della sua scarsa diffusione e difficoltosa reperibilità.

Si vedrà ora quali sono stati i processi di lavorazione per produrre una corda nel tempo: già nel Medioevo i processi di fabbricazione delle corde, elaborati dai musicisti stessi, erano già sorprendentemente simili a quelli moderni; secondo una particolare ricetta del XV sec, le budella d'agnello, ma talvolta anche di lupo o cinghiale, svuotate

al più presto dal materiale fecale, si lasciavano a lavare in acqua corrente per un tempo che poteva variare dalle 10 alle 20 ore; si separavano quindi dalle membrane non muscolari e dalle materie grasse immergendole in soluzioni di *lexivia*, una miscela a base d'acqua a concentrazione variabile di cenere di vite.

I budelli così sgrassati venivano poi riuniti, tesi e fatti essiccare grazie ad un apposito telaio. Le corde erano a questo punto pronte per l'utilizzo; necessitano solo di una breve levigata per mezzo di particolari erbe con proprietà leggermente abrasive.

Sebbene questo procedimento fosse in linea di massima rispettato da tutti, nel corso del XV e XVI sec., poiché erano i musicisti stessi a fabbricarsi le corde in base alle loro esigenze, si possono riscontrare significative varianti nella realizzazione di corde e strumenti.

Prese così diffusione la figura professionale del "cordaio".

Dotato di abilità ed esperienza, il cordaio perfezionò e razionalizzò tutte le tecniche manifatturiere medievali portando le qualità acustiche delle corde in budello naturale ai massimi livelli. Per tutto il '500 il cordaio fu l'unico a conoscere i segreti di lavorazione del budello naturale, e questo è dimostrato dal fatto che in questo periodo scomparvero totalmente manuali, ricette, reperti che ci potrebbero spiegare oggi l'arte del cordaio: tutto era fatto e tramandato nel più assoluto riserbo.

Verso la seconda metà del '500 si assisterà ad un importantissimo quanto repentino mutamento nella morfologia degli strumenti a corda: si verificò una generale contrazione delle lunghezze vibranti di esercizio, senza però variare l'intonazione adottata in precedenza: recenti studi hanno dimostrato che queste improvvise modifiche sono da ricondurre all'applicazione pratica di un'idea assolutamente rivoluzionaria: l'incremento del peso specifico del budello.

Fonti iconografiche come quelle di Francois de Troy, o quelle di Evaristo Baschenis, presentavano dei particolari piuttosto strani: le corde degli strumenti in queste opere appaiono colorate stranamente, il che è difficilmente giustificabile con motivazioni puramente ornamentali.

La colorazione dei bassi poteva essere conseguenza di un processo tecnologico innovativo introdotto verso la fine del XVI sec. sul budello, mirante ad incrementare la

densità del materiale e a fornire corde di ridotto diametro, e quindi di riflesso, più elastiche.

Prima di arrivare alle corde moderne, i cordai sono dovuti passare attraverso le conseguenze di un'altra fase rivoluzionaria: qualche geniale artigiano del '600 ebbe infatti la brillante idea di ricoprire una normale corda di budello con un sottile filo metallico, ottenendo risultati acustici assolutamente prima d'allora impensabili.

Non si sa assolutamente cosa spinse questo geniale cordaio, a detta di alcuni un inglese, a sperimentare questa prima filatura di corde in budello; le ipotesi in questo senso si sprecano, ma bisogna ammettere che si tratta sempre e solo di ipotesi, non avvalorate da nessuna fonte certa.

Unico dato certo è che questa invenzione di filare le corde non fu recepita subito dai cordai di altri paesi; in grande ritardo in particolar modo le recepì l'Italia, fino a quel momento paese leader nella costruzione di strumenti musicali e rispettivi "accessori"; questo sensibile ritardo non fece tuttavia perdere quel ruolo di primo piano che il nostro paese ancora oggi detiene.

L'influenza in campo organologico di questa scoperta fu assai profonda e, contrariamente a quanto accadde prima, perfettamente documentata: solo dal 1600 infatti si poté disporre di strumenti con corde al grave realmente agili ed esuberanti; queste loro nuove caratteristiche erano permesse proprio da questi metalli, in genere alluminio, oro, argento, che permettevano grandi tensioni unite a spiccate capacità vibratorie. Da questo momento la necessità dei cordai di saper fabbricare corde con un peso specifico incrementato e di natura estremamente elastica non esisteva più: un sottile filo metallico intorno ad un'anima di budello bastava ad ottenere una corda notevolmente sonora, agile e resistente. L'epoca delle corde in budello era definitivamente finita.

1.6. Caratteristiche richieste da una corda

Affinché una corda possa adempiere in modo ottimale al suo compito deve possedere determinate caratteristiche che, se presenti, permettono di migliorarne il rendimento acustico e meccanico.

Le corde, per un migliore “rendimento acustico e meccanico”, devono presentare:

- 1) Elevata elasticità, ossia un elevato carico di snervamento (σ_y).
- 2) Elevata densità lineare “ μ ” (o massa per unità di lunghezza, $\mu=m/L$). Maggiore è la densità lineare della corda e maggiore sarà l’energia trasmessa alla cassa armonica per inerzia.
- 3) Bassa rigidità (maneggevolezza), ossia limitando il valore del modulo di elasticità (E).
- 4) Resistenza alla corrosione (sia per l’aspetto meccanico, sia per l’aspetto visivo e acustico).
- 5) Resistenza alla fatica (responsabile della rottura delle stesse).
- 6) Devono essere costituite da materiali che permettono di ottenere una buona lavorabilità limitando i costi di produzione.

I metalli (in particolare gli acciai), sono fra i materiali che meglio rispondono a queste esigenze.

La resistenza alla corrosione può essere controllata attraverso l’uso di rivestimenti esterni o l’uso di acciai inossidabili. In particolare gli acciai inox austenitici, oltre ad eliminare il problema della corrosione, potrebbero presentare una migliore resistenza a fatica a causa dell’assenza di un rivestimento.

L’elevata elasticità può essere ottenuta mediante l’aggiunta in lega del carbonio che permette di innalzare il carico di snervamento (σ_y).

L’uso degli acciai può soddisfare anche la necessità di avere una maggiore densità lineare rispetto, per esempio, alle leghe leggere.

Visto il minor modulo di elasticità, le leghe leggere risulterebbero più maneggevoli rispetto agli acciai, ma non vengono prese in considerazione a causa del loro basso peso specifico e a causa del loro basso carico di snervamento.

I materiali metallici possono anche soddisfare la necessità delle corde di avere una bassa rigidità, corrispondente ad un basso valore del modulo di elasticità (E), per ipotesi attraverso le leghe di alluminio.

Considerando il “rendimento acustico”, saranno migliori le corde che presentano nella loro emissione sonora comportamenti più o meno ricchi di armoniche. Tali comportamenti possono essere traducibili in suoni più o meno “colorati”.

CAPITOLO 2

Gli Acciai

Gli acciai sono leghe ferro-carbonio che possono contenere concentrazioni apprezzabili di altri elementi in lega. Le proprietà meccaniche risultano sensibili al contenuto di carbonio, normalmente inferiore a 1,0% in peso. I più comuni acciai sono classificati secondo la concentrazione di carbonio in tipi a basso, medio e alto carbonio. Esistono anche delle sottoclassi entro ogni gruppo corrispondenti alla concentrazione di altri elementi in lega. Gli acciai comuni al carbonio contengono solo concentrazioni residue di impurità oltre al carbonio e un po' di manganese. Per gli acciai legati, più elementi in lega vengono intenzionalmente aggiunti in concentrazioni specifiche.

2.1. Acciai a Basso tenore di Carbonio

Di tutti i diversi acciai, quelli prodotti in maggiori quantità rientrano in questa classificazione e generalmente contengono meno dello 0,25% in peso di C. Questi acciai sono relativamente teneri e poco resistenti, ma hanno una notevole duttilità e tenacità; in più sono lavorabili, saldabili e meno costosi da produrre. Applicazioni tipiche includono componenti della carrozzeria dell'automobile, forme strutturali, lamiere utilizzate nelle tubazioni, in edilizia, ponti e lattine per bevande.

Tipicamente hanno un carico di snervamento di 275 MPa, resistenza a trazione tra 415 e 550 MPa e una duttilità di 25% A.

Un altro gruppo di acciai a basso tenore di carbonio sono gli **acciai ad alta resistenza, basso legati (HSLA)**. Tali acciai contengono altri elementi in lega come rame, vanadio, nichel e molibdeno in concentrazione non superiore al 10% in peso e possiedono resistenza più alta rispetto agli acciai a basso tenore di carbonio. Possono essere rafforzati mediante trattamenti termici, arrivando a resistenze superiori a 480 MPa; in più sono duttili, formabili e lavorabili all'utensile e più resistenti alla corrosione.

2.2. Acciai a Medio tenore di Carbonio

Gli acciai a medio tenore di carbonio hanno una concentrazione di carbonio compresa tra 0,25 e 0,60% in peso. Tali leghe possono essere trattate termicamente per austenitizzazione, raffreddamento e tempra in modo da migliorare le loro proprietà meccaniche. Vengono spesso utilizzati nello stato temprato, avente la struttura della martensite. Gli acciai a medio carbonio hanno una bassa temprabilità¹ e possono essere trattati termicamente con successo soltanto per sezioni molto sottili e con velocità di raffreddamento molto rapide. Addizioni di cromo, nichel e molibdeno migliorano le capacità di queste leghe ad essere trattate termicamente, dando origine a una varietà di combinazioni resistenza-duttilità. Queste leghe trattate termicamente sono più forti degli acciai a basso tenore di carbonio, a discapito della duttilità e tenacità. Tra le applicazioni troviamo ruote ferroviarie e binari, ingranaggi, alberi e altre parti di macchine e componenti strutturali ad alta resistenza che richiedono combinazioni di alta resistenza meccanica, all'usura e tenacità.

La Society of Automotive Engineers (SAE), l'American Iron and Steel Institute (AISI) e l'American Society for Testing and Materials (ASTM) sono responsabili della classificazione degli acciai così come di altre leghe.

La denominazione AISI/SAE per questi acciai è un numero a quattro cifre: le prime due indicano il contenuto della lega; le ultime due la concentrazione del carbonio. Per gli acciai al carbonio, le prime due cifre sono 1 e 0; gli acciai sono designati da altre due combinazioni di cifre (ad esempio 13, 41, 43). La terza e quarta cifra rappresentano il percento in peso di carbonio moltiplicato per 100. Così un acciaio 1060 contiene 0,60% in peso di C.

Un sistema unificato (UNS) è utilizzato in modo uniforme per indicare sia leghe ferrose che non ferrose. Ogni numero UNS consiste in una lettera singola di prefisso seguita da cinque cifre. La lettera indica la famiglia dei metalli a cui la lega appartiene, seguita dal numero AISI/SAE e la quinta cifra è 0.

¹ Temprabilità è un termine che viene usato per descrivere la capacità di una lega ad essere indurita mediante formazione di martensite ottenuta con un determinato trattamento termico.

2.3. Acciai ad Alto tenore di Carbonio

Gli acciai ad alto tenore di carbonio, normalmente hanno un contenuto in carbonio compreso tra 0,60 e 1,4% in peso e sono più duri, più forti e meno duttili di tutti gli acciai al carbonio. Sono usati praticamente soltanto negli stati indurito e temprato e sono particolarmente resistenti all'usura e capaci di mantenere un profilo tagliente. Per questo motivo si usa questo tipo di acciaio per utensili e stampi aggiungendo cromo, vanadio, tungsteno e molibdeno. Questi elementi in lega formano, combinati col carbonio, carburi molto duri e resistenti all'usura. Gli acciai ad alto contenuto di carbonio sono utilizzati per utensili da taglio e stampi per la formatura e la messa in forma di materiali, e inoltre per coltelli, rasoi, lame per seghetti e fili ad alta resistenza.

2.4. Acciai Inossidabili

Gli acciai inossidabili sono altamente resistenti alla corrosione (ruggine) in molti ambienti e in special modo in quello atmosferico. Il loro elemento di lega principale è il cromo di cui è richiesta una concentrazione di almeno 11% in peso. La resistenza alla corrosione può essere aumentata anche attraverso l'aggiunta di nichel e molibdeno.

Gli acciai inossidabili (o inox) si dividono in tre classi sulla base della fase predominante nella microstruttura, ovvero martensite, austenite o ferrite.

Un vasto campo di proprietà meccaniche unite a un'eccellente resistenza alla corrosione, rendono gli acciai inossidabili estremamente versatili nelle applicazioni.

Gli acciai inossidabili martensitici possono essere trattati a caldo in modo che la martensite risulti costituente primario. Aggiunte di altri elementi in lega in concentrazioni significative producono alterazioni notevoli nel diagramma di fase ferro-carburo di ferro (Fe_3C). Per gli acciai inossidabili austenitici, il campo dell'austenite (o γ) si estende a temperature ambiente. Gli acciai inossidabili ferritici sono induriti e rafforzati tramite lavorazione a freddo dato che non possono essere trattati termicamente. Gli acciai austenitici sono i più resistenti alla corrosione a causa dell'elevato contenuto di cromo e delle aggiunte di nichel; sono quelli prodotti in

maggior quantità. Gli acciai inossidabili sia martensitici che ferritici sono magnetici; quelli austenitici no.

Alcuni acciai inossidabili sono frequentemente impiegati a elevate temperature e in ambienti aggressivi vista la loro resistenza alla corrosione e la loro capacità di mantenere l'integrità meccanica in tali condizioni; il limite di temperatura in atmosfera ossidante è di circa 1000°C. Le apparecchiature che impiegano questo tipo di acciai includono turbine a gas, generatori di vapore ad alta temperatura, forni per trattamenti termici, aerei, missili e generatori di potenza nucleari.

CAPITOLO 3

Processi di Produzione delle corde: La Trafilatura

3.1. Storia della Trafilatura

Negli ultimi anni che segnano il passaggio dall'ottocento al novecento, nel periodo del governo giolittiano, l'economia registrava nelle regioni situate in prevalenza al nord, uno stimolo senza precedenti nell'industrializzazione. Anche se vi erano alcuni problemi di viabilità e di trasporto, il circondario lombardo rivestiva un ruolo di punta nel lento ma significativo cammino dell'industrializzazione in Italia. Nella provincia di Lecco si era potuto contare come sostegno, su alcuni fattori quali le scelte di governo in materia politico commerciale. Inoltre vi era la presenza di un ceto imprenditoriale molto attivo e dinamico e di una popolazione laboriosa, pronti entrambi a rispondere con entusiasmo alle richieste provenienti dal resto dell'Italia e anche dall'estero. In Lombardia la situazione industriale, era centrata sulla piccola dimensione ed è facile intuire come il lavoro da dipendente precedeva spesso la fase del "mettersi in proprio" dopo che si era appreso il mestiere. Essi seppero ingegnarsi per introdurre quelle innovazioni che avrebbero rivoluzionato il metodo di lavoro. Una delle branche della metallurgia che si sviluppò fu la trafilatura della vergella.

La trafilatura del ferro, avveniva già prima del 1850 con la sola forza delle braccia e comportava rilevanti sforzi all'operaio e delle condizioni di lavoro pessime. Dopo il 1850 apparvero ad alleviare le fatiche i primi rocchetti (dispositivi per avvolgere il filo) azionati dalla forza idraulica. Aumentò così la produzione, ma non esistendo ancora macchine capaci di trafilare in successione, il filo doveva essere caricato e scaricato sui rocchetti più volte prima di raggiungere la giusta calibratura. La vera ascesa industriale, avvenne nel primo decennio del 1900, quando fu introdotto l'uso del motore elettrico negli impianti di produzione. Inizialmente, il cuore della macchina altro non era che una piastra dove era praticato un foro con un punteruolo e in esso era fatto passare il filo per la riduzione di diametro. Con l'avvento delle nuove tecnologie e lo studio di nuovi materiali negli anni '50, furono introdotti gli utensili per trafilare

(filiera) a sagomatura conica con nocciolo in widia che permettevano una calibratura ottima, tolleranze ristrette ed una più rapida intercambiabilità.

3.2. Generalità sull'operazione di Trafilatura

L'operazione di trafilatura fa parte delle lavorazioni meccaniche senza asportazione di truciolo e può essere eseguita sia a caldo che a freddo. Utilizza la plasticità del materiale, in pratica la sua capacità di mantenere la forma acquistata sotto l'azione di una forza deformante, quando questa è superiore al suo limite d'elasticità; nel caso della trafilatura parleremo di duttilità o trafilabilità che propriamente è l'attitudine di un materiale ad essere trasformato in fili senza rompersi. Questa proprietà tecnologica è tipica dei materiali tenaci che hanno quindi un elevato allungamento e resistenza a trazione ma sono meno duri. Tutto consiste nel far passare attraverso un utensile denominato filiera (o matrice) il materiale da deformare per ridurne e sagomarne la sezione. Il materiale è tirato meccanicamente dalla parte opposta alla sezione d'entrata del foro e subisce una deformazione a causa delle sollecitazioni sia di trazione sia di compressione, le quali determinano il restringimento della sezione e l'aumento della lunghezza.

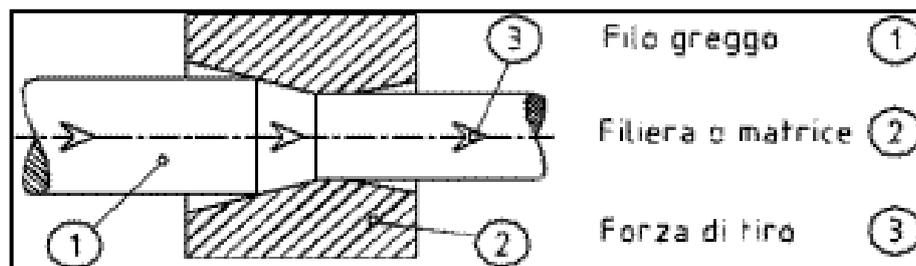


Figura 3.1 Schema della filiera

Il materiale è deformato in compressione, ma la forza di deformazione è fornita dalla forza di trazione. Per questo si afferma che la deformazione è data da una compressione indiretta.

L'operazione si esegue a temperatura ambiente; il filo è stirato attraverso una o più filiere successive con foro calibrato. Quest'ultime sono gli utensili usati per trafilare: in genere sono costituite da un nucleo di materiale molto duro (acciaio super rapido,

carburi sinterizzati o diamante) detto pasticca, che presenta un foro calibrato imbutiforme, ed incastonato in un anello metallico.

Il materiale passando attraverso il foro della filiera, è costretto ad assumere la forma e le dimensioni della sezione del foro, e subisce un allungamento in rapporto alla direzione di sezione cui è stato sottoposto.

Occorre sottoporre gli acciai ad un opportuno trattamento d'addolcimento prima della trafilatura, ed eventualmente inserire nel ciclo dei trattamenti intermedi.

Prima dell'operazione è necessario eliminare dal materiale lo strato d'ossido superficiale, mediante un'azione meccanica, sabbiatura, e o decapaggio, quindi appuntire la sezione iniziale per facilitare l'introduzione nella filiera. Per facilitare l'operazione si ricorre all'impiego di appositi lubrificanti e rivestimenti superficiali del materiale da trafilare.

La trafilatura è un processo ad elevata produttività, si arriva a 50 m/s per fili molto sottili. Velocità molto più basse dell'ordine di 1 m/s, sono comuni per spessori superiori.

3.2.1. Le lavorazioni per deformazione plastica a freddo

Le lavorazioni operanti per deformazione plastica a freddo si possono all'incirca distinguere in due categorie.

Nella prima si considerano quelle tecnologie che servono a perfezionare i prodotti ottenuti per deformazione plastica a caldo, così da ottenere altri prodotti finiti di più elevato contenuto tecnologico. In questa categoria si considerano la laminazione a freddo e la trafilatura.

Nella seconda categoria, invece, si considerano quelle tecnologie che partendo da prodotti siderurgici finiti, quali le lamiere, i nastri, i fili, i tubi, operano su questi elementi, deformandoli a freddo, per ottenere dei prodotti finiti. A questa seconda categoria appartengono l'imbutitura, la piegatura di barre, di tubi e di profilati, la ricalcatura delle viti e la loro filettatura mediante rullatura a freddo.

Nella prima categoria sono state radunate quelle che più propriamente sembrano essere tecniche produttive, nella seconda quelle che si possono considerare tecniche di

trasformazione. Ovviamente la delimitazione delle due categorie non è così netta come sembra.

3.2.2. Le proprietà meccaniche

In un materiale metallico viene in genere denominata lavorazione a freddo l'operazione plastica, a temperatura e velocità ben definite, che causa un aumento di resistenza e di durezza.

La principale differenza tra l'operazione per asportazione di truciolo e la deformazione plastica a freddo, sta nell'aumento delle proprietà meccaniche raggiungibile con quest'ultima; in particolare l'incremento del carico di rottura a trazione e il carico di snervamento. L'incremento del limite di snervamento è superiore a quello del carico di rottura, e questo avviene sostanzialmente nel primo 5% di riduzione di sezione.

La durezza subisce una crescita, ed è possibile verificare una relazione tra valori di durezza e carico di rottura a trazione. La durezza Brinnell, HB, moltiplicata per un opportuno coefficiente di proporzionalità indica il carico di rottura a trazione in N/mm². Questo coefficiente varia da acciaio ad acciaio, per i martensitici e i ferritici solitamente il valore si aggira attorno a 3, mentre per gli austenitici questa relazione non è ritenuta valida.

In diversi casi il materiale sottoposto a deformazione raggiungerebbe valori eccessivi di durezza, manifestando difettosità strutturali permanenti; da qui la necessità di sottoporre tali materiali ad opportuni trattamenti di ricottura, nel caso di acciai inossidabili martensitici e ferritici, e di solubilizzazione per gli austenitici, che inducono in essi l'addolcimento e la duttilità necessarie per le successive operazioni di deformazione o di lavorazione meccanica. Parallelamente ad un aumento del carico di rottura e di snervamento si manifesta una diminuzione dell'allungamento a rottura, e della strizione del materiale.

3.2.3. Deformabilità plastica

Tutto ciò, si attribuisce alla particolare struttura atomica della maggior parte dei materiali metallici, particolarmente adatta a sopportare movimenti non solo degli

elettroni ma anche degli atomi. Si ricorda a tal proposito che, quando un corpo cristallino è soggetto a sforzi, avvengono delle deformazioni che possono essere di due tipi: elastiche, consistenti in distorsioni del reticolo cristallino, che si annullano al cessare dello sforzo applicato; oppure plastiche, deformazioni permanenti oggi spiegabili con la teoria delle dislocazioni. In un reticolo cristallino i sistemi di piani paralleli lungo i quali possono avvenire gli scorrimenti sono molteplici, ma quelli preferenziali sono costituiti da quei piani per i quali è massima la densità degli atomi. Appare perciò evidente che la deformazione di un corpo cristallino sarà tanto maggiore quanto maggiore è il numero dei sistemi di piani, di facile scorrimento. Essendo i reticoli cristallini a maggior compattezza e a più alta simmetria quelli che hanno maggiore numero di piani a facile scorrimento, è giustificata l'affermazione che la notevole deformabilità della maggioranza degli acciai dipende dal loro sistema cristallino. Aumentando la temperatura altri sistemi di scorrimento diventano efficaci. Ultima importante considerazione è che se si deforma plasticamente un materiale metallico, ad una temperatura maggiore di quella di ricristallizzazione, non si manifesta incrudimento e quindi l'aumento delle caratteristiche meccaniche voluto.

3.2.4. L'incrudimento

Durante una deformazione a freddo accade invece il contrario. Essa avviene in un momento iniziale grazie alla presenza delle dislocazioni primarie, difetti della struttura reticolare. Successivamente la densità delle dislocazioni aumenta considerevolmente. A causa del loro crescente numero, la sollecitazione necessaria per il movimento, cioè per la deformazione plastica, è sempre maggiore. Lo stato tensionale delle dislocazioni, che si oppongono ad ulteriori scorrimenti, deve essere considerato come causa principale dell'effetto dell'incrudimento. Inoltre anche l'addensamento di dislocazioni in corrispondenza di ostacoli, come per esempio bordi grano, segregazioni o atomi estranei, richiede sollecitazioni sempre maggiori per lo scorrimento plastico. Affinché le dislocazioni possano superare atomi estranei, sono necessarie forze adeguate. L'effetto è sfruttato però al fine di migliorare le proprietà meccaniche del pezzo.

3.3. Fasi di lavorazione

3.3.1. Pulizia meccanica o chimica: decapaggio

Si chiama decapaggio l'operazione meccanica o chimica che assolve il compito di pulizia della superficie del materiale per eliminare gli ossidi più o meno resistenti, che si formano sulla superfici dell'acciaio.

Le tecniche di decapaggio possono essere di tipo meccanico o di tipo chimico. Le prime possono eseguirsi con sabbia silicea, con sfere di vetro, di acciaio inossidabile, o acciaio comune.

I decapaggi meccanici, più energici, possono a volte precedere quelli chimici, quando la quantità di scaglia è di considerevole spessore e risulta molto aderente alla superficie metallica.

La sabbiatura del materiale si effettua all'interno di una macchina nella quale viene gettata la graniglia da delle turbine azionate da motori elettrici. I getti della graniglia sono orientati in modo da colpire l'intera superficie del materiale.

La superficie che si ottiene risulta essere porosa e non tutti gli utilizzatori accettano questo tipo di finitura superficiale.

Si decapa allora in modo chimico, immergendo il materiale in vasche che contengono acidi di diversa natura e diluizione.

Prima del decapaggio chimico, il materiale passa all'impianto salatura. L'operazione di salatura è considerata esclusivamente un pretrattamento del materiale prima del decapaggio. Nella maggior parte dei casi sostituisce la sabbiatura; sfrutta lo shock termico per indebolire gli ossidi superficiali per facilitarne il distacco durante la fase di decapaggio chimico.

La sequenza delle fasi nell'impianto sali fusi inizia con l'ingresso in un forno di preriscaldamento, qui il materiale sosta alcuni minuti, ad una temperatura di poco inferiore a quella effettiva dei sali fusi nella prima vasca di immersione. Quindi un raffreddamento in acqua, un passaggio in acido solforico, ed un lavaggio finale in acqua.

Il decapaggio vero e proprio avviene in una sequenza di immersioni successive. Sostanzialmente la sequenza comprende, in un'immersione in acido solforico e

fluoridrico (o cloridrico), un lavaggio a spruzzo semidinamico, una seconda immersione in acido nitrico e fluoridrico, un secondo lavaggio a spruzzo dinamico a pressione elevata, quindi una ripetizione di questi due ultimi passi a seconda delle esigenze, per arrivare all'ultimo stadio ad un bagno in latte di calce.

Il risultato che si ottiene è una superficie metallica viva dal colore grigio opaco adatta per preparare il materiale alle successive operazioni di trafilatura o alla normale vendita allo stato decapato.

3.3.2. Preparazione dell'estremità del semilavorato

L'estremità viene rastremata, appuntita, per introdurre il filo nella filiera. A tale scopo s'impiegano macchine quali fresatrici, laminatoi, fucinatrici oppure processi chimici ed elettrici.

3.3.3. Lubrificazione

La lubrificazione prima della trafilatura è necessaria a causa dell'azione abrasiva che, la barra o il filo, esercitano sulla filiera provocandone un'usura precoce.

E' eseguita con lubrificanti solidi o fluidi. I primi sono costituiti da polveri di sapone, cere, siliconi e grassi contenenti in sospensione talco grafite, bisolfuro di molibdeno. Questi sotto le elevate pressioni esistenti in filiera, formano una pellicola estremamente sottile e di buon potere lubrificante che protegge il rivestimento sottostante. I secondi sono costituiti da miscele solubili od emulsionabili d'oli minerali e di solito sono impiegati in fili di diametri inferiori.

3.3.4. Calore sviluppato

Durante la trafilatura si sviluppa nel metallo in lavorazione e nella filiera un notevole aumento di temperatura, specialmente trafilando a secco (con polvere di sapone, grasso), che deve essere contenuto in limiti convenienti, raffreddando le filiere con circolazione d'acqua fredda, per evitare problemi di dilatazione e rotture.

L'aumento di temperatura del filo durante la trafilatura e di conseguenza delle filiere, è determinato come già detto da due fattori distinti; l'attrito di deformazione del materiale, e l'attrito di scorrimento fra la superficie del materiale e il foro della filiera. Con forti riduzioni di sezione ed alte velocità di passaggio già nella trafilatura singola di filo d'acciaio dolce si raggiungono i 200°C , che vengono superati all'aumentare della durezza del materiale.

Dato che la conducibilità termica delle leghe dure è circa la metà di quella dell'acciaio, e la zona di contatto tra il filo e la filiera è molto limitata, (la sua lunghezza è poco più del diametro del filo entrante) la quantità di calore che può essere dispersa è estremamente limitata. Ci sono filiere nelle quali è previsto un raffreddamento per circolazione d'acqua che nei casi a secco deve essere abbondante.

3.4. Impianto fili

L'impianto fili riguarda la vergella (tondino di acciaio laminato che costituisce il semilavorato di partenza per la trafilatura) di diametro molto piccolo, dell'ordine di qualche millimetro. I rotoli di vergella, dopo la laminazione, sono addolciti con un opportuno trattamento termico.

All'uscita dal forno si presentano di colore scuro, completamente ossidati. La loro pulizia avviene in decapaggio, trattamento che consegna un colore grigio chiaro, ed una superficie più liscia e regolare.

L'impianto fili lavora il materiale partendo dalla prima matassa, svolgendolo, trafilandolo, e riavvolgendolo immediatamente in una seconda matassa. Spesso più fili sono lavorati parallelamente, lo spazio occupato infatti da un singolo passo di trafilatura è relativamente ridotto. Il lay-out d'impianto prevede la presenza di molte matasse di dimensione diverse. In seguito ad una prima riduzione di sezione, la lavorazione può proseguire in modo differenziato.

Il filo viene sgrassato, per poter poi eseguire il trattamento termico di addolcimento in un forno ad atmosfera controllata con azoto. All'uscita dal forno il filo passa in una vasca d'acqua per il raffreddamento. Dopo la lavorazione è riavvolto in rotoli.

Nel caso in esame si ipotizza che il ciclo produttivo, sia effettuato alternando successivamente il processo di trafilatura con il trattamento termico di ricottura (che induce l'addolcimento e la duttilità necessarie per le successive operazioni di deformazione). Il trattamento termico, eseguito prima dell'ultimo passaggio di trafilatura, potrebbe essere quello di patentamento che consiste nel far passare con movimento continuo il filo di acciaio all'interno di un bagno termale di piombo fuso a 500°C ottenendo una struttura formata da perlite fine incrementando ulteriormente le caratteristiche meccaniche.

CAPITOLO 4

Analisi Microstrutturale

4.1. Oggetto dell'Analisi

Oggetto dell'analisi sono le due corde. La prima è la corda sperimentale in acciaio inox AISI 302 mentre l'altra è una corda per violino attualmente in commercio della marca Lenzner con anima in acciaio armonico rivestita di alluminio².

L'analisi microstrutturale è stata effettuata presso il laboratorio di Metallografia SIM2 del Dipartimento di Tecnica e Gestione dei Sistemi Industriali dell'Università di Padova.

4.2. Preparazione dei Campioni

L'esame di un metallo o di una lega al microscopio ottico può essere effettuato soltanto dopo aver opportunamente preparato e trattato la superficie del campione in modo tale da mettere in evidenza i costituenti che si desiderano osservare. Infatti è necessario ottenere una superficie pulita, piana, priva di rigature e di deformazione dei grani cristallini.

In fase preliminare si devono individuare le zone del campione per le quali è interessante operare l'analisi micrografica, praticando delle sezioni per rendere i campioni così ottenuti adatti all'analisi al microscopio ottico.

Le serie di operazioni che a tale scopo vengono effettuate sono :

- Troncatura: si seziona il pezzo in uno o più punti ricavandone i campioni.
- Inglobamento: si inserisce il pezzo, di piccole dimensioni, in una struttura più facilmente manipolabile.
- Preparazione Meccanica: si libera il campione da deformazioni e graffi superficiali.

² Cercando in qualsiasi motore di ricerca si ottiene questa descrizione della corda

- Attacco Chimico: si evidenzia la microstruttura per renderla osservabile al microscopio ottico.

4.2.1. Troncatura

Sono stati ricavati un pezzo di lunghezza 2 cm e altri quattro-cinque di lunghezza 1 cm; il primo, necessario per permettere una successiva analisi al microscopio ottico della sezione longitudinale, i secondi, per la sezione trasversale.

4.2.2. Inglobamento

I provini vengono inglobati in resina termoindurente per renderli più maneggevoli in quanto le dimensioni dei campioni sono estremamente ridotte.

In particolare, nel caso in esame, i campioni sono stati inglobati a caldo: ogni campione ricavato dalla precedente troncatura è stato posto all'interno del cilindro della macchina inglobatrice HERGON MI 40 (Figura 4.1), con le sezioni da esaminare rivolte verso il basso.

E' stata introdotta successivamente una quantità di resina termoindurente, in modo da ricoprire completamente il campione. Quindi è stato avviato il ciclo di inglobatura, portando il cilindro dell'inglobatrice ad una temperatura di 160° C e mantenendola tale per circa 10 minuti.

La fase successiva è quella di raffreddamento durante la quale è avvenuto l'indurimento della resina e si è ottenuto un campione di forma cilindrica facilmente manipolabile nelle successive fasi.



Figura 4.1 Macchina inglobatrice

4.2.3. Preparazione Meccanica

E' costituita da due fasi:

- Levigatura
- Lucidatura

Lo scopo di queste fasi è quello di rimuovere le deformazioni superficiali più evidenti e preparare il campione alla fase successiva di osservazione al microscopio ottico. Nella fase finale infatti la superficie del campione deve risultare lucida e perfettamente riflettente.

Levigatura

Si tratta della fase iniziale che ha come scopo quello di pulire la superficie del campione da residui di resina ed eliminare gli strisci causati dalla fase di troncatura. E' stata usata una lucidatrice del tipo in Figura 4.2, sulla quale sono state montate carte SiC (Carburo di Silicio), adatte a materiali duttili quale quello in esame.

Sono state usate in successione una serie di carte che differivano tra loro solo per la granulometria, cioè il numero medio di particelle per unità di superficie: 180, 1200,

2400. Durante la levigatura, sulle carte, montate sul piatto rotante della lucidatrice, viene fatta fluire dell'acqua con lo scopo di attenuare gli attriti, ridurre il calore generato tra le superfici a contatto e pulire la superficie del campione da residui che si staccano durante questa fase. La pressione esercitata sul campione deve essere sufficiente a permettere con discreta rapidità l'asportazione del materiale senza apportare danneggiamenti alla superficie.

Nel passaggio da una carta all'altra bisogna lavare bene il campione in acqua corrente per togliere eventuali grani abrasivi della carta precedentemente usata che fossero rimasti ad esso attaccati e che andrebbero a contaminare la carta seguente.

Lucidatura

Affinché i campioni siano osservabili al microscopio ottico, è necessario che presentino una superficie lucidata a specchio e quindi perfettamente piatta ed esente da graffiature. Per soddisfare questa condizione, bisogna eliminare le piegature presenti sulle superfici dei campioni venutesi a creare durante la fase di levigatura.

L'operazione di lucidatura è condotta in modo analogo a quella di levigatura, ma si utilizzano al posto delle carte al carburo di silicio delle paste diamantate accuratamente distribuite su dei panni. Tali panni sono costituiti da più strati:

- strato superficiale, soffice, a contatto con il provino;
- strato intermedio, resistente, serve a non far sprofondare i diamanti;
- strato inferiore, provvisto di ancoraggi e fissato al piatto della lucidatrice.

Sui panni viene distribuita una piccola quantità di pasta diamantata che funge da abrasivo sulla quale viene spruzzato un olio alcolico che ne permette un'adeguata distribuzione. I panni possono essere di tre tipi a seconda della pasta diamantata usata:

- da 6 micron (colore giallo);
- da 3 micron (colore verde);
- da 1 micron (colore blu).

Anche in questa fase, nel passaggio tra un panno e il successivo, i campioni sono stati accuratamente lavati con acqua ed asciugati con aria compressa per non danneggiare la superficie, inoltre è stata controllata al microscopio ottico la finitura ottenuta, altrimenti non rilevabile ad occhio nudo.

In entrambe le lavorazioni di levigatura e lucidatura si ha avuto l'accortezza nel passaggio da una carta, o panno, alla successiva, di ruotare il provino di 90° facendo in modo che la righe prodotte dalla precedente risultassero perpendicolari a quelle prodotte dalla successiva, prolungando la levigatura o lucidatura per un tempo sufficiente ad eliminare le righe prodotte dalla carta, o panno, precedente.



Figura 4.2 Lucidatrice

4.3. Attacco chimico

L'attacco chimico è un'operazione che viene effettuata sul campione lucidato allo scopo di mettere in evidenza, per mezzo del contrasto ottico, la struttura (cioè il bordo dei grani), la presenza di fasi diverse, la precipitazione di costituenti al bordo di grano, ecc. Infatti se il campione lucidato viene esaminato al microscopio senza effettuare alcun attacco, si osserva in generale una superficie liscia e perfettamente uniforme, sulla quale si possono eventualmente osservare soltanto le inclusioni non metalliche, cricche, la grafite nelle ghise, ecc., vale a dire tutto ciò che ha un potere riflettente diverso da quello del metallo. L'attacco discioglie, oppure colora, alcuni costituenti in maggior misura degli altri, discioglie il bordo dei grani più velocemente dei grani stessi, o i

grani con velocità diversa in funzione del loro orientamento cristallografico. Esso viene fatto semplicemente immergendo per un certo tempo il campione in una opportuna soluzione aggressiva, tenuta alla temperatura più adatta, o facendolo funzionare da anodo in una cella elettrolitica. I reattivi di attacco sono costituiti da vari tipi di acidi organici ed inorganici, alcali od altre sostanze disciolte in solventi come l'acqua, alcool, glicerina e glicoli. Ciascun reattivo è preparato per uno scopo specifico, per cui va scelto attentamente in relazione al materiale metallico ed al particolare costituente strutturale che deve essere messo in evidenza.

In questa tesi sono stati usati entrambi i metodi di attacco: attacco chimico e attacco elettrolitico.

Per il campione di corda di violino Lenzner (acciaio armonico) si è utilizzato come reattivo il Nital 5, la cui composizione è: acido nitrico 5 cc + alcool etilico decolorato 100 cc. Sono stati versati sulla superficie da osservare alcuni ml della soluzione aggressiva e lasciato agire per 2-3 secondi (non troppo per non bruciare la superficie) e poi si è proceduto al lavaggio con acqua corrente e successiva asciugatura.

Per la corda in acciaio inox non è possibile utilizzare la stessa soluzione, quindi si è proceduto per via elettrolitica immergendo il campione in una soluzione composta da 40 ml di acqua (H_2O) e 60 ml di acido nitrico (HNO_3) e applicando una tensione di 1,5 – 2 V e una corrente di pochi mA per 30-60 secondi.

Scopo dell'attacco chimico è dunque quello di evidenziare la struttura, ossia di permettere, attraverso un'azione selettiva, la differenziazione dei vari componenti cristallini della lega sia per la diversa intensità di corrosione degli stessi che per la diversa colorazione dei prodotti delle reazioni.

Dopo l'attacco chimico la superficie dei campioni non si presenta più completamente speculare. Infatti solo alcuni cristalli (passivi rispetto al reagente di attacco) riflettono i raggi provenienti dalla sorgente luminosa nella stessa direzione in cui li rifletteva la superficie esente da attacco chimico. Gli altri cristalli invece li rifletteranno in varie direzioni con diversa dispersione e diverso assorbimento e quindi si osserveranno al microscopio ottico zone caratterizzate da diversa luminosità e colorazione.

L'attacco deve essere uniforme su tutta la superficie del provino e di profondità tale da permettere una buona osservazione al microscopio; in genere la profondità non deve

essere superiore a 1.5 μm . Si devono quindi evitare attacchi troppo forti e profondi in quanto potrebbe accadere che certi costituenti di minime dimensioni vengano alterati o addirittura asportati, determinando di conseguenza una variazione della struttura del materiale in esame e diminuendo la selettività.

Attacchi troppo prolungati darebbero luogo a corrosioni eccessive soprattutto ai bordi dei grani causando erronee interpretazioni sulla microstruttura.

4.4. Analisi al Microscopio Ottico

4.4.1. Generalità sulla Microscopia Ottica

La microscopia ottica è una tecnica di indagine sui materiali metallici che ne consente l'osservazione, evidenziandone la struttura e consentendo di valutare, in particolare, la presenza, la distribuzione ed i rapporti delle varie fasi, nonché la dimensione dei grani. Tale indagine è particolarmente utile per valutare, come si vedrà in seguito, l'effetto sulla struttura del materiale di trattamenti termici, termochimici o termomeccanici e di deformazioni plastiche a caldo o a freddo subite dal materiale. La microscopia ottica consente inoltre di valutare l'eventuale presenza nel materiale di difetti quali porosità, inclusioni non metalliche (ossidi, solfuri, ecc.), o cricche che possono causare un drastico decadimento delle proprietà del materiale. I materiali metallici, essendo opachi, per poter essere osservati richiedono una illuminazione tale che la luce che colpisce il campione sia riflessa da quest'ultimo ed entri successivamente nell'obiettivo. Quindi il microscopio metallografico è detto a riflessione perché il campione riflette la luce incidente verso l'obiettivo. Un doppio sistema di lenti, di cui uno costituisce l'obiettivo e l'altro l'oculare, permette la formazione dell'immagine di ingrandimento voluto. Il prodotto degli ingrandimenti dell'obiettivo e dell'oculare rappresenta l'ingrandimento del microscopio, cioè il rapporto fra la distanza tra due punti dell'immagine e la distanza tra gli stessi due punti misurata sulla superficie del campione.

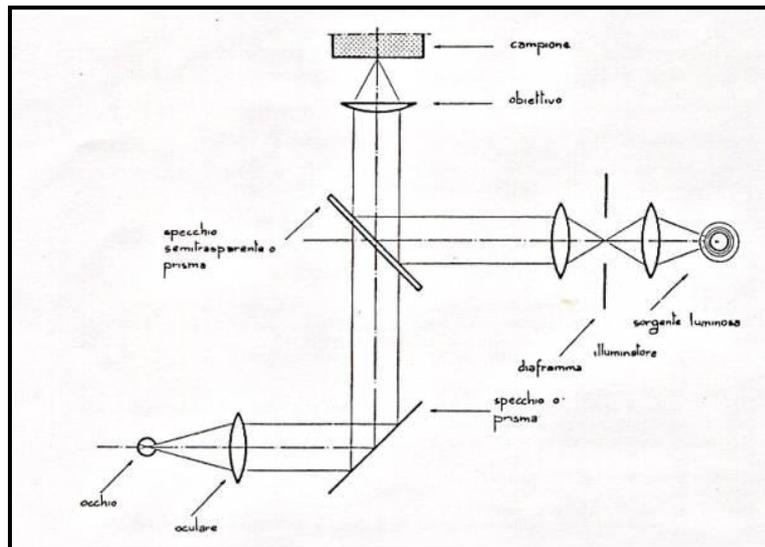


Figura 4.3 Schema del microscopio ottico

L'analisi è stata eseguita mediante l'impiego di un microscopio ottico (Figura 4.3) sul quale è stata montata una telecamera collegata ad un computer provvisto del software MicroImage, specifico per l'acquisizione e l'analisi di immagini.

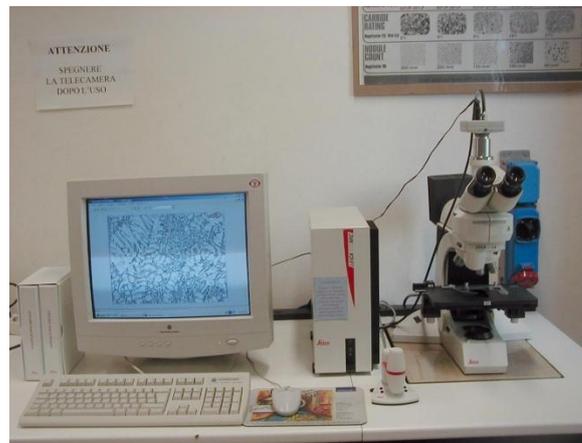


Figura 4.4 Microscopio ottico collegato al computer

Il software permette di eseguire le tre fasi di analisi:

- digitalizzazione dell'immagine;
- acquisizione dell'immagine;
- esame dell'immagine.

Durante la prima fase il sistema di analisi converte un'immagine di tipo ottico proveniente dal microscopio, in un'altra di tipo digitale che può essere interpretata da

computer. Questa fase è molto delicata in quanto una cattiva acquisizione pregiudica le elaborazioni successive.

Nella seconda fase è necessario scegliere le zone interessanti e acquisire l'immagine. Nel momento dell'acquisizione dell'immagine si deve specificare l'obiettivo utilizzato con i relativi ingrandimenti per disporre di un'immagine nella scala corretta.

4.4.2. Micrografie

In questa fase, con l'utilizzo del microscopio ottico, sono state eseguite le micrografie di tutti i campioni e per ognuno di essi sono state riportate le seguenti immagini :

- a 100x prima di eseguire l'attacco chimico
- a 100x e 500x dopo aver eseguito l'attacco chimico

Corda Acciaio inox AISI 302

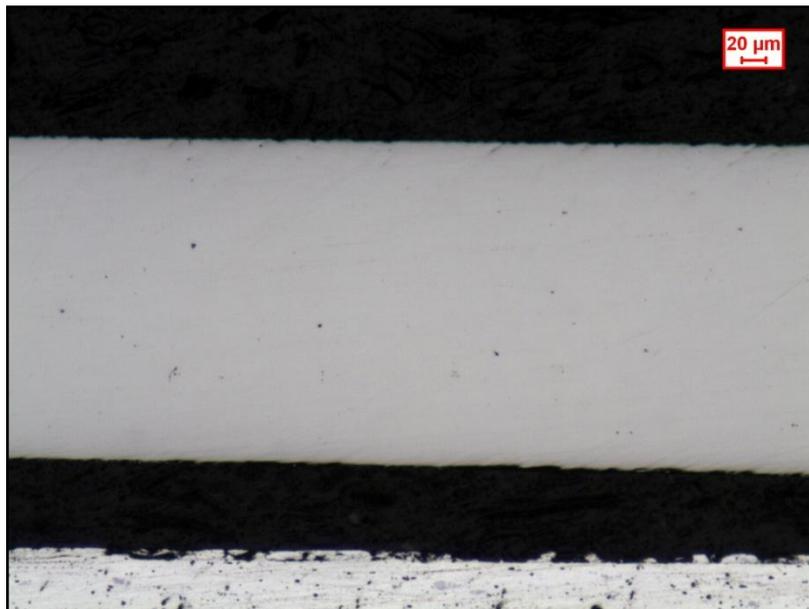


Figura 4.5 Micrografia ottica a 100x della sezione longitudinale della corda AISI 302

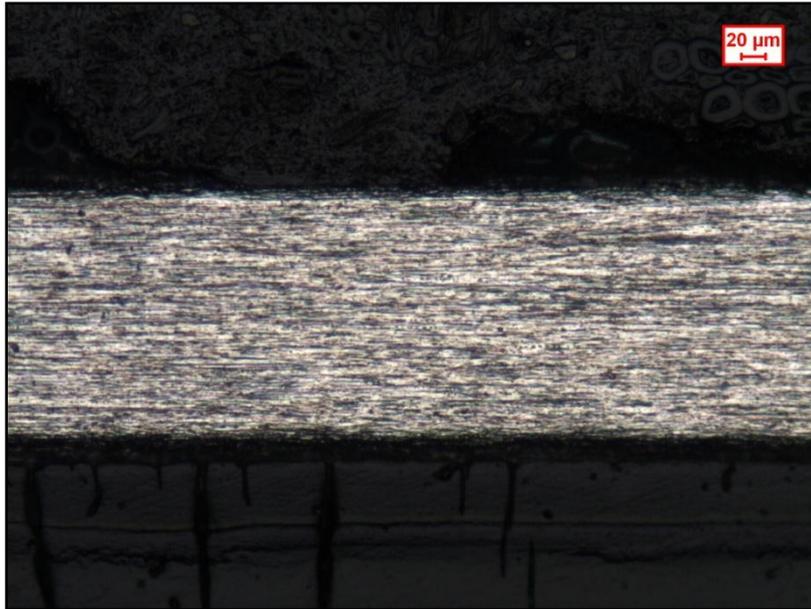


Figura 4.6 Micrografia ottica a 100x della sezione longitudinale della corda AISI 302 dopo attacco elettrolitico

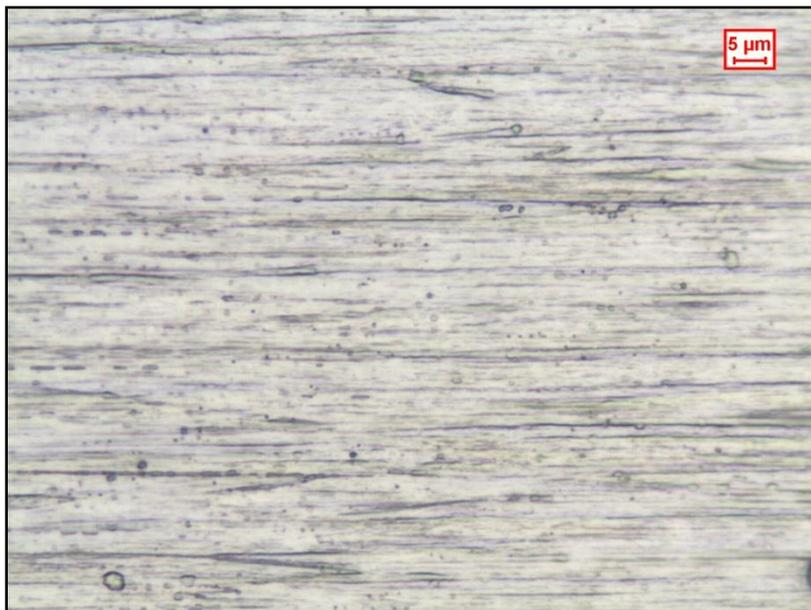


Figura 4.7 Micrografia ottica a 500x della sezione longitudinale della corda AISI 302 dopo attacco elettrolitico

Corda per violino Lenzner

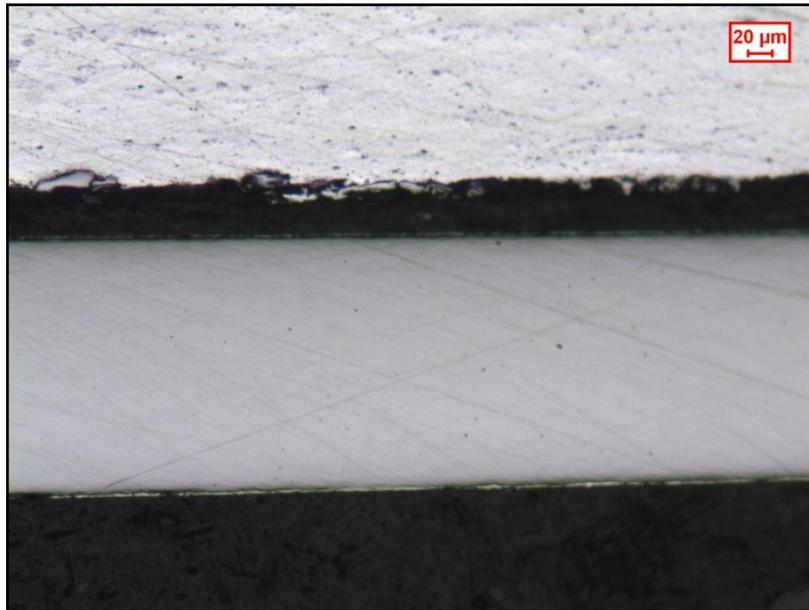


Figura 4.8 Micrografia ottica a 100x della sezione longitudinale della corda di violino Lenzner



Figura 4.9 Micrografia ottica a 100x della sezione longitudinale della corda di violino Lenzner dopo attacco chimico



Figura 4.10 Micrografia ottica a 500x della sezione longitudinale della corda di violino Lenzner dopo attacco chimico

4.4.3. Analisi delle micrografie

Dalle micrografie eseguite precedentemente l'attacco chimico, si notano delle piccole impurità di forma frammentale in entrambi i tipi di corda. La densità delle impurità è comunque molto bassa e si può constatare che entrambi i materiali sono di buona qualità. Tali particelle influiscono negativamente sulla resistenza a fatica delle corde in quanto esse hanno durezza sicuramente inferiore a quella del materiale base.

Nelle continue oscillazioni verticali della corda, durante il suo normale utilizzo, la presenza di impurità all'interno del materiale possono essere causa di innesco di cricche, in particolar modo nei punti di appoggio della corda, che inducono alla successiva rottura della stessa per fatica.

Una volta eseguito l'attacco chimico, sono state effettuate le micrografie a 100x e 500x dalle quali si può capire come l'attacco chimico non sia stato in grado di evidenziare le diverse fasi componenti la lega in modo da renderle più facilmente distinguibili nell'analisi al microscopio ottico. Infatti, le corde essendo state prodotte attraverso il processo meccanico di trafilatura, le micrografie evidenziano, in tutti i campioni, una struttura "a bande" allungate secondo la direzione di lavorazione.

Infatti la struttura (cioè il bordo dei grani) non risulta essere visibile nelle micrografie perché la corrosione dell'attacco chimico su tali bande si confonde con quella dei bordi grano che risultano essere di piccole dimensioni e molto allungati.

Importante notare inoltre la presenza di uno strato di rivestimento visibile dalle Figure 4.8 e 4.9 relative alla corda di violino. Questo tipo di rivestimento viene applicato alla fine del processo di trafilatura facendo scorrere il filo in una vasca contenente la lega di rivestimento liquida che aderisce e indurisce sulla superficie. Questo rivestimento ha lo scopo di prevenire gli effetti di corrosione e ossidazione dell'anima della corda.

Il rivestimento è solitamente una lega di stagno (Sn) o alluminio (Al) con la presenza, a volte anche di argento (Ag).

L'acciaio inox non necessita di questo rivestimento perché contiene al suo interno elementi in lega (Mn, Cr, Ni, Mo) in diverse proporzioni che ostacolano l'ossidazione. Soprattutto il cromo forma nella superficie del metallo uno strato di ossido che funge da protezione e che si rigenera se asportato.

CAPITOLO 5

Analisi Meccanica

5.1. Prova di Trazione

La conoscenza delle prove dei materiali è uno degli argomenti che si ritengono indispensabili per poter interpretare, giudicare, programmare, selezionare materiali e metodi di lavorazione.

Tra le principali prove dei materiali possiamo ricordare la prova di trazione, di resilienza, di durezza, di fatica, di usura; naturalmente le prove elencate non sono le uniche, ma rientrano tra le più conosciute. Nella seguente analisi, ci occuperemo della prova di trazione corrispondente alla UNI EN 10002.

Prova di trazione statica: La prova consiste nel sottoporre una provetta ad uno sforzo di trazione, generalmente fino alla rottura, per determinare, di regola, il carico di snervamento, il carico di rottura, l'allungamento percentuale a rottura ed il modulo di elasticità. E' la più importante prova convenzionale meccanica. Si esegue su ogni materiale allo scopo di rilevare le caratteristiche di resistenza, di deformabilità e di elasticità. La prova di trazione statica, fornisce dati che pur essendo convenzionali risultano importanti nel porre giudizi di vario genere in riferimento al materiale accertato. Inoltre, questa prova costituisce pertanto il mezzo di controllo dei processi tecnologici (stampaggio, fucinatura, saldatura, laminazione, trafilatura, trattamenti termici, ecc.) fornendo al progettista valori di riferimento per il calcolo e il dimensionamento degli organi di macchine.

Grazie alla prova di trazione, è possibile determinare gli errori commessi all'interno del ciclo di lavorazione, ad esempio l'errata composizione chimica del materiale, una permanenza troppo prolungata o troppo breve ad una determinata temperatura nello svolgersi di un trattamento termico.

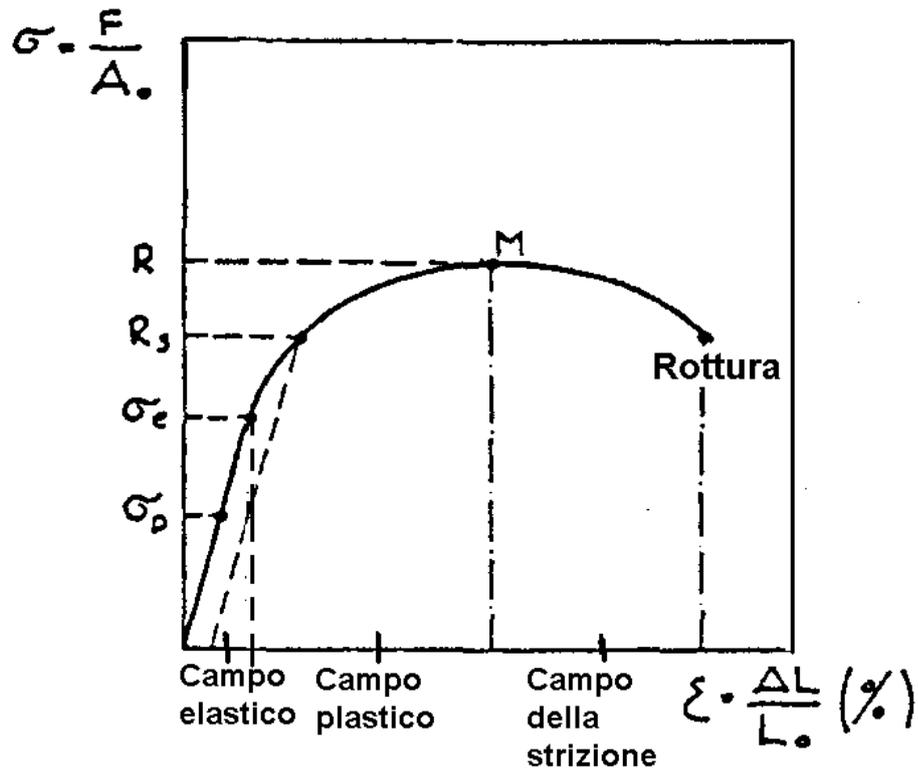


Figura 5.1 Curva schematica sforzo-allungamento

In Figura 5.1 è illustrata una curva schematica che descrive la prova di trazione statica. Nel diagramma sono riportate sull'asse delle ascisse l'allungamento ϵ del provino, ovvero l'aumento del tratto utile ΔL diviso per la lunghezza iniziale L_0 ($\epsilon = \Delta L/L_0$) e su quello delle ordinate lo sforzo nominale di trazione, ovvero il carico totale diviso per l'area iniziale della sezione trasversale del provino ($\sigma = F/A_0$). Dapprima si osserva che il carico aumenta linearmente nel tempo, ovvero in ogni istante è proporzionale alla deformazione imposta; inoltre se si annulla il carico, il provino si riporta alla propria dimensione originale. Questo periodo, corrispondente al tratto iniziale della curva, è detto di proporzionalità e in esso il materiale segue la legge di Hooke ($\sigma = \epsilon \cdot E$). Entro determinati limiti le deformazioni provocate dalle sollecitazioni sono proporzionali alle sollecitazioni stesse:

$$\frac{\Delta L}{L_0} = \frac{F_i}{E \cdot A_0} \quad (5.1)$$

Dove:

ΔL = allungamento elastico;

L_0 = lunghezza iniziale del pezzo;

A_0 = sezione trasversale della provetta calibrata;

F_i = carico misurato dalla macchina che esegue la prova;

E = modulo di elasticità.

Se le deformazioni restano in questo tratto rettilineo, successivamente, scaricando il provino, questo ritorna ancora alle proprie dimensioni iniziali. Questo periodo è pertanto detto di elasticità.

Deformando ulteriormente il provino, la curva σ - ε si scosta sempre più dalla linearità e, una volta annullato il carico, il provino ha un ritorno elastico fino alla condizione di rilassamento ma rimane nel provino una deformazione residua via via crescente all'aumentare della deformazione imposta. Nel tratto finale della curva σ - ε si nota che, aumentando ancora la deformazione, il carico totale diminuisce, cioè il materiale oppone apparentemente una minore resistenza alla deformazione: ciò è dovuto all'insorgere del cosiddetto fenomeno della strizione, il quale si manifesta con una deformazione localizzata che porta in una zona del provino una notevole diminuzione dell'area della sezione trasversale. È proprio su questa sezione che il carico specifico è maggiore e che il provino infine si rompe.

5.2. Prove di Resistenza a Trazione

Lo scopo della presente analisi è stato quello di individuare una correlazione tra i diversi campioni ed il corrispondente comportamento meccanico evidenziato nelle prove di trazione.

E' stata eseguita la prova per ognuno dei provini realizzati, quattro per ogni corda, in modo da avere a disposizione un maggiore numero di risultati utili per l'analisi. La lunghezza iniziale (L_0) è stata mantenuta costante per tutti i provini della stessa corda. L'esecuzione della prova è avvenuta secondo la norma UNI EN 10002. Tale norma, specifica il metodo della prova di trazione dei materiali metallici e definisce le caratteristiche meccaniche che tale prova consente di determinare, a temperatura ambiente.

La prova consiste nel sottoporre i provini ad una deformazione agente secondo la direzione dell'asse del provino; questa viene incrementata lentamente e gradatamente, fino a pervenire alla completa rottura del campione.

Saranno esaminati i diagrammi della prova di trazione così come sono stati rilevati dagli apparecchi registratori, nei quali le coordinate sono rispettivamente i carichi totali F , la deformazione percentuale $(\Delta L/L_0)\%$; è ben comprensibile come i valori caratteristici determinati dipenderanno direttamente dalle dimensioni dei provini e non solo dalle caratteristiche del materiale in esame.

Per ogni provino sono stati quindi ricavati i seguenti dati:

- E [MPa] : Modulo di elasticità o di Young.
- σ_y [MPa] : Carico di snervamento
- σ_R [MPa] : Carico di rottura.
- ΔL [%] : Allungamento percentuale alla rottura

5.2.1. Le grandezze più importanti per la caratterizzazione dei materiali

Modulo di elasticità o modulo di Young

Il modulo di elasticità è una grandezza caratteristica del materiale. Esso misura la resistenza che un materiale oppone alla deformazione quando è sottoposto a forze esterne. Più specificatamente il modulo di elasticità, o modulo di Young, che si indica con la lettera E , misura il rapporto esistente tra il carico a cui viene sottoposto il provino del materiale da analizzare e il relativo allungamento che si produce, ovvero la costante che lega, nel campo di validità della legge di Hooke $\sigma = \varepsilon \cdot E$ lo sforzo alla deformazione, da cui

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (5.2)$$

La grandezza E è pertanto misurabile come valore della tangente all'origine della curva sforzo-deformazione, ovvero

$$E = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{d\sigma}{d\varepsilon} \quad (5.3)$$

In altre parole E è proporzionale alla tangente dell'angolo compreso tra l'asse delle ascisse ed il tratto elastico della curva sforzo deformazione.

Il modulo di elasticità ha una notevole importanza pratica poiché si ritrova in molte formule di progetto e dà un'indicazione della rigidità dei materiali metallici. Infatti, tanto più il modulo di elasticità è grande, tanto minore sarà la deformazione elastica ottenibile per un dato livello di sforzo.

A livello atomico, la deformazione elastica macroscopica si manifesta come piccole variazioni della distanza interatomica e dello stiramento dei legami interatomici. Pertanto il modulo elastico di un materiale è la misura della resistenza opposta alla separazione di due atomi adiacenti, ovvero la misura delle forze di legame interatomiche. Il modulo elastico è inoltre proporzionale alla pendenza della curva forza-distanza interatomica alla distanza di equilibrio.

Il valore del modulo elastico è direttamente correlabile con il tipo di legame atomico presente all'interno del materiale. È anche importante rimarcare come il modulo elastico varia al variare della temperatura e, in particolare, decresce al crescere di questa.

Carico di snervamento

In molti casi, nella fase di progettazione si prevede che le strutture siano sottoposte sempre ad uno sforzo in campo elastico. È pertanto necessario conoscere il valore dello sforzo oltre il quale inizia la deformazione plastica, ovvero avviene il fenomeno dello *snervamento*. Per i metalli, per i quali la transizione tra il comportamento elastico e quello plastico è graduale, il punto di snervamento può essere determinato come il punto oltre il quale la curva sforzo-deformazione non segue più un andamento lineare. In alcuni casi, la posizione di questo punto non può essere determinata graficamente con sufficiente precisione. Pertanto è stata introdotta una convenzione la quale stabilisce che P può essere determinato tracciando una linea parallela alla linea del tratto elastico e passante per una fissata deformazione, in genere pari a 0,002 (0,2%). Lo sforzo corrispondente all'intersezione di questa linea con la curva sforzo-deformazione è definito *carico di snervamento* σ_y (Figura 5.2a).

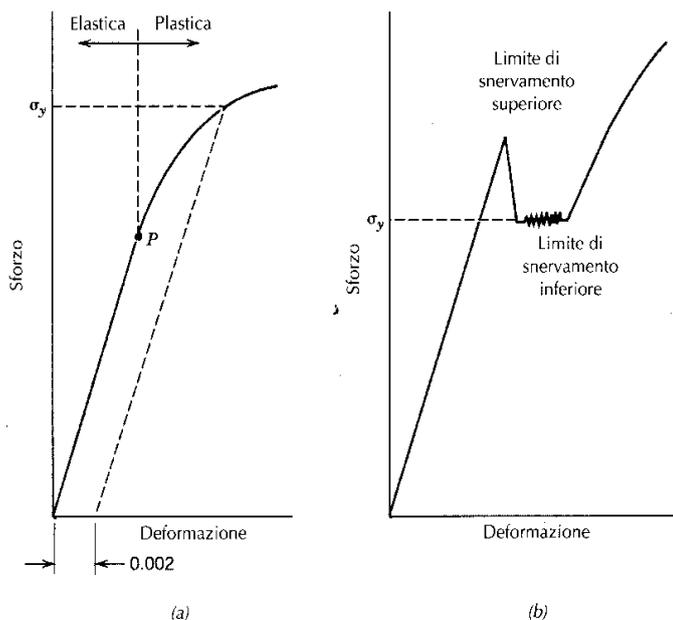


Figura 5.2

(a) Tipica curva sforzo-deformazione per un metallo, nella quale sono riportate le deformazioni elastiche e plastiche, il limite di proporzionalità P e il limite di snervamento σ_y , determinato secondo il metodo della deformazione allo 0.002.
 (b) Comportamento sforzo-deformazione per alcuni acciai nel quale si riconosce il fenomeno dello snervamento.

Alcuni acciai ed altri materiali presentano una curva sforzo-deformazione a trazione come quella riportata nella Figura 5.2b dove la transizione tra il campo di deformazione elastico e quello plastico è molto ben definita e avviene in un tratto chiamato *zona di snervamento*.

Carico di rottura

Dopo lo snervamento, lo sforzo necessario a continuare la deformazione plastica nei metalli cresce fino a raggiungere un valore massimo, il punto M nella Figura 5.3 e successivamente, decresce fino alla frattura, indicata dal punto F. La *resistenza a rottura* (MPa) è lo sforzo rappresentato dal punto di massimo della curva sforzo-deformazione. Questo valore rappresenta lo sforzo massimo che può essere sostenuto da una struttura sollecitata a trazione; pertanto se questo sforzo viene applicato e mantenuto, si ottiene la rottura del pezzo.

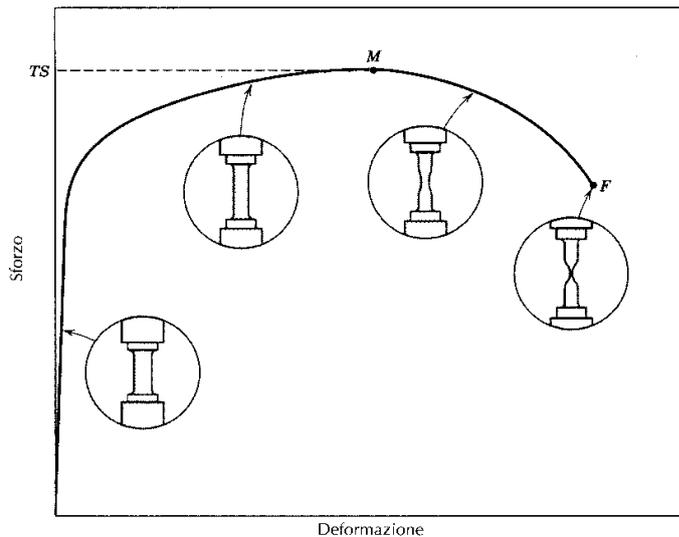


Figura 5.3

Tipica curva sforzo-deformazione fino a frattura (punto F). Il carico di rottura è indicato dalla lettera M. Nei riquadri circolari sono rappresentate le variazioni della geometria del provino in differenti punti della curva.

Le deformazioni che avvengono sul provino fino a questo punto sono ripartite uniformemente lungo tutta la sua lunghezza. Invece, in corrispondenza dello sforzo massimo, si comincia a formare un piccolo restringimento di sezione dove si accumulano le tensioni e le deformazioni successive. Questo fenomeno si chiama "strizione" e la frattura avviene proprio al centro del restringimento.

Il carico di rottura si ottiene quindi come

$$\sigma_R = \frac{F_R}{A_0} \quad (5.4)$$

considerando A_0 la sezione iniziale, che per un provino di forma cilindrica, come nel nostro caso della corda, è pari a $A_0 = \pi D^2/4$

Allungamento percentuale dopo rottura

Dall'esame del provino dopo la rottura può essere ricavato il valore dell'allungamento percentuale dopo rottura, $A\%$, (allungamento permanente della lunghezza fra i riferimenti dopo rottura ($L_i - L_0$)). E' definito come:

$$A\% = \frac{L_i - L_0}{L_0} \cdot 100 \quad (5.5)$$

dove L_0 è la lunghezza del tratto utile del provino prima dell'applicazione del carico e L_i (misurata congiungendo accuratamente i due pezzi del provino) è la lunghezza del provino dopo la rottura (Figura 5.4).

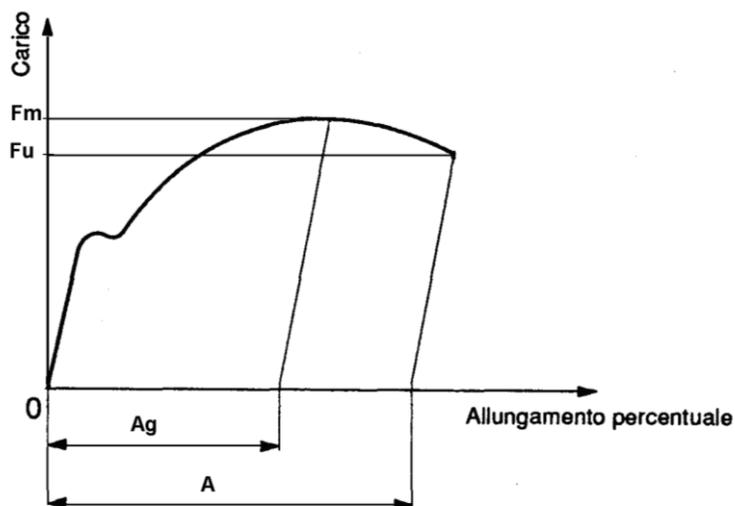


Figura 5.4
Definizione degli allungamenti.
A è l'allungamento percentuale alla rottura, A_g è l'allungamento percentuale in corrispondenza del carico di rottura F_m .

Elasticità

La capacità di un materiale metallico di immagazzinare energia quando è deformato elasticamente e di restituirla quando la deformazione è annullata si definisce "elasticità".

Questa grandezza si esprime con un parametro che si chiama "indice di elasticità" e che rappresenta l'energia elastica immagazzinata nell'unità di volume del materiale metallico quando è sottoposto ad uno sforzo continuamente crescente fino al limite di snervamento σ_y . Poiché l'energia elastica, come è noto, è esprimibile come:

$$L_e = \int_0^{\varepsilon_e} \sigma d\varepsilon = \frac{1}{2} \sigma_e \varepsilon_e \quad (5.6)$$

l'indice di elasticità diventa

$$I_e = \frac{1}{2} \sigma_y \varepsilon_y = \frac{1}{2} \frac{\sigma_y^2}{E} \quad (5.7)$$

Da questa relazione si deduce che per un elemento di macchina, il quale in esercizio non si deve deformare permanentemente e deve avere ottime proprietà elastiche, per esempio le molle, la scelta del materiale metallico va fatta tenendo conto della necessità che quest'ultimo abbia un alto limite di snervamento ed un basso modulo di elasticità.

5.3. Analisi dei Dati

Di seguito sono elencati i risultati ottenuti da tutti i campioni: nelle tabelle sono riportati i dati relativi alla prova di trazione mentre i grafici mostrano l'andamento del carico applicato σ in funzione della deformazione $(\Delta L/L_0)\%$.

Corda Acciaio inox AISI 302

	Provino	Carico di Snerv. (Mpa)	Carico di Rottura (Mpa)	Allungam. (%)	Modulo Elastico (Modulo di Young) (Mpa)
	1	1889	2031	1,5	167603
	2	1960	2045	1,5	167808
	3	1841	2076	1,6	162726
	4	1954	2187	1,8	158362
Media		1911	2085	1,6	164125
Dev. Std.		56,7	70,7	0,1	4503,0

Tabella 5.1 Valori, per ogni campione e medio, dei Carichi di Rottura e Snervamento, dell'Allungamento % e del Modulo di Young per la corda in acciaio inox AISI 302

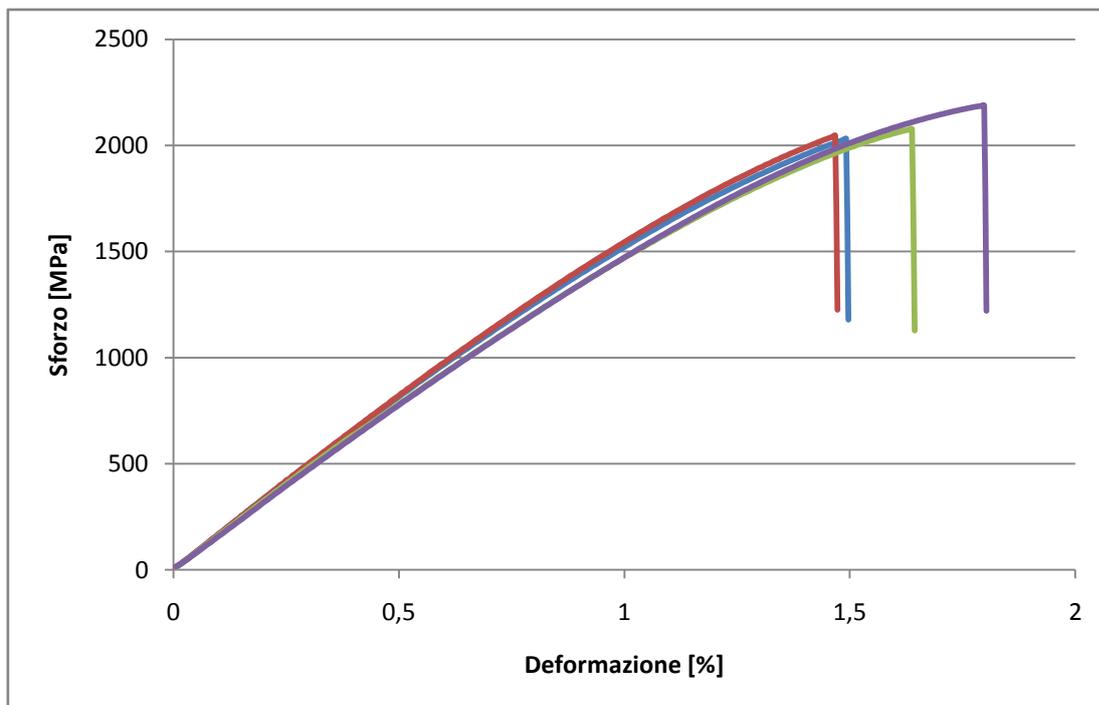


Figura 5.5 diagramma sforzo-deformazione per i provini della corda in acciaio inox AISI 302

Corda per violino Lenzner

	Provino	Carico di Snerv. (Mpa)	Carico di Rottura (Mpa)	Allungam. (%)	Modulo Elastico (Modulo di Young) (Mpa)
	1	2206	2422	1,3	198198
	2	2427	2476	1,7	196009
	3	2449	2549	1,5	187517
	4	2529	2580	1,6	185287
Media		2403	2507	1,5	191753
Dev. Std.		138	71	0,2	6309

Tabella 5.2 Valori, per ogni campione e medio, dei Carichi di Rottura e Snervamento, dell'Allungamento % e del Modulo di Young per la corda di violino Lenzner

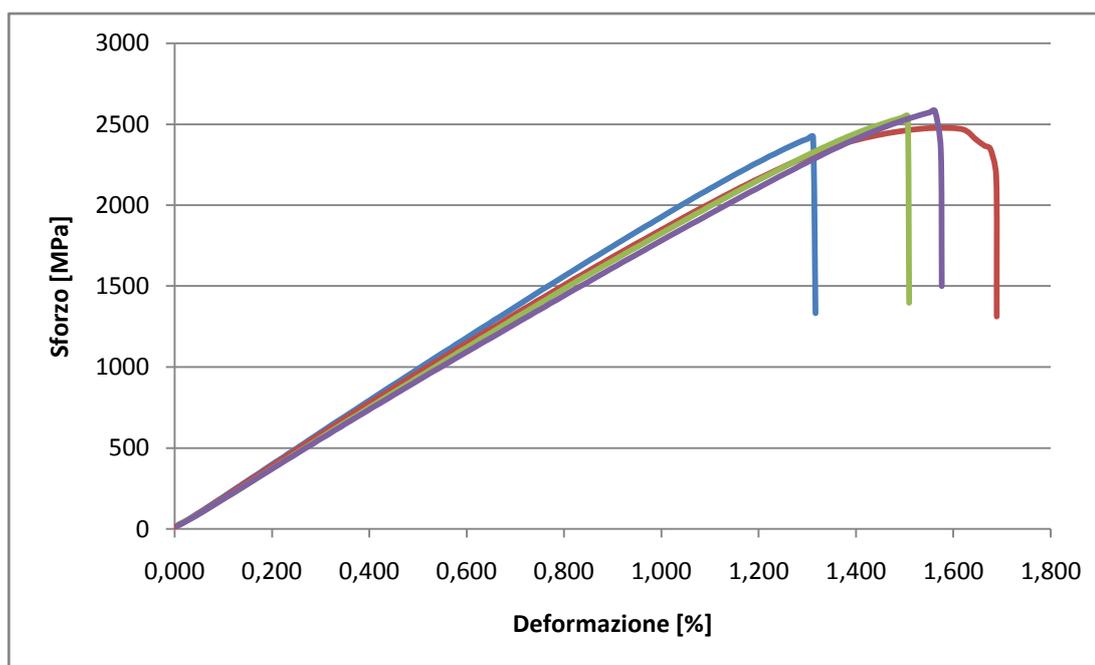


Figura 5.6 diagramma sforzo-deformazione per i provini della corda di violino Lenzner

5.4. Osservazioni

La prova di trazione è senza dubbio una delle prove più importanti per la caratterizzazione dei materiali. Da questa prova si possono ricavare varie grandezze utilizzabili nella scelta dei materiali. Nel caso in esame oltre ad ulteriori grandezze è

stato possibile determinare il carico di snervamento σ_y e di rottura σ_R , l'allungamento percentuale alla rottura A% ed il modulo di elasticità E.

Vista la loro importanza sperimentale di seguito sono riportati i grafici comparativi e riassuntivi dei valori medi dei campioni: uno rappresentante il modulo di elasticità E, uno rappresentante i carichi di snervamento σ_y e di rottura σ_R e un grafico rappresentante l'allungamento percentuale alla rottura A%.

I materiali si possono rompere, a seguito della prova di trazione, in differenti modi in relazione alla loro natura (chimica e cristallografica), allo stato di sollecitazione alla temperatura e alla velocità di deformazione a all'ambiente.

Osservando i grafici carico-deformazione dei campioni sottoposti alla prova di trazione si può notare che in entrambi i casi siamo di fronte ad un processo di rottura fragile (cioè la rottura avviene improvvisamente senza alcuna significativa riduzione della sezione trasversale del provino). Infatti, si nota che il processo di rottura è preceduto da una deformazione plastica molto piccola. Si può concludere quindi che siamo in presenza di materiali con una elevata fragilità, dovuta al processo meccanico di trafilatura che ha incrudito il materiale.

Il grado di strizione e conseguentemente la successiva fase di rottura dei materiali, durante la prova di trazione, dipende anche dalla purezza del materiale.

Infatti nei materiali puri la strizione può procedere fino al 100% di riduzione dell'area della sezione trasversale, che si riduce nella strizione ad un punto dando luogo ad una rottura duttile.

La presenza di impurità porta ad una diminuzione dell'area della sezione trasversale dovuta alla formazione di "microvuoti" interni.

La strizione è accompagnata nella zona di area minima da uno stato triassiale di sforzo di trazione. Qui hanno origine i microvuoti, all'interfaccia impurità(particelle)-matrice in quanto la deformazione plastica della prima è diversa della seconda e quindi non si preserva più la continuità tra una fase e l'altra.

All'aumentare della deformazione, i microvuoti formatesi al centro della zona di strizione cominciano a crescere dando luogo alla formazione di una cricca centrale che si propaga in direzione perpendicolare alla direzione di applicazione del carico.

Quando la cricca avanza interessando una grande porzione della sezione resistente del provino, gli sforzi normali all'asse del provino stesso tendono ad annullarsi, mentre si accresce quello agente in senso assiale, essendosi ridotta l'area resistente, fino alla rottura, solitamente fragile, del provino.

Nel nostro caso la rottura fragile e quindi la quasi assenza della strizione è comunque dovuta all'elevato grado di incrudimento del materiale.

Analizziamo ora i seguenti grafici:

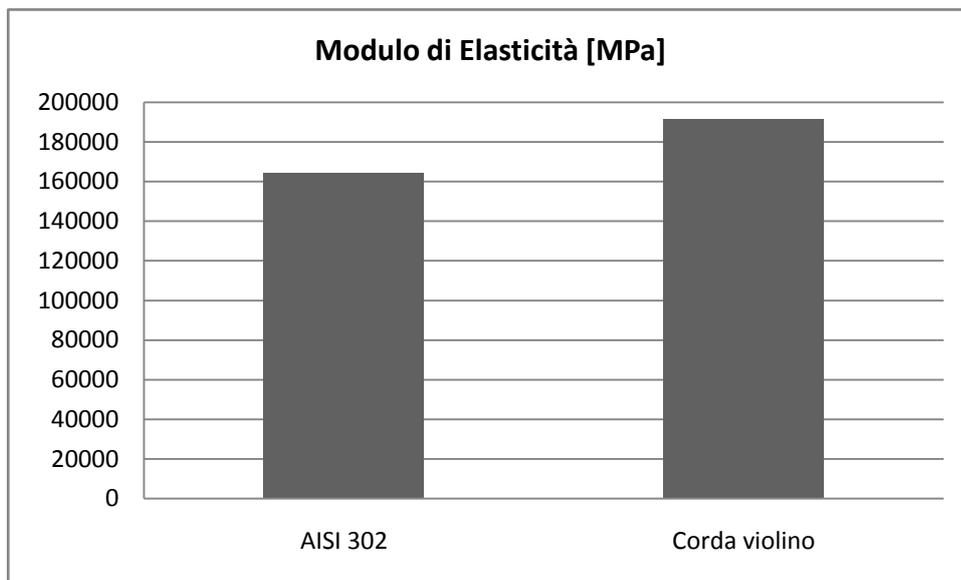


Figura 5.7 Confronto tra i valori medi del Modulo di Elasticità

Dal grafico in Figura 5.7, relativo al modulo di elasticità, si può notare che è inferiore nella corda in AISI 302 e che quindi, riferendosi a quanto detto in precedenza, è più facilmente deformabile della corda di violino.

La Figura 5.8 ne è la conferma, infatti l'allungamento percentuale dell'AISI 302 è mediamente maggiore. I valori abbastanza contenuti dell'allungamento percentuale dopo rottura, confermano il tipo di rottura fragile riscontrato in tutti i campioni.

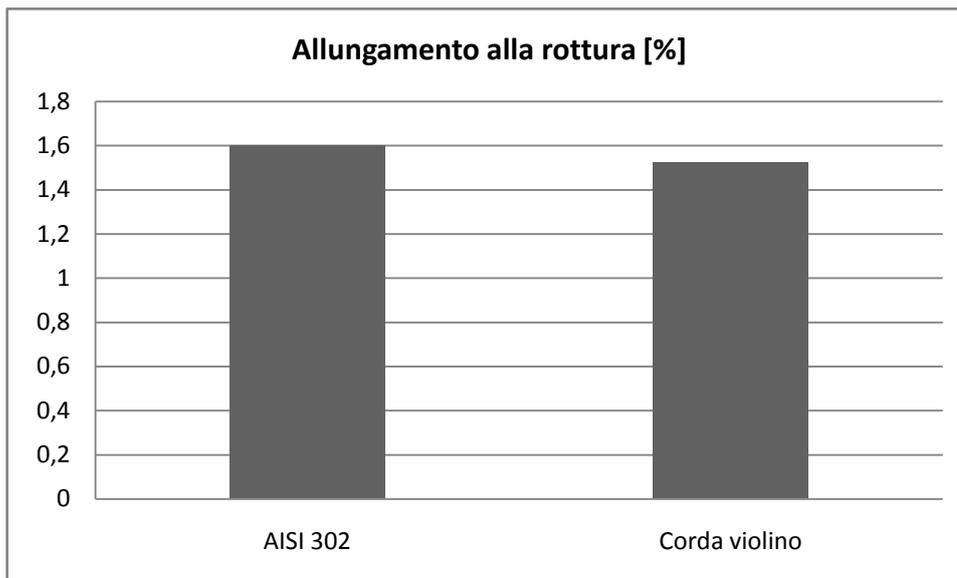


Figura 5.8 Confronto tra i valori medi dell'Allungamento %

Relativamente ai carichi di rottura e di snervamento, si nota dal grafico di Figura 5.9, che questi presentano valori elevati. Infatti, si superano anche i 2500 MPa con la corda di violino. Valori così elevati dei carichi sono dovuti in primo luogo all'elevato incrudimento che caratterizza le corde.

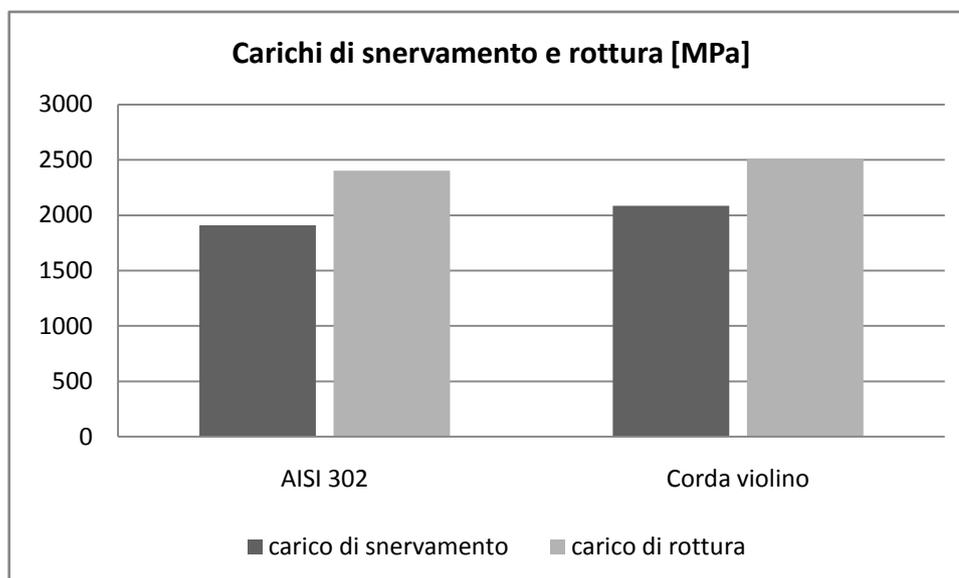


Figura 5.9 Confronto tra i valori medi dei carichi di rottura e di snervamento

Il materiale delle corde, durante il normale utilizzo, deve essere sottoposto a tensioni tali da restare sempre in campo elastico (anche per permettere alla corda una buona vibrazione); per garantire ciò il materiale deve presentare un elevato carico di

snervamento. Dalla letteratura, ma è ricavabile anche analiticamente (Formule 7.2 e 7.3), la corda in tensione di un violino (in questo caso il Mi) con un diametro compreso tra 0,26 e 0,30 mm sopporta una tensione di circa 88-90 N che per queste sezioni equivale a un carico inferiore a 1400 MPa, nettamente al di sotto dei carichi di snervamento delle due corde in esame.

5.5. Prove di Microdurezza Vickers

La durezza di un materiale è generalmente definita come la resistenza che esso oppone alla penetrazione di un altro corpo di durezza maggiore e di definita geometria, al quale è applicato lentamente un determinato carico nella direzione perpendicolare alla superficie da esaminare.

Nel test di microdurezza Vickers il valore della durezza è determinato tramite la misurazione delle dimensioni dell'impronta lasciata dal penetratore attraverso un opportuno microscopio. Il test è capace di fornire informazioni sulle caratteristiche di durezza dei materiali che non possono essere ottenute con i test convenzionali (Brinell, Rockwell, ecc.). Il test di microdurezza è riconosciuto come un valido strumento per controllare numerose operazioni di produzione e per scopi di ricerca.

Campi specifici includono:

- misurazione della durezza di un pezzo di precisione talmente piccolo da non essere misurabile con i comuni test di durezza.
- misurazione della durezza di prodotti a forma di lamine o fili che sono così sottili o così piccoli nel diametro da non essere misurabili con gli altri metodi.
- è usualmente compiuta con studi di durezza sulle sezioni trasversali di campioni ottenuti dopo le operazioni di produzione.
- misurazione della durezza di microcostituenti individuali.
- misurazione della durezza vicino alle estremità dei pezzi.

5.5.1. Impronte

Il test di microdurezza Vickers è realizzato con un penetratore costituito da una piramide retta, a base quadrata, di diamante e con angolo al vertice tra due facce opposte di $136^\circ \pm 0.5^\circ$ (Figure 5.10 e 5.11)

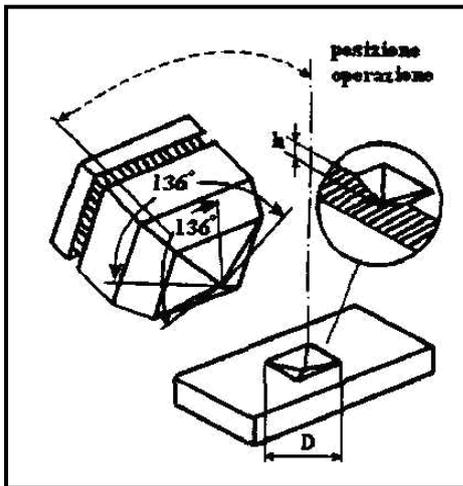


Figura 5.10 Penetratore Vickers

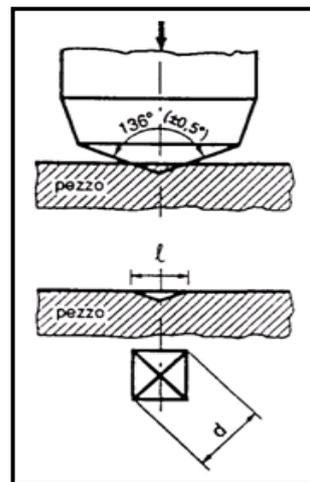


Figura 5.11 Prova di durezza Vickers

Il carico di prova stabilito dalle norme in relazione al tipo di materiale è applicato nella direzione dell'asse del penetratore, a sua volta perpendicolare alla superficie del pezzo, deve essere aumentato gradatamente e deve raggiungere il suo valore massimo senza interruzioni in 10÷15 secondi. Nelle apparecchiature migliori sia l'applicazione del carico che la sua durata sono regolate automaticamente. La misura delle dimensioni dell'impronta viene eseguita mediante la sovrapposizione automatica di un ingranditore sull'impronta stessa, di cui si misura la diagonale "D" con l'aiuto di un sistema micrometrico munito di un traguardo fisso ed uno mobile del campo oculare: si assume come valore " \bar{D} " la media aritmetica delle misure delle due diagonali.

A volte l'impronta si discosta dalla forma perfettamente quadrata (Figura 5.12a); si possono infatti avere impronte a forma "guancia" per ritorno del materiale attorno alle facce piane della piramide, come nei materiali dolci o ricotti (Figura. 5.12b), oppure a forma di "botte" per contrazione dei materiali, come nei materiali duri o incruditi (Figura. 5.12c)

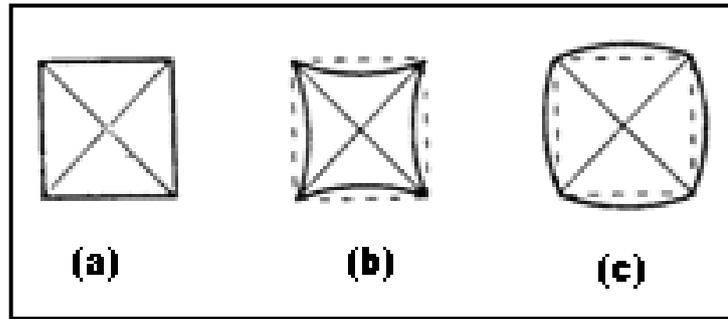


Figura 5.12 Forma dell'impronta Vickers: (a) quadrata, (b) a "guanciaie", (c) a "botte"

L'impronta Vickers usata ha la stessa forma geometrica di quella utilizzata nella convenzionale prova di durezza omonima (Figura 5.13). La profondità dell'impronta è approssimativamente pari ad $1/7$ della sua diagonale. Generalmente, le impronte devono essere distanti fra di loro e dal bordo esterno almeno 3 o 4 volte la lunghezza della diagonale; questo per evitare che la deformazione plastica dell'impronta vicina ed il conseguente incrudimento del materiale, influiscano sull'impronta successiva. Nel caso sia necessario effettuare le impronte a distanze minori di quelle indicate, queste devono essere eseguite sfalsate secondo un percorso a zig-zag.

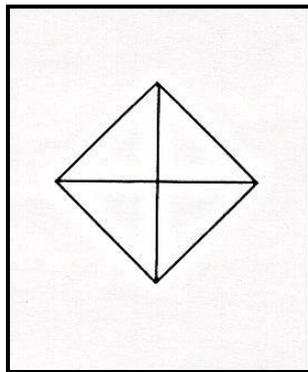


Figura 5.13
Impronta Vickers

5.5.2. Misurazione dell'impronta

La misurazione avviene registrando la lunghezza delle diagonali dell'impronta e dividendone la somma per due, in modo da valutarne il diametro medio. Quando l'impronta è troppo piccola per ottenere una lettura sicura, il carico deve essere aumentato; al contrario se l'impronta è eccessivamente ed ingiustificatamente larga, il carico deve essere diminuito. Quando un nuovo tipo di materiale o lega è testata,

alcune sperimentazioni con carichi diversi sono spesso richieste per individuare le condizioni di carico ottimali.

5.5.3. Preparazione del campione

Per l'esecuzione della misura è spesso richiesta una finitura a specchio della superficie da testare. Per permettere un'accurata misurazione della lunghezza delle diagonali dell'impronta, quest'ultima deve essere chiaramente definita; in generale, al decrescere del carico, la finitura della superficie deve essere la più spinta possibile. Tale fase è stata eseguita con le stesse modalità descritte al paragrafo 4.2.3.

5.6. **Esecuzione del test sui campioni**

Dopo aver eseguito l'analisi metallografica, i campioni sono stati sottoposti alla prova di microdurezza.

Queste prove sono state eseguite presso i laboratori SIM2 d'Ingegneria Gestionale di Vicenza. Per eseguire tali prove di microdurezza è stato utilizzato il microdurometro Vickers Leitz Miniload-2, collegato ad un elaboratore mediante una telecamera digitale. La telecamera è necessaria per acquisire le immagini delle impronte generate dal penetratore. Le immagini vengono poi utilizzate per misurare le diagonali delle impronte e quindi risalire alla superficie. Il sistema è gestito da un software, denominato QHV® versione 1.1 per Windows 3.1, e funge da interfaccia fra utente elaboratore e microdurometro. In Figura 5.14 viene riportata un'immagine del microdurometro utilizzato. Per compiere le prove è stato utilizzato l'obiettivo da 500 ingrandimenti. Dopo aver scelto la zona da testare si aziona il penetratore che impiega 15 secondi per la discesa e altri 15 secondi sono di permanenza con il carico applicato. Successivamente si rimuove il penetratore mediante una leva che permette il sollevamento manuale. Il passo successivo è l'acquisizione dell'immagine e la misura delle diagonali. Questa operazione viene svolta manualmente posizionando con il mouse dei segmenti sull'immagine dell'impronta; il software permette di calcolare automaticamente la durezza della superficie del pezzo nei punti considerati.



Figura 5.14 Microdurometro completo di telecamera collegato al computer.

Il metodo Vickers prevede l'applicazione sul penetratore di un determinato carico per effetto del quale penetra nel materiale ed ivi viene mantenuto per un tempo fissato. Nel caso in esame si è utilizzato un carico pari a 100 g.

La durezza secondo tale metodo è espressa dalla seguente formula:

$$HV = \frac{2 \cdot 0,102 \cdot F \cdot \sin \frac{136^\circ}{2}}{\bar{D}} \quad (5.8)$$

in cui F è il carico di prova in Newton e \bar{D} è la diagonale media dell'impronta in millimetri ottenuta dalla misurazione delle due diagonali.

Scopo delle prove di microdurezza Vickers è quello di ricavare l'andamento della durezza della superficie in esame, al fine di determinare il campo di variazione della stessa ed eventuali picchi.

Il termine microdurezza è usualmente riferito ai test di durezza che vengono effettuati con carichi che non eccedono 1 Kg. Alcuni di essi sono eseguiti con carichi molto leggeri come 1g, sebbene la maggior parte dei test sono effettuati con carichi compresi tra i 100 e 500g.

Le impronte sono state effettuate distanti fra di loro almeno 3 o 4 volte la lunghezza della diagonale; ciò per fare in modo che l'incrudimento prodotto da una impronta non invalidi i risultati dell'impronta successiva. Per avere un risultato quanto più preciso e fedele possibile, sono state effettuate 10 impronte sulle sole sezioni trasversali.

I risultati finali del test di microdurezza sono indicati nelle tabelle che seguono.

Per ogni campione vengono riportati i seguenti dati:

- numero impronta
- microdurezza sezione trasversale
- microdurezza media
- deviazione standard

Corda Acciaio inox AISI 302

Microdurezza Vickers	
Impronta num.	Durezza [Vickers]
1	583,8
2	624,7
3	649,9
4	606,6
5	597,8
6	639,5
7	560,4
8	537,2
9	548,8
10	615,5
Media	596,42
Dev. Std	38,32

Tabella 5.3 Risultati della prova di microdurezza sul campione di corda in acciaio inox AISI

302

Corda per violino Lenzner

Microdurezza Vickers	
Impronta num.	Durezza [Vickers]
1	715,0
2	659,7
3	648,4
4	738,1
5	696,5
6	719,7
7	748,2
8	781,0
9	762,3
10	755,9
Media	722,48
Dev. Std	43,72

Tabella 5.4 Risultati della prova di microdurezza sul campione di corda di violino Lenzner

5.7. Osservazioni

La prova di durezza Vickers, fra tutte le prove meccaniche, è quella che consente di ottenere risultati più rigorosi in virtù di una impostazione teorica quanto mai razionale. L'uso del penetratore di diamante, il materiale più duro che si conosca, fornisce con lo stesso carico una scala continua di durezza, adatta sia per materiali metallici ricotti che per quelli durissimi: ciò scaturisce dalla rigorosa indipendenza della prova dal carico applicato, in quanto le impronte sono sempre geometricamente uguali. Altri significativi vantaggi sono costituiti:

- dalla piccolezza dell'impronta, che consente di provare senza danno anche pezzi finiti;
- dall'esattezza della misurazione della diagonale, data l'applicazione automatica del carico e la forma quadrata dell'impronta, la cui diagonale è meglio misurabile del diametro di un cerchio;
- dalla possibilità di saggiare pezzi di piccolo spessore o induriti superficialmente scegliendo carichi che non provochino il danneggiamento del pezzo.

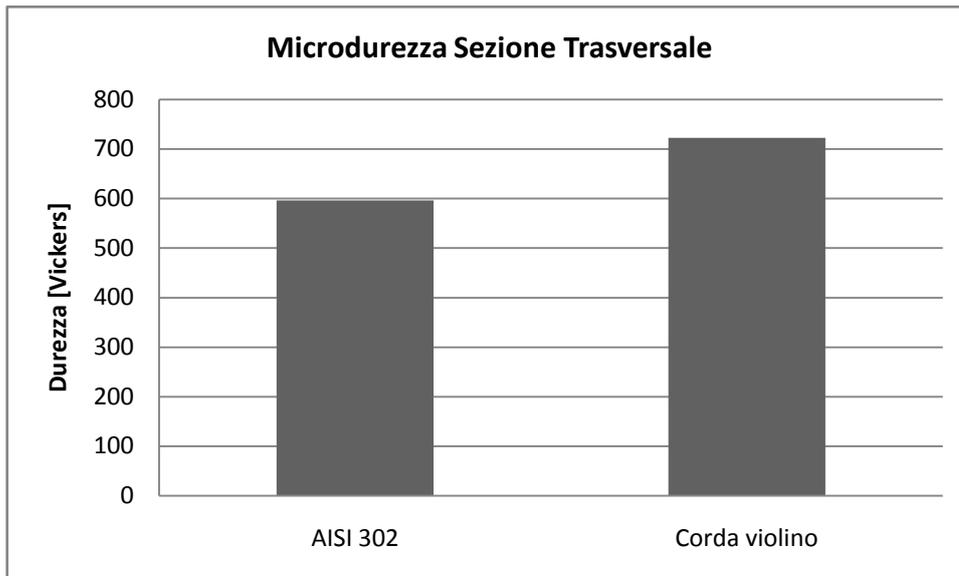


Figura 5.15 Confronto tra i valori medi della micro durezza

La Figura 5.15 mostra il confronto tra le micro durezza medie delle due corde. Si nota che la corda di violino supera di 100 Vickers la durezza dell'AISI 302. Probabilmente la differenza di durezza così marcata sta nel fatto che la corda di violino ha un diametro inferiore e quindi è stata maggiormente incrudita nel processo di trafilatura.

Da notare anche il fatto che la maggiore durezza della corda di violino rispecchia anche i maggiori carichi di rottura e snervamento evidenziati nella prima parte di questo capitolo.

CAPITOLO 6

Prove di Corrosione

6.1. Introduzione

La maggior parte dei materiali, in un modo o nell'altro, è soggetta a vari tipi di interazione con un numero elevato di ambienti diversi. Spesso, tali interazioni compromettono l'utilizzo del materiale a seguito del deterioramento delle sue proprietà meccaniche, fisiche ed estetiche.

I meccanismi deteriorativi sono diversi per le tre classi di materiali. Nei metalli si può avere la perdita rilevante di materiale sia per dissoluzione (**corrosione**) che per formazione di un film o di scaglia non metallica (**ossidazione**). I materiali ceramici sono relativamente resistenti al deterioramento, che di solito si verifica a temperature elevate o in ambienti piuttosto estremi. Per i polimeri viene utilizzato il termine **degrado**. I polimeri possono dissolversi in un solvente liquido o possono assorbire il solvente e rigonfiarsi; anche le radiazioni elettromagnetiche e il calore possono causare modifiche della loro struttura molecolare.

6.2. Corrosione dei materiali metallici

I materiali metallici a contatto con ambienti vari subiscono un decadimento per passaggio di loro elementi costitutivi allo stato di combinazione con sostanze ambientali; a questo decadimento si dà il nome di corrosione. La corrosione è detta anche antimetallurgia. I processi di corrosione tendono a riportare spontaneamente i materiali metallici al loro stato termodinamicamente più stabile, che è quello di combinazione con sostanze ambientali, in particolare con l'ossigeno, stato dal quale erano stati sollevati nei processi metallurgici di estrazione e di raffinazione mediante somministrazione di lavoro elettrico o chimico o di calore.

A seconda dello stato fisico dell'ambiente di contatto la corrosione dei materiali metallici può essere principalmente di due tipi: ad umido o a secco.

1. Si ha corrosione ad umido, quando la degradazione del materiale metallico avviene a causa del contatto con un ambiente acquoso di natura elettrolitica
2. Si ha corrosione a secco, quando l'ambiente è costituito da un'atmosfera gassosa, di solito ad elevata temperatura, o liquida di natura non elettrolitica (sali, metalli fusi, ecc.).

Questa distinzione è necessaria in quanto il meccanismo con cui avvengono i due tipi di corrosione è diverso.

Nel primo caso il meccanismo del fenomeno è di tipo elettrochimico, consiste, cioè, in una reazione chimica in cui vi è trasferimento di elettroni da una specie chimica all'altra. Tali processi seguono le leggi della termodinamica e della cinetica elettrochimica.

Nel caso della corrosione a secco invece il meccanismo è di origine chimica, nel senso che i processi di degradazione sono soggetti alle leggi della termodinamica e della cinetica chimica.

Nel caso della corrosione a umido, quindi elettrochimica, gli atomi di metallo perdono o forniscono elettroni in quella che è chiamata reazione di **ossidazione**. Il metallo ipotetico M che ha valenza n può essere ossidato secondo la reazione



M diventa uno ione di carica positiva $n+$ perdendo, nel processo, i suoi elettroni di valenza n ; e^{-} è utilizzato per simboleggiare un elettrone.

Il sito dove ha luogo l'ossidazione è chiamato **anodo**; l'ossidazione viene chiamata talvolta reazione anodica.

Gli elettroni rilasciati da ogni atomo di metallo che viene ossidato devono essere trasferiti e diventare parte di un'altra specie chimica attraverso una reazione di **riduzione**. Il sito dove si verifica la riduzione è chiamato **catodo**.

Una reazione elettrochimica completa deve essere formata da almeno una reazione di ossidazione e una di riduzione e ne sarà la loro somma; le singole reazioni di ossidazione e riduzione sono anche chiamate semireazioni. Non ci può essere alcun

accumulo di carica elettrica netta da parte degli elettroni e degli ioni; gli elettroni generati nel processo di ossidazione devono essere consumati per la riduzione.

6.3. Tipi di corrosione

È conveniente classificare la corrosione secondo il modo in cui si manifesta. La corrosione dei metalli viene in genere classificata in otto forme diverse: uniforme, galvanica, interstiziale, per vaiolatura (*pitting*), intergranulare, per dissoluzione selettiva, tensocorrosione e corrosione-erosione.

6.3.1. Corrosione generalizzata

L'attacco uniforme è una forma di corrosione che si verifica con la stessa intensità su tutta la superficie esposta e parte spesso da una scaglia o da un deposito. In senso microscopico, le reazioni di ossidazione e riduzione si verificano casualmente sopra la superficie. Alcuni esempi sono la ruggine dell'acciaio e del ferro e la perdita di lucentezza dell'argento.

6.3.2. Corrosione galvanica

La corrosione galvanica si verifica quando due metalli o leghe che hanno diverse composizioni sono collegati elettricamente mentre esposti a un elettrolito. Il meno nobile (o il metallo più reattivo) si corroderà nel particolare ambiente; il metallo più inerte, il catodo, sarà protetto da corrosione.

La velocità di attacco galvanico dipende dalle relative superfici anodo/catodo che sono esposte all'elettrolito ed è collegata direttamente al rapporto dell'area catodo/anodo; cioè, data una certa area catodica, un anodo più piccolo si corroderà più rapidamente di uno più grande. La ragione di questo fenomeno è che la velocità di corrosione dipende dalla densità di corrente, cioè dalla corrente per unità di superficie che si corrode.

6.3.3. Corrosione interstiziale

La corrosione elettrochimica può verificarsi anche come conseguenza di differenze di concentrazione, di ioni o di gas disciolti nella soluzione di elettrolito, tra due regioni dello stesso pezzo di metallo. Per una tale cella di concentrazione, la corrosione si verifica dalla parte che ha concentrazione inferiore. Un valido esempio di questo tipo di corrosione si verifica in fessure e cavità o sotto depositi di sporcizia o di prodotti di corrosione dove la soluzione diventa stagnante e vi è un esaurimento localizzato dell'ossigeno disciolto. La fessura deve essere abbastanza larga da permettere che la soluzione penetri, e tuttavia sufficientemente stretta da dar luogo a ristagno.

6.3.4. Vaiolatura (pitting)

La vaiolatura è un'altra forma di attacco di corrosione molto localizzato in cui si formano dei piccoli alveoli (pit) o fori. In genere la penetrazione dei pit si sviluppa in direzioni pressoché verticale rispetto la superficie. Questo tipo di corrosione è molto insidioso e spesso continua senza essere scoperta e con perdita di materiale molto bassa fino a che non si verifica rottura.

Il meccanismo della vaiolatura è probabilmente lo stesso di quello della corrosione interstiziale in quanto si ha ossidazione all'interno del pit e conseguente riduzione in corrispondenza della superficie. Si suppone che i pit crescano in verticale a causa della gravità e che la soluzione divenga più concentrata e densa in fondo alla cavità man mano che questa cresce.

Un pit può venire innescato da un difetto di superficie localizzato, come un graffio o una leggera variazione in composizione.

6.3.5. Corrosione intergranulare

La corrosione intergranulare si verifica per alcune leghe preferenzialmente lungo i bordi di grano e in determinati ambienti. Il risultato finale è la disintegrazione del campione lungo i suoi bordi grano. Questo tipo di corrosione è prevalente in alcuni acciai inossidabili se riscaldati a temperature comprese tra i 500 e gli 800°C per periodi

sufficientemente lunghi. Si pensa che questo trattamento termico porti alla formazione di piccole particelle di carburo di cromo (Cr_{23}C_6) che precipitano lungo i bordi grano. La precipitazione del carburo di cromo produce localmente zone povere di cromo rendendo il bordo grano estremamente suscettibile alla corrosione.

La corrosione intergranulare costituisce un problema particolarmente grave nella saldatura degli acciai inossidabili definito come degrado da saldatura.

6.3.6. Dissoluzione selettiva

La dissoluzione selettiva si verifica per leghe in soluzione solida, quando un elemento o un costituente viene rimosso preferenzialmente in seguito a un processo corrosivo.

6.3.7. Corrosione-erosione

La corrosione-erosione si verifica per azione combinata di un attacco chimico e di abrasione o usura meccanica, come conseguenza del movimento di un fluido. Potenzialmente tutte le leghe metalliche sono suscettibili a questo tipo di corrosione che risulta particolarmente per quelle leghe che si passivano³ formando un film superficiale protettivo; l'azione abrasiva può erodere il film, lasciando esposta la superficie metallica. Se lo strato protettivo non è in grado di riformarsi continuamente e rapidamente, si può verificare una intensa corrosione. I metalli relativamente teneri sono particolarmente a questa forma di attacco.

La natura del fluido può avere notevole influenza sul comportamento alla corrosione. La velocità di corrosione normalmente aumenta all'aumentare della velocità del fluido. Inoltre una soluzione è più erosiva quando sono presenti bolle e particelle solide sospese.

La corrosione-erosione avviene comunemente nelle tubazioni, specialmente in corrispondenza di curve, gomiti e cambiamenti repentini di diametro. Propulsori, palette di turbine, valvole e pompe sono suscettibili a questa forma di corrosione.

³ Alcuni metalli e leghe normalmente attivi, in particolari condizioni ambientali, perdono la loro reattività chimica e diventano completamente inerti. Questo comportamento, riscontrabile nel cromo, ferro, nichel, titanio e in molte loro leghe, si ritiene derivi dalla formazione di un film protettivo di ossido estremamente aderente e molto sottile sulla superficie del metallo.

6.3.8. Tensocorrosione

La tensocorrosione, talvolta definita fessurazione per corrosione sotto sforzo, deriva dall'azione combinata di uno sforzo di trazione applicato e di un ambiente corrosivo. Alcuni materiali potenzialmente inerti in un particolare mezzo corrosivo, diventano suscettibili a questa forma di corrosione quando viene applicato uno sforzo. In queste circostanze infatti si formano delle piccole cricche che poi si propagano in una direzione perpendicolare a quella dello sforzo applicato, col risultato che alla fine può verificarsi la rottura. Il comportamento a rottura è quello tipico di un materiale fragile, anche se la lega metallica è intrinsecamente duttile. Si possono avere rotture a livelli di sforzo relativamente bassi, anche molto al di sotto della resistenza a trazione.

La maggior parte delle leghe è soggetta a tensocorrosione in ambienti specifici, specialmente a livelli di sforzo moderati.

Alcuni acciai inossidabili, ad esempio, si corrodono sotto sforzo in soluzioni contenenti ioni cloruro, mentre gli ottoni sono particolarmente vulnerabili se esposti ad ambienti contenenti ammoniaca.

6.4. Rivestimenti metallici

L'impiego dei rivestimenti metallici costituisce uno dei metodi più comuni di prevenzione dalla corrosione. Particolarmente importanti sono, dal punto di vista corrosionistico, la continuità e la l'uniformità superficiali, nonché l'assenza di porosità dei depositi. Infatti, se il rivestimento è continuo e non poroso, l'attacco corrosivo andrà a interessare solo il rivestimento stesso.

In presenza di discontinuità nel rivestimento è pertanto essenziale conoscere il comportamento elettrochimico dei sistemi galvanici formati dai rivestimenti e dalla base. Rivestimento e base formano delle coppie galvaniche in cui il rivestimento, a seconda che funga da anodo o da catodo rispetto la base, può offrire protezione o invece stimolare l'attacco.

A questo riguardo interessano innanzitutto la nobiltà assunta nell'ambiente considerato dal rivestimento e dalla base, poi la sovratensione del processo catodico sul rivestimento e infine la resistenza elettrica dell'ambiente.

Se il metallo che costituisce il rivestimento ha nobiltà più elevata della base, la corrosione del materiale metallico sottostante, ovviamente in presenza di discontinuità nel rivestimento, risulta allora tanto più stimolata quanto più bassa è la sovratensione del processo catodico e quanto più bassa è la resistenza elettrica dell'ambiente aggressivo.

Se invece il metallo che costituisce il rivestimento risulta, nelle condizioni di impiego, meno nobile del materiale metallico ricoperto, le eventuali discontinuità originali o insorte del rivestimento, e in particolare quindi la sua porosità, perdono in gran parte il loro carattere di pericolosità, in quanto è il metallo stesso del rivestimento che in tal caso assume funzionamento anodico e quindi subisce l'attacco.

Rivestimenti di questo tipo sono quelli di zinco, di cadmio e in certi ambienti anche quelli di alluminio e di stagno su acciaio.

6.5. Tecniche di rivestimento

I metodi di ottenimento dei rivestimenti metallici possono essere divisi essenzialmente in tre gruppi: meccanici, fisici o chimici.

Tra i metodi meccanici troviamo placcatura per laminazione e rivestimenti a spruzzo.

I metodi fisici comprendono si dividono a loro volta in quelli ad alta temperatura e a bassa temperatura. Ad alta temperatura compaiono il rivestimento per immersione, per diffusione di metalli e per sovrasaldatura. Un metodo fisico a bassa temperatura è l'evaporazione sotto vuoto.

Anche i metodi chimici possono operare a alta o a bassa temperatura. Tra i primi sono presenti la deposizione da fase di vapore, costituita di solito da un cloruro, per riduzione o dissociazione dello stesso. Tra i metodi chimici a bassa temperatura si ricorda l'elettrodeposizione, lo spostamento e la riduzione chimica.

Qui di seguito verranno descritti più nel dettaglio i metodi elencati precedentemente.

6.5.1. Placcatura per laminazione

Con questo procedimento il materiale metallico da proteggere viene ricoperto con uno strato più o meno spesso di un altro metallo mediante applicazione in diversa misura di un'alta temperatura e pressione. In generale si può avere placcatura:

- per sovrasaldatura, portando a fusione il metallo ricoprente;
- per saldatura e laminazione; si ottiene la giunzione laminando i due metalli a temperatura inferiore a quella di fusione, ma comunque abbastanza elevata;
- per esplosione o a onde d'urto, utilizzando la pressione provocata da un'esplosione controllata.

Lo spessore del rivestimento può essere molto variabile a seconda delle esigenze.

6.5.2. Rivestimento a spruzzo

Con questo metodo, metalli o leghe fuse vengono spruzzati con un getto d'aria o di gas inerte contro la parete da rivestire. Il rivestimento a spruzzo è usato principalmente per depositare zinco e alluminio. Con le deposizioni con fiamma a plasma è possibile depositare anche metalli refrattari, ossidi e altri materiali dalle elevatissime caratteristiche meccaniche e di resistenza alla corrosione.

L'aderenza di questi rivestimenti alla base risulta modesta a meno che la base non sia stata accuratamente preparata aumentandone ad esempio la rugosità superficiale.

Inoltre, essendo il risultato dell'impatto di piccole gocce di metallo liquido ricoperte da un velo di ossido presentano una porosità maggiore degli altri rivestimenti. Ciò implica che risultino efficaci in caso agiscano da anodo rispetto la base.

6.5.3. Rivestimento per immersione

È il metodo più antico, più semplice e spesso più economico, per cui oggi ancora largamente utilizzato. Consiste nel rivestire il materiale metallico da proteggere immergendolo e lasciandolo per un breve periodo in un bagno costituito da un altro metallo fuso.

Naturalmente le superfici da rivestire devono essere previamente sgrassate, disossidate e asciutte. L'umidità è in genere eliminata facendo passare il pezzo da ricoprire in un *flusso* (cioè uno strato di sale fuso) presente alla superficie del bagno di metallo fuso.

Il metodo è usato solo per rivestire l'acciaio con metalli basso fondenti (soprattutto zinco, piombo, stagno, alluminio).

Se si osserva una sezione trasversale di un pezzo rivestito per immersione, si può notare una gamma di strati a composizione variabile, a partire da quelli più interni a composizione molto prossima a quella del materiale base, fino a quelli più esterni praticamente costituiti solo dal metallo di rivestimento. La formazione di queste leghe è condizione necessaria per ottenere un rivestimento aderente. Ad esempio ferro e rame non possono essere rivestiti direttamente dal piombo perché non formano leghe con quest'ultimo e quindi non li *bagna*, cioè non aderisce alla loro superficie. Per questo si ricorre a deposizioni intermedie che possano legarsi sia al metallo base che a quello del rivestimento finale.

Tra gli svantaggi di questo metodo bisogna sottolineare la diminuzione di duttilità dei pezzi ricoperti a causa della fragilità indotta dalle leghe che costituiscono il rivestimento. Per questo è necessario operare in condizioni di temperatura e composizione del bagno tali da minimizzare la diffusione del metallo fuso nella base.

I vantaggi sono la semplicità, la velocità di effettuazione del rivestimento e la possibilità di rivestire parti interne e anche pezzi di forma complicata (in cui difficilmente si ottiene uno spessore omogeneo del rivestimento).

6.5.4. Rivestimenti per diffusione

La diffusione può prodursi fra solidi, fra liquidi e solidi, fra gas e solidi.

Dal punto di vista della protezione da corrosione, particolarmente importanti sono i processi di saturazione superficiale del ferro con zinco (sherardizzazione), con alluminio (calorizzazione), con cromo (cromizzazione), con silicio (silicizzazione) e con leghe cromo-alluminio (cromo calorizzazione) e cromo-silicio (cromo silicizzazione).

Lo spessore del rivestimento dipende dalla temperatura e dalla durata del processo. Inoltre questi rivestimenti, come quelli per immersione, sono caratterizzati da composizione chimica e a struttura variabili passando dall'esterno all'interno.

6.5.5. Riduzione chimica

Con questo procedimento si immerge la superficie da rivestire in una soluzione acquosa contenente ioni del metallo da depositare e un adatto riducente e si opera in condizioni tali per cui la reazione di riduzione degli ioni metallici è permessa, per motivi cinetici, preferenzialmente o esclusivamente solo sulle superfici da rivestire e non invece in seno alla soluzione stessa.

La deposizione può essere effettuata su materiali metallici, ma anche su materiali non conduttori, come ceramiche, materie plastiche, vetro. Ecc.

I depositi, a struttura amorfa e microcristallina, sono caratterizzati da bassa porosità ed elevata durezza.

I bagni di riduzione chimica hanno un potere penetrante praticamente infinito. Infatti, i rivestimenti ottenuti per questa via sono di spessore uniforme, indipendentemente dalla forma delle superfici da rivestire e pertanto sono particolarmente adatti per ricoprire superfici fortemente profilate, parti interne di tubi, valvolame, fori, filettature, ecc.

6.5.6. Elettrodeposizione

È il procedimento più usato per l'ottenimento di rivestimenti metallici. In generale si opera in soluzioni acquose. In questi ambienti la possibilità di elettrodeposizione dei metalli poco nobili è limitata dal processo concorrente di sviluppo di idrogeno. Di fatto non è possibile ottenere da soluzioni acquose metalli meno nobili dello zinco. Naturalmente il problema può essere superato operando in sali fusi o in soluzioni non acquose. In pratica vengono elettrodepositati rivestimenti di oro, argento, rame, piombo, stagno, zinco, cadmio, cromo, nichel, ferro, cobalto, ecc. puri o in lega fra loro o con altri elementi.

Lo spessore dei rivestimenti può essere accuratamente controllato e può variare da frazioni a centinaia di micron, a seconda della necessità. Controllate e variate possono essere anche le proprietà fisiche e meccaniche (lucentezza, porosità, durezza, resistenza meccanica, ecc.) dei depositi, in particolare variando la natura e composizione dei bagni, la densità di corrente, la temperatura, l'agitazione dei bagni, ecc.

Al fine di aumentare il potere penetrante dei bagni si aggiungono sostanze che generalmente aumentano la sovratensione catodica, mentre per avere un attacco uniforme degli anodi, si aggiungono sostanze de passivanti, ad esempio cloroioni. Per ottenere depositi livellati o lucenti si ricorre a sostanze livellanti o brillantanti.

Accade però che alcune di queste sostanze creano delle regioni di trazione o, più raramente, di compressione ed è necessario aggiungere sostanze che creino stati di sollecitazione meccanica opposta.

Per quanto riguarda la densità di corrente di deposizione, i risultati migliori, concernenti l'aspetto, l'uniformità, la porosità e altre caratteristiche meccaniche o chimico fisiche, si ottengono quando questa è compresa in opportuni intervalli di valori che variano al variare della temperatura, della concentrazione degli ioni del metallo da depositare, l'agitazione dei bagni, ecc. a densità di corrente o troppo basse o troppo elevate si possono avere depositi non uniformi, molto porosi o addirittura spugnosi, spesso inquinati da ossidi, idrossidi, talora poco aderenti.

6.6. Prova di Corrosione

L'analisi è stata eseguita presso il laboratorio di metallografia SIM2 del Dipartimento di Tecnica e Gestione dei Sistemi Industriali dell'Università di Padova.

L'apparato sperimentale comprende: la camera per la nebbia salina (Figura 6.1), la soluzione salina, aria compressa, gli ugelli atomizzatori, i supporti per i provini, il sistema di riscaldamento della camera e le misure di controllo.

L'analisi è avvenuta secondo le seguenti fasi:

- Preparazione dei provini.
- Esecuzione della prova.
- Analisi dei campioni allo stereoscopio.



Figura 6.1 Camera per la nebbia salina e disposizione dei provini

6.6.1. Preparazione dei provini

Attraverso tale fase si è provveduto, tramite troncatura, ad ottenere quattro provini per ogni campione, ognuno pari ad una lunghezza di 23 cm.

Tali provini sono stati successivamente puliti con l'utilizzo di acetone in modo da eliminare eventuali sporcizie presenti ed ottenere così una superficie pulita. I provini sono stati maneggiati con i guanti per evitare che su di essi si potessero depositare elementi corrosivi che potrebbero andare ad influire sulla prova e quindi sul processo di corrosione. Successivamente fissati al supporto di plastica applicando un carico di 500 g per tenere in tensione i provini.

6.6.2. Esecuzione della prova

I provini sono stati posizionati in supporti di plastica e fissati all'interno della camera inclinati di un angolo di 30° rispetto alla verticale e una sezione terminale tenuta verticalmente e a cui è attaccato il carico.

Ogni provino è stato collocato in modo da presentare uguale esposizione alla nebbia salina, impedendo eventuale gocciolamento tra i diversi provini.

All'interno della macchina si sono mantenute condizioni costanti di temperatura, pari a 35°C, e umidità, pari al 50%.

La soluzione salina usata per il test di corrosione è stata preparata dissolvendo 5 parti in peso di cloruro di sodio (NaCl) su 95 parti di acqua distillata. Il sale usato è esente da nickel e rame, contiene iodato di sodio al di sotto dello 0.1% e impurità totali al di sotto dello 0.3%. Il pH della soluzione mantiene valori compresi nell'intervallo 6.5÷7.2.

La prova consiste nel fare permanere i provini all'interno della camera per il tempo desiderato, passato il quale i provini vengono estratti dalla macchina e asciugati con aria compressa per non danneggiare la superficie e successivamente puliti con acetone per rimuovere i residui dei sali che si depositano sulla superficie. Infine sono stati osservati al microscopio.

6.6.3. Analisi dei campioni allo stereoscopio

L'analisi è stata effettuata mediante l'impiego di uno stereoscopio (Figura 6.2) sul quale è stata montata una telecamera collegata ad un computer provvisto del software MicroImage che ha permesso l'acquisizione e l'analisi dell'immagine.



Figura 6.2 Microscopio stereoscopio

Nel caso oggetto di studio, queste tre fasi sono state ripetute analogamente per quattro volte, in quanto, di volta in volta è stato variato il tempo di permanenza dei provini all'interno della camera di corrosione in nebbia salina. Sono state eseguite quindi le prove di corrosione a 60 min, 180 min, a 480 min ed infine a 1440 min per potere osservare l'andamento del processo corrosivo nei vari campioni e nel tempo.

L'analisi dei provini allo stereoscopio (e i relativi dati forniti) è stata eseguita considerando una lunghezza dei provini pari a 8 cm e suddividendo questo tratto in 20 sezioni che venivano osservate in sequenza. Per ogni sezione si sono annotati il numero dei punti di innesco di corrosione e tramite il software evidenziate le aree corrose e calcolata l'area corrosa percentuale.

Di seguito sono elencati i risultati ottenuti da tutti i campioni:

- Diverse immagini dei provini.
- Nelle tabelle sono riportati i dati relativi alla prova di corrosione:
 1. Punti di innesco
 2. Percentuale di area corrosa

Di seguito saranno riportate per ogni campione le immagini più significative e successivamente i dati relativi alla prova.

Corda Acciaio inox AISI 302

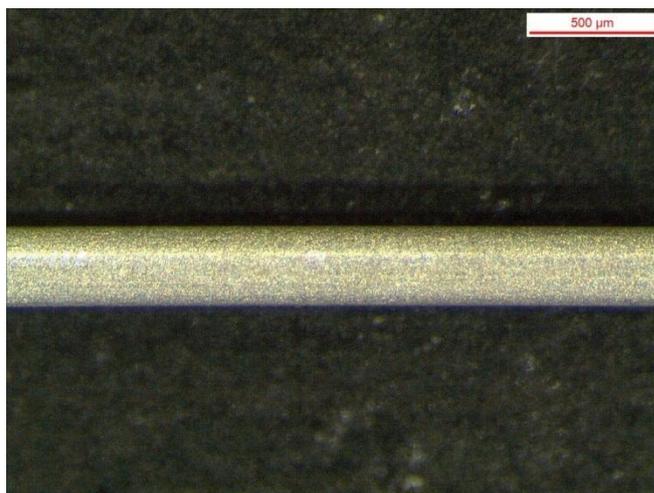


Figura 6.3 particolare visto a 25x del campione di corda AISI 302 prima dell'esposizione alla nebbia salina

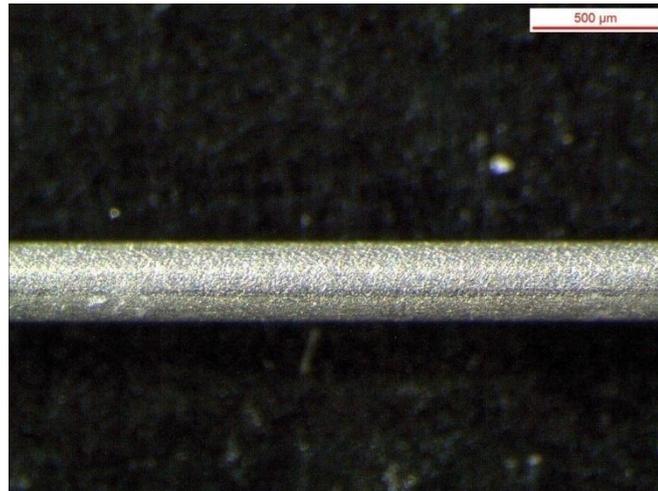


Figura 6.4 particolare visto a 25x del campione di corda AISI 302 dopo 1440 min di esposizione alla nebbia salina

DURATA PROVA	60 minuti	180 minuti	480 minuti	1440 minuti
N°PUNTI INNESCO	0	0	0	0
AREA CORROSA (%)	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%

Tabella 6.1 Dati della prova di corrosione sul campione di corda AISI 302

Corda per violino Lenzner

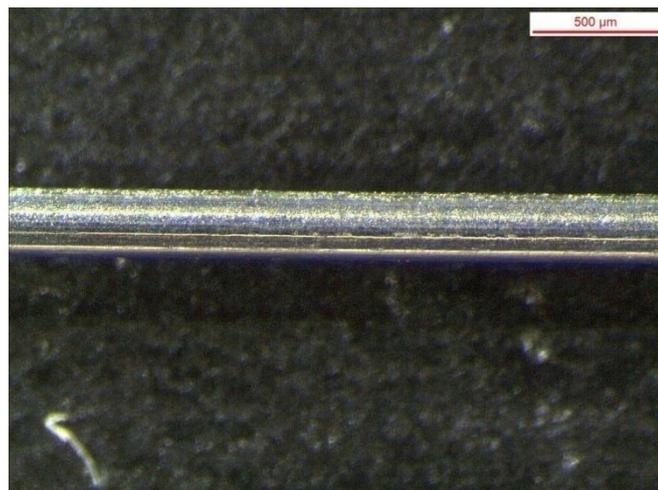


Figura 6.5 particolare visto a 25x del campione di corda di violino prima dell'esposizione alla nebbia salina

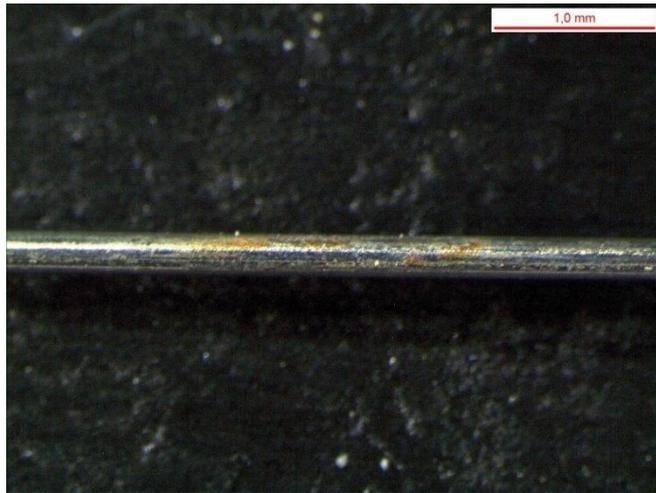


Figura 6.6 particolare visto a 16x del campione di corda di violino dopo 480 min di esposizione alla nebbia salina



Figura 6.7 particolare visto a 25x del campione di corda di violino dopo 1440 min di esposizione alla nebbia salina

DURATA PROVA	60 minuti	180 minuti	480 minuti	1440 minuti
N°PUNTI INNESCO	0	0	3	15
AREA CORROSA (%)	0,0%	0,0%	0,5%	10,7%

Tabella 6.2 Dati della prova di corrosione sul campione di corda di violino

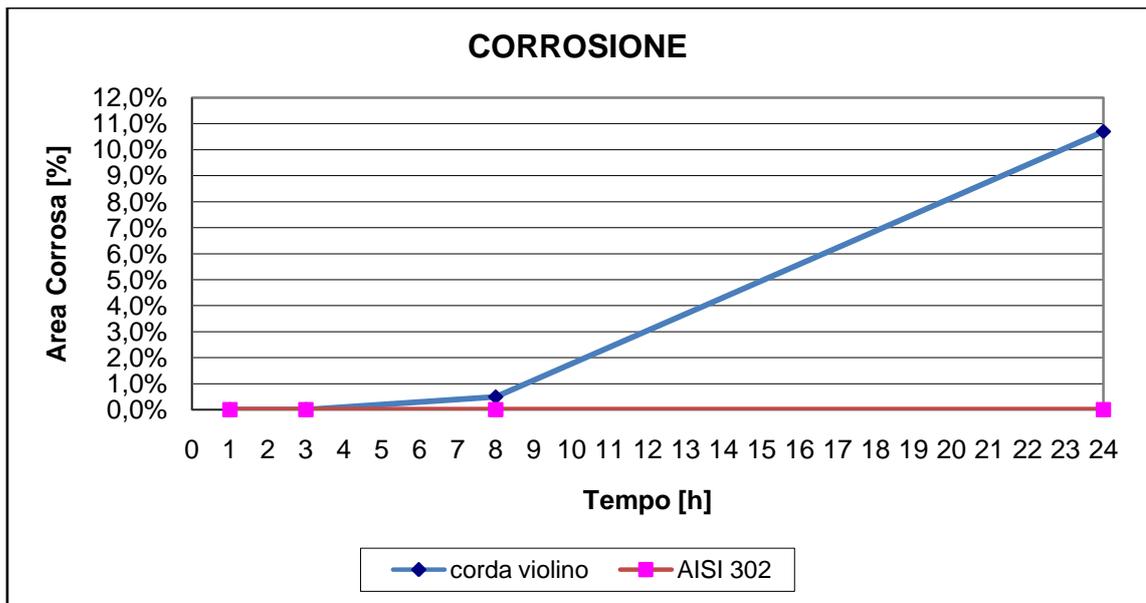


Figura 6.8 Grafico riassuntivo dell'andamento della corrosione in nebbia salina

6.7. Osservazioni

La prova di corrosione in nebbia salina ha rispecchiato le ipotesi fatte a priori. Gli inneschi comparivano sotto forma di macchie di ruggine e aree in cui il rivestimento risulta danneggiato.

Il grafico in Figura 6.8 riassume efficacemente l'andamento della corrosione subita dai due tipi di corde. Il fattore più importante evidenziato da tale grafico e anche dalla Figura 6.4 è la totale assenza di aree corrose nella corda in acciaio inox AISI 302 anche dopo 24 h. Tuttavia anche la corda di violino rivestita ha resistito bene alla corrosione manifestando significativi effetti solo dopo un giorno nella camera (Figura 6.7). L'immagine riportata è solo un esempio di come si manifesta la corrosione ma non rispecchia a pieno il tratto esaminato. Infatti tale segmento di corda presentava solo il 10,7 % di area corrosa al termine delle 24 h.

La prova non aveva lo scopo di determinare la durata delle due corde in quanto le condizioni a cui erano sottoposte non emulano quelle che una corda sopporta durante l'utilizzo dello strumento. La tensione che una corda di quella sezione sostiene quando è accordata è molto superiore rispetto al carico applicato durante la prova, mentre, d'altro canto, il sudore delle mani del musicista e le condizioni atmosferiche non sono così aggressive come nella camera di corrosione.

La prova serviva solamente per confrontare la resistenza alla corrosione delle due corde sottoposte alle stesse condizioni di carico e ambientali.

Infine si deve sottolineare una cosa: il fatto che l'acciaio inox a 24 ore non abbia presentato fenomeni corrosivi non significa che mantenendolo in quelle condizioni non subirà mai corrosione. Così come non è possibile stabilire il comportamento della corda di violino oltre le 24 ore.

Per concludere questa sezione si può decisamente affermare, però, che la resistenza alla corrosione dell'acciaio inox è superiore a quella della corda rivestita.

Il prossimo capitolo, relativo all'analisi acustica, è decisivo per stabilire se la scelta di una corda in acciaio inox può essere valida.

CAPITOLO 7

Prove Acustiche

7.1. Introduzione

Con il termine “suono” si intende la sensazione, come essa si manifesta a livello cerebrale, di una perturbazione di natura meccanica, a carattere oscillatorio, che interessa il mezzo interposto tra sorgente e ascoltatore.

Per potersi trasmettere a distanza, il suono richiede la presenza di un mezzo materiale, tipicamente l'aria.

Una sorgente di suono può essere qualsiasi corpo sottoposto a occasionale deformazione. Le molecole d'aria a contatto col corpo raccolgono tale perturbazione e trasmettono lo stato vibratorio a quelle via via più lontane.

Lo spostamento delle molecole comporta variazioni di pressione locale, che si propagano come onde fino alla distanza consentita dalle proprietà di assorbimento del mezzo.

È importante notare che non tutte le oscillazioni meccaniche generano suoni, giacché noi siamo in grado di percepire la perturbazione solo se l'onda di pressione che colpisce il timpano ha una frequenza compresa tra i 20 e i 20000 Hz.

7.2. Onde sinusoidali

Ciascuna componente spettrale del suono è descrivibile da un'onda sinusoidale pura, definita da un ben individuato valore di frequenza. In matematica se l'onda è piana può essere descritta dalla funzione:

onda piana viaggiante
$$y(x, t) = y_0 \sin \left[2\pi \left(\frac{x}{\lambda} + \frac{t}{T} \right) \right] \quad (7.1a)$$

dove $y(x, t)$ è la deformazione indotta nel mezzo dalla pressione meccanica al tempo t nella posizione x , T è il *periodo* di oscillazione dell'onda, ovvero il reciproco della

frequenza f , e λ è la distanza spaziale tra due massimi successivi dell'onda (*lunghezza d'onda*); y_0 è l'ampiezza, o deformazione massima, che si raggiunge quando la funzione sinusoidale viene ad assumere valore 1.

La funzione nell'equazione (7.1a) viene anche, e più spesso, scritta in un modo più semplice introducendo una pulsazione ω , data da $2\pi/T$, e un numero d'onda k , dato da $2\pi/\lambda$. Allora si ottiene:

$$y(x, t) = y_0 \sin[kx + \omega t] \quad (7.1b)$$

Le grandezze caratteristiche di maggiore interesse del suono sono:

- **Lunghezza d'onda λ** : distanza tra due massimi consecutivi d'onda
- **Periodo T** : tempo necessario per compiere un'intera oscillazione
- **Frequenza f** : numero di oscillazioni eseguite in un secondo ($f = 1/T$)
- **Ampiezza y_0** : massima deviazione dalla posizione di equilibrio
- **Pulsazione ω** : $2\pi f$
- **Numero d'onda $k=2\pi/\lambda$**
- **Velocità $v = \lambda f = \omega/k$**

È importante sottolineare che il parametro fisico oggettivo di un'onda sonora è la frequenza f che descrive il numero di oscillazioni meccaniche al secondo prodotte dalla sorgente. L'altezza del suono percepito, anche se direttamente collegabile a f possiede anche aspetti di natura soggettiva.

7.3. L'uomo e la scienza del suono

La storia del rapporto tra l'uomo e la scienza del suono affonda le sue radici nel tempo fino a 4000 anni fa. In quegli anni i cinesi compivano esperimenti facendo suonare canne di diversa lunghezza, dando così inizio allo studio che, nel corso dei secoli, approdò a risultati decisivi.

A segnare un punto di svolta è stata l'esperienza del monocordo, databile nel sesto secolo a.C. I greci costruirono questo piccolo, semplice strumento, che li portò a

cogliere direttamente il nesso tra l'altezza del suono e la sua lunghezza d'onda (la distanza fra due massimi consecutivi dell'onda).

Il monocordo è una corda a estremi fissi, tesa sopra una cassa di risonanza, come schematizzato in Figura 7.1. La tensione della corda può essere variata tramite una sorta di spinotto. Un ponticello scorrevole permette di spostare uno degli estremi della corda in un qualsiasi punto intermedio, così da variare a piacimento la lunghezza della parte di corda che si intende porre in oscillazione.

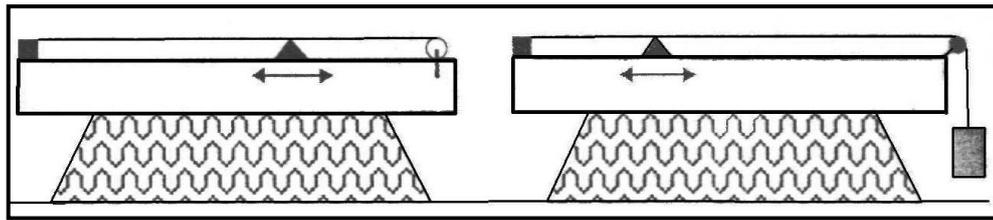


Figura 7.1 Schema del monocordo

Il risultato che si ottiene, a tensione fissa, è che l'altezza del suono, a giudizio dello sperimentatore, è inversamente proporzionale alla lunghezza della parte di corda che è in azione.

La lunghezza d'onda fondamentale del suono emesso (λ), in realtà, è pari al doppio della lunghezza della corda vibrante, per cui, se la velocità (v) di propagazione della deformazione meccanica sulla corda si potesse assumere costante al variare della frequenza del suono, l'equazione $v = \lambda f$, permetterebbe di dare, per la frequenza fondamentale f del suono emesso, la seguente dipendenza dalla lunghezza L della corda vibrante:

$$f = \frac{v}{2L} \quad (7.2)$$

Il monocordo dei greci permise, in particolare, di definire e capire importanti aspetti, tra i quali la "tensione della corda"; incrementando la tensione della corda, l'altezza del suono aumenta, ciò permette di stabilire, attraverso l'equazione (7.2), che la velocità di propagazione dell'onda sulla corda cresce con la tensione. Una misura quantitativa, fatta sostituendo allo spinotto di regolazione una carrucola che permetta di tenere la

corda in tensione tramite un peso variabile a piacere, porta a stabilire una relazione del tipo:

$$v = \sqrt{\frac{T}{\mu}} \quad (7.3)$$

dove T è la *tensione* e μ è la *densità lineare* della corda (massa per unità di lunghezza, $\mu = m/L$). Ciò conferma il noto fatto che anche lo spessore della corda influisce sull'altezza del tono fondamentale emesso che risulta più grave per corde massicce.

7.4. Caratteri Fisici, Musicali e Psicologici del suono

Un suono è caratterizzato da numerosi aspetti che lo rendono distinguibile da un qualsiasi altro.

Caratteri fisici	Caratteri soggettivamente percepiti										
	Altezza	Sonorità	Timbro	Durata	Vibrato	Tremolo	Tempo	Ritmo	Battimenti	Terzo suono	Consonanze
Frequenza	1	2	2						2		
Intensità del suono	1	1	2					2		2	1
Contenuto spettrale		1	1								2
Durata	1	1	1	1			3	2			2
Modulazione della frequenza					1						
Modulazione dell'ampiezza					1	1					
Intermittenza							3	1			
Sovrapposizione di suoni	2		2						1		3
Combinazione di suoni			1							1	
Corrispondenza di armoniche			2								1
Inviluppo	1	1	3								

Tabella 7.1 Raffronto tra le caratteristiche del suono musicale, definite dal punto di vista meccanico (fisico) e da quello psicofisico (perceptivo). La *campana grande* stabilisce la corrispondenza essenziale tra il parametro fisico e quello musicale, le *campane piccole* indicano che esiste un'influenza incrociata media (3), medio-debole (2) e molto debole (1).

Nelle successive sezioni verranno presentate quelle che sono le caratteristiche fondamentali elencate anche nella Tabella 7.1.

7.4.1. La Sonorità

Prima di cominciare a parlare di sonorità è il caso di introdurre il concetto di intensità sonora. L'*Intensità* di un suono è definita in senso rigoroso come l'energia sonora trasmessa nell'unità di tempo in una determinata direzione attraverso l'unità di superficie perpendicolare a quella direzione.

In pratica, dipende dalla forza con cui si produce il suono e consente di distinguere i suoni in forti o deboli.

L'unità di misura dell'intensità sonora è W/m^2 . Altro dato quantitativo legato all'intensità di un suono è la potenza emessa misurata in Watt che è possibile determinare strumentalmente con buona precisione.

Lo studio della corrispondenza tra lo stimolo acustico e la sensazione di sonorità percepita è uno degli aspetti più interessanti della psicofisica.

Il termine psicofisica fu introdotto da G.T. Fechner il quale formulò una legge che afferma che tra sensazione percettiva e potenza sonora sussiste una relazione logaritmica. Ma essendo la sonorità influenzata anche da altri fattori, la relazione logaritmica non è sempre valida e Fechner introdusse la scala di sonorità S con unità di misura il *son*. Per definizione, 1 son corrisponde alla *sensazione di volume sonoro* prodotta da un suono puro di frequenza 1000 Hz e di intensità 40 dB. Un altro parametro, introdotto da H. Barkhausen nel 1926, prende il nome di *livello sonico* o *sonia*. Esso è definito attraverso un'altra unità, il *phon*, il cui valore è preso coincidente con il decibel per suoni puri di 1000 Hz.

Son e phon sono collegati dalla relazione:

$$S = 2^{\frac{LL-40}{10}} \quad (7.4)$$

dove S è in son e LL in phon. L'audiogramma normale di Fletcher e Munson che ne deriva mostra che la sensibilità di percezione dipende fortemente dall'intensità e dalla frequenza.

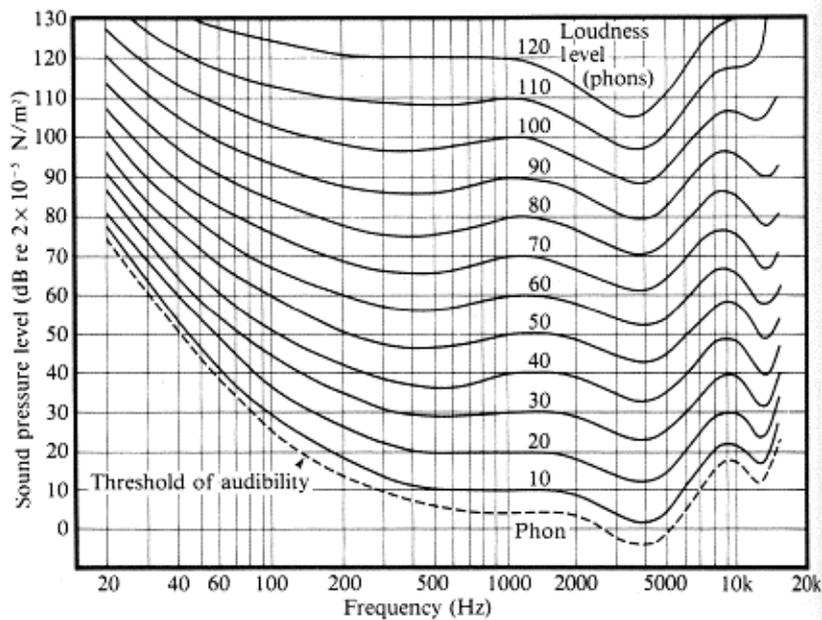


Figura 7.2
 Curve isofoniche in funzione della frequenza del suono emesso, ottenute da Fletcher e Munson. Il livello sonico percepito (sonia), espresso in phon, è indicato accanto a ciascuna curva. Notare che per un suono di 1000 Hz i valori in dB e in phon sono coincidenti.

Il discorso si fa più complicato quando l'ascoltatore è sottoposto contemporaneamente a più suoni. Spesso accade che il soggetto percepisca solamente il più forte, si dice allora che questo suono maschera l'altro.

La soglia di mascheramento è la pressione sonora alla quale il suono mascherato comincia ad essere percepito. Si riconosce la maggiore attitudine dei suoni di minore frequenza a mascherare quelli di frequenza più alta.

Il fenomeno si spiega col fatto che un tono mascherante eccita la membrana basilare non solo nel punto preciso che corrisponde alla sua frequenza, ma in una zona più ampia che compete ad altre frequenze, la cui percezione viene in tal modo disturbata.

L'equazione (7.4) fornisce risultati attendibili solo per toni puri, ma per valutare la sensazione derivante da un suono complesso si può operare alternativamente:

- Si calcola l'intensità soggettiva da un'analisi dello spettro del rumore in banda
- Si utilizza uno strumento di rilevazione che ricostruisca la risposta dell'orecchio.

Non disponendo di apparecchiature che ricostruiscono la risposta dell'orecchio ci affidiamo a una delle procedure analitiche che tengono conto anche dell'effetto del mascheramento che però spesso utilizzano grafici di impiego lungo e noioso.

La più semplice è la procedura di Stevens che si basa sulle curve riportate in Appendice B. Essa usa un fattore di pesatura $F = 0,3$ per banda d'ottava e $0,15$ per $1/3$ d'ottava.

Dato lo spettro di un rumore si determinano attraverso il grafico gli indici per ogni banda. L'influenza più grande è quella dell'indice più elevato e si fa ricorso alla relazione:

$$S_t = S_{\max}(1 - F) + F \sum S_i \quad (7.5)$$

7.4.2. L'Altezza

L'altezza dipende dalla frequenza delle vibrazioni: maggiore è la frequenza, più alto è il suono e viceversa. Tuttavia l'altezza percepita di un suono è molto suscettibile a variazioni di altri parametri.

L'altezza quindi è una componente assai soggettiva e si può affermare che tra percezione psicofisica e attributo fisico (la frequenza) non sussiste una corrispondenza di carattere lineare. Da uno studio si è deciso di esprimere l'altezza in una unità di misura denominata *mel* e in funzione della sua reale frequenza. Si ottiene una curva dall'andamento assai non lineare in cui l'intera gamma dei suoni compresi tra 0 e 20000 Hz è compresa tra 0 e 2500 mel.

Se è vero che la frequenza è l'attributo fondamentale per descrivere l'altezza di un suono vi sono altre variabili che esercitano la loro influenza. Uno di questi è l'intensità del suono, con effetti più marcati nei suoni puri (diapason). Accade che all'aumentare dell'intensità l'altezza sembra variare.

Quando all'orecchio giunge un insieme di armoniche esatte, di pari intensità, la sensazione è quella di una completa fusione in un suono complesso e l'altezza percepita è quella della fondamentale anche quando questa fosse debole o persino assente dalle parziali ricevute.

7.4.3. La Durata

La Durata riveste una notevole importanza per la precisa percezione da parte del nostro orecchio delle altre qualità del suono. Una durata troppo breve dell'emissione sonora non consente di stabilire con esattezza altezza, intensità e timbro. Il nostro orecchio ha un funzionamento molto complesso. Quando avviene la sollecitazione

sonora, si mette in moto il meccanismo del nostro udito che, tuttavia, per raggiungere lo stato normale di lavoro ha bisogno di un breve tempo, detto “tempo d’integrazione” durante il quale altezza, intensità e timbro raggiungono i loro punti ottimali di risposta.

7.4.4. Il Timbro

La parola timbro viene utilizzata per descrivere la qualità del suono, altresì detta *coloritura*. In altre parole il timbro è ciò che ci permette di distinguere due suoni con le stesse caratteristiche di altezza, intensità e durata ma prodotti da due sorgenti diverse.

Il timbro dipende in primissimo luogo dal contenuto spettrale di armoniche calcolabile matematicamente attraverso *l’analisi di Fourier*.

Anche il timbro ha una forte componente soggettiva ma non può essere rappresentato su una scala specifica come per la sonorità in son o l’altezza in mel.

Dal punto di vista dell’impressione soggettiva, si tende a classificare il timbro in vari modi definendolo attraverso estremi che possono andare da *opaco a brillante*, da *freddo a caldo*, da *puro a ricco*, da *compatto a diffuso*, da *vuoto a pieno*, da *neutro a colorito*.

Grazie al geniale Hermann von Helmholtz si è giunti alla conclusione che l’elemento precipuo che porta alla definizione di timbro sia lo spettro delle armoniche del suono.

Molte sue osservazioni hanno ancora validità e si possono riassumere nei seguenti punti:

- Suoni con un limitato numero di armoniche, diciamo dalla prima alla settima, sono più ricchi e pastosi di quelli puri ma ne conservano in pieno, anzi ne accentuano, il carattere dolce e morbido; tra questi troviamo il pianoforte nei registri medio-alti e alcuni strumenti a fiato.
- Se si hanno armoniche più elevate, soprattutto se intense, il suono tende ad acquistare un carattere più aspro e frizzante, tipicamente del violino.
- I suoni mancanti delle armoniche pari, come avviene negli strumenti a canna chiusi a un estremo (clarinetto o canne d’organo “tappate”) hanno un carattere vuoto e nasale.
- L’intensità della prima armonica gioca un ruolo fondamentale nel dare “stoffa” al suono: se essa è debole, la pienezza del suono risulta impoverita.

- Circa le altre armoniche, in generale la seconda conferisce al suono limpidezza, la sesta e l'ottava lo rendono chiaro e squillante, la settima e la nona lo inaspriscono, la decima ne aumenta la chiarezza e introduce un sentore metallico.
- Il timbro non sembra dipendere dalle differenze di fase tra le varie armoniche costituenti il suono. Fatto che, anche se oggi non risulta esattamente verificato, è di certo un'eccellente approssimazione alla realtà delle cose.

Tridimensionalità del timbro

Come detto in precedenza, il timbro non è definibile con un valore, ma risente di una molteplicità di variabili, in modo analogo ad un colore. In analogia ai colori è possibile esprimere in modo quantitativo le caratteristiche del timbro attraverso un diagramma tridimensionale analogo a quello che si utilizza in colorimetria. Nel caso della visione la retina dispone di tre tipi di fotorecettori, che hanno massima sensibilità nel rosso, nel verde e nel blu-violetto. Qualsiasi colore si può poi ottenere con un'opportuna miscela di questi colori, detti primari. Benché l'orecchio funzioni meccanicamente, e non fotochimicamente come la retina, è possibile fissare le caratteristiche salienti del timbro in termini di un *tristimolo*, o *codice a tre numeri*, rappresentanti ciascuno la sonorità (in son) di una diversa regione dello spettro. La prima regione comprende solo il tono fondamentale, la seconda i primi tre ipertoni, multipli secondo 2-3-4 della frequenza fondamentale (zona di frequenze intermedie), la terza tutte le rimanenti armoniche (frequenze alte).

Si chiamino S_t , S_m e S_a rispettivamente le sonorità corrispondenti alle tre regioni. La sonorità totale è $S = S_t + S_m + S_a$. le tre frazioni

$$t = \frac{S_t}{S} \qquad m = \frac{S_m}{S} \qquad a = \frac{S_a}{S} \qquad (7.6)$$

rappresentano i contributi delle tre regioni alla formazione del timbro. La loro somma vale 1.

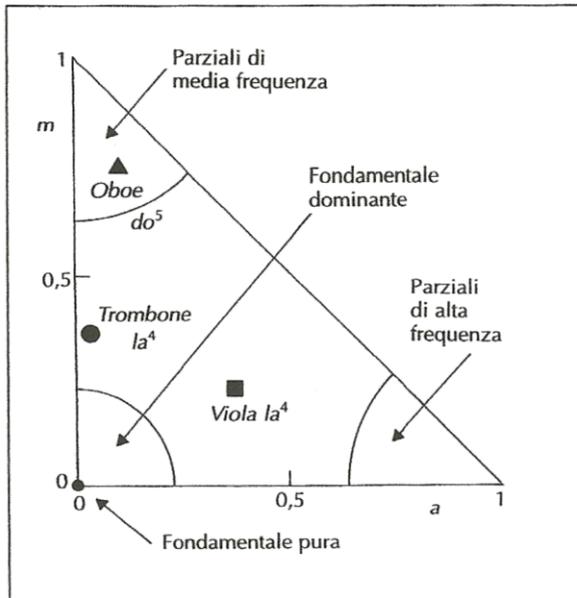


Figura 7.3

Rappresentazione del tristogramma associato ad alcuni possibili timbri in condizioni di suono stazionario

7.5. Analisi dell'Emissione Sonora delle diverse corde

Oggetto di tale indagine è stata l'analisi spettrale dell'emissione sonora della corda in acciaio inox AISI 302 e della corda di violino della marca Lenzner. L'analisi è stata eseguita presso il laboratorio di Acustica Applicata del Dipartimento di Tecnica e Gestione dei Sistemi Industriali dell'Università di Padova.

7.5.1. Descrizione della prova

Le fasi dell'analisi sono state:

- Acquisizione del segnale sonoro d'emissione delle corde attraverso un'analisi in pressione in prossimità delle stesse, in modo che la componente diretta del suono prevalga sulla componente diffusa, caratteristica del locale di misura.
- Elaborazione del segnale per ricavare lo spettro delle frequenze del suono e studio delle armoniche del segnale per ottenere il timbro di ciascuna corda per il successivo confronto.

Di seguito saranno descritte le due fasi.

Acquisizione del segnale sonoro

Per rendere la misura caratteristica dell'emissione sonora delle diverse corde si è dovuto introdurre una procedura di acquisizione del segnale fissa, cioè creare un modello rigido che eviti l'introduzione di variabili esterne al soggetto d'indagine.

Per questo si è scelto di:

- utilizzare un solo violino
- collocare e orientare il microfono sempre allo stesso modo,
- eseguire l'accordatura della corda sempre con lo stesso strumento.

La pressione di un suono dipende: dal locale in cui si trova la sorgente sonora, dalla distanza di rilevazione, dal rumore di fondo e dalla sorgente stessa. La scelta di collocare il microfono in prossimità dello strumento (Figura 7.4) ha permesso di considerare la sola componente diretta del suono, escludendo quella diffusa che è caratteristica del locale di misura. Così facendo anche il rumore di fondo è quantitativamente non rilevante, poiché il campo di pressione che si crea in prossimità del microfono si può assumere dovuto alla sola emissione della cassa armonica (per un'analisi più dettagliata si dovrebbe fare riferimento ad uno studio adeguato).

Un'altra costante nel sistema di acquisizione è il violino: benché sia vero che la risonanza della cassa armonica influenzi la forma dell'onda di pressione, la presenza di eventuali armoniche di ordine superiore alla fondamentale si può supporre dovuta alle singole corde.

Per poter eseguire un confronto analitico sono state acquisite tre emissioni per ogni corda.

La catena di misura che è stata usata per l'analisi, è composta da:

- Microfono ad incidenza casuale GRAS 40 AE (per misure in campo libero);
- Preamplificatore GRAS 26 AF;
- Cavo LEMO a 7 pin (GRAS AA0008 lungo 3 mm);
- Scheda di acquisizione SYMPHONIE e PCCard (interfaccia PCMCIA);
- Calibratore AKSUD 5113.



Figura 7.4

Posizionamento dei microfoni rispetto allo strumento, appositamente vicini affinché prevalga la componente diretta del suono

Elaborazione del segnale

L'elaborazione del segnale è stata eseguita con il software "dBFA" della 01dB e del foglio di calcolo "Excel" di Microsoft.

Per prima cosa si è scelto di utilizzare ai fini dell'analisi un intervallo di tempo, costante, di 5 secondi.

Il suono è stato poi elaborato dal software per ottenere lo spettro delle frequenze.

Una prima analisi ha evidenziato che, a meno di piccole incertezze, tutte le emissioni manifestano la stessa frequenza portante, corrispondente, o comunque molto vicina, alla frequenza d'accordatura di 660 Hz.

Questa è l'armonica fondamentale, e di seguito comparivano tutti gli ipertoni. L'intervallo dello spettro analizzato è compreso tra 20 e 10000 Hz, in primo luogo per facilitare lo studio delle armoniche e in secondo luogo perché si è notato che dopo i 10000 Hz le armoniche avevano un'intensità trascurabile rispetto alle prime.

Una volta ottenuta la tabella con le varie armoniche e i rispettivi livelli sonori, sempre tramite il software, si è proceduto a calcolare il valore della sonorità di ciascuna frequenza.

Per collocare il timbro di ciascuna corda all'interno del diagramma della Figura 7.3 è stato necessario calcolare i valori di a e m secondo le equazioni (7.6).

Per ottenere S_t si è utilizzato semplicemente il diagramma di Fletcher e Munson (Figura 7.2) relativamente all'armonica fondamentale ricavando il valore in phon e successivamente convertito in son tramite la (7.4).

Per S_a e S_m invece si è utilizzata la procedura di Stevens considerando le armoniche 2, 3 e 4 per S_m e le armoniche dalla 5 alla 10 per S_a .

Di seguito sono riportati, per ogni tipo di corda, i seguenti risultati:

- Lo spettro in frequenza dell'emissione sonora che riporta l'armonica fondamentale (1) e le successive 9 armoniche.
- Una tabella che riporta la frequenza e il livello in decibel di ogni armonica.
- Valori delle sonorità S_t , S_m e S_a e dei tre contributi t , m e a e rappresentazione del tristogramma.

Corda Acciaio inox AISI 302

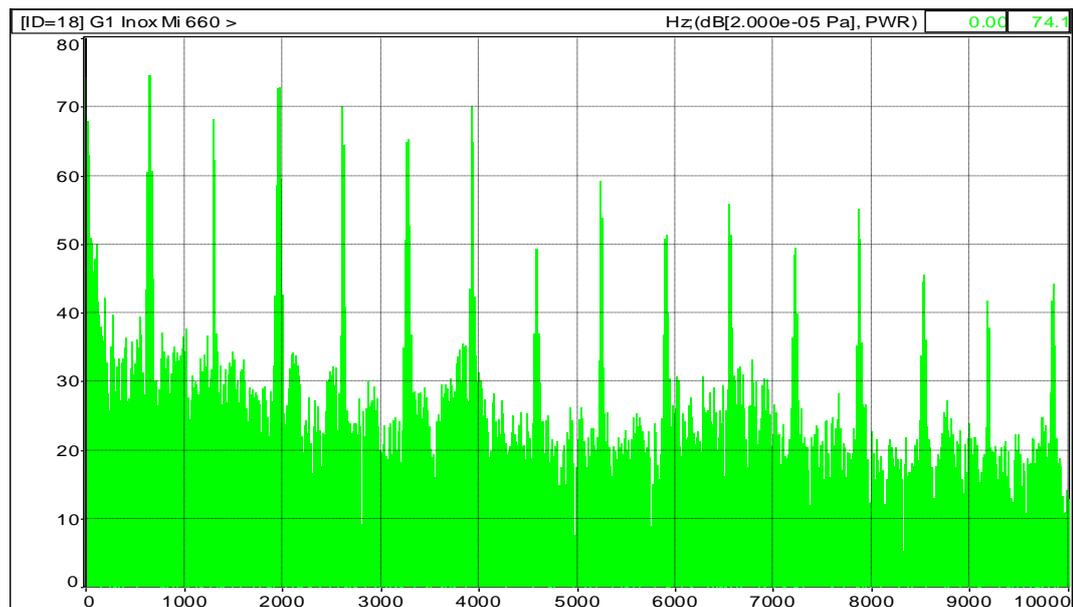


Figura 7.5 Spettro delle frequenze della corda in acciaio inox AISI 302

Armonica	Frequenza [Hz]	Livello Sonoro [dB]	Sonorità [son]
1	656,3	75,8	13
2	1312,3	68,0	8
3	1969,0	74,1	15
4	2625,3	70,0	11
5	3281,7	66,3	9,5
6	3938,2	69,9	25
7	4593,7	50,5	4

8	5250,6	59,1	7,5
9	5906,9	52,4	4,3
10	6564,1	55,8	6

Tabella 7.2 tabella contenente le prime 10 armoniche e i rispetti valori di livello sonoro e sonorità della corda in acciaio inox AISI 302

$S_t = 13$ son $t = 0,19$
 $S_m = 20,7$ son $m = 0,30$
 $S_a = 34,4$ son $a = 0,51$
 $S = 68,1$ son

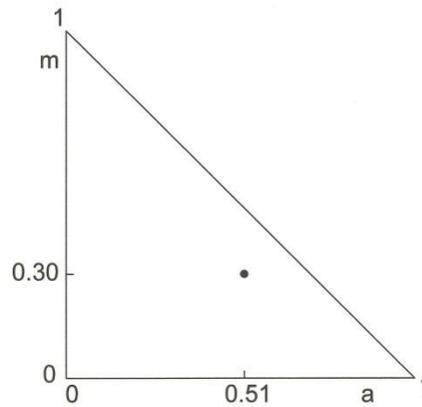


Tabella 7.3 valori delle sonorità e dei contributi t, a e m e rappresentazione del tristimolo per la corda in acciaio inox AISI 302

Corda per violino Lenzner

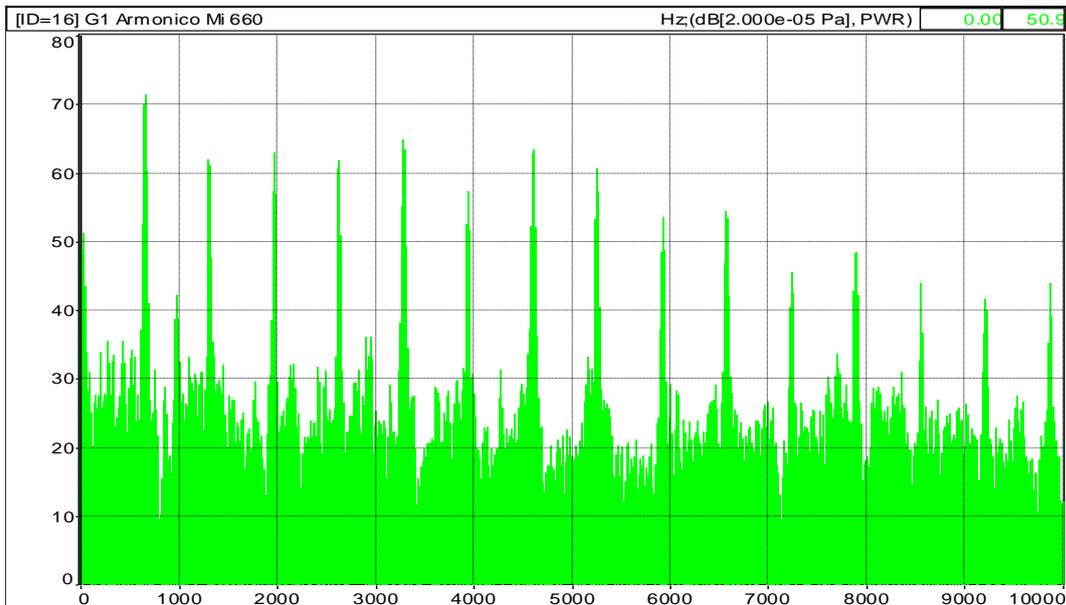


Figura 7.6 Spettro delle frequenze della corda di violino Lenzner

Armonica	Frequenza [Hz]	Livello Sonoro [dB]	Sonorità [son]
1	658,1	72,1	10,6
2	1317,7	65,9	6,2
3	1974,5	62,9	7,1
4	2632,7	62,6	7,9
5	3292,1	65,6	10
6	3948,9	57,4	5,6
7	4606,6	64,4	10
8	5265,2	60,9	7,9
9	5926,2	53,5	5,6
10	6580,2	55,2	6,2

Tabella 7.4 tabella contenente le prime 10 armoniche e i rispetti valori di livello sonoro e sonorità della corda di violino Lenzner

$S_t = 10,6 \text{ son}$ $t = 0,25$
 $S_m = 11,9 \text{ son}$ $m = 0,28$
 $S_a = 20,6 \text{ son}$ $a = 0,48$
 $S = 43,1 \text{ son}$

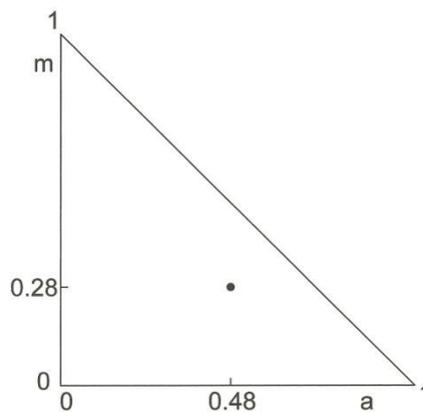


Tabella 7.5 valori delle sonorità e dei contributi t , a e m e rappresentazione del tristimolo per la corda di violino Lenzner

7.6. Osservazioni

Dai grafici degli spettri in frequenza dell'emissione sonora, si può notare, in ogni corda, la presenza della frequenza dell'armonica fondamentale (o principale) di 660 Hz che corrisponde alle frequenza del Mi. Si può notare anche la presenza delle armoniche successive alla principale, i cosiddetti ipertoni.

Il fatto più importante è la collocazione del timbro delle due corde analizzate.

Si può facilmente osservare, infatti, che la rappresentazione del tristimolo associato al timbro del suono prodotto dalle due corde si colloca pressoché nello stesso punto del diagramma.

Ciò sta a evidenziare che il timbro del suono emesso dalla corda Mi a 660 Hz è sostanzialmente indipendente dal materiale usato.

Questo risultato è importantissimo per quanto riguarda questo lavoro di tesi e verrà ripreso nelle conclusioni finali assieme alle caratteristiche meccaniche e fisico-chimiche delle corde in esame.

Conclusioni

L'obiettivo di questa tesi consisteva nel trovare un valido sostituto alle corde tuttora in commercio. Il problema principale delle corde che troviamo nei negozi è che sono costituite da acciai armonici rivestiti con delle leghe che ne prevengono la corrosione.

Tali rivestimenti però influiscono sulle caratteristiche meccaniche delle corde e con l'andare del tempo subiscono dei danni scoprendo il materiale base e rendendolo vulnerabile alla corrosione e all'ossidazione provocata dal sudore delle mani e dall'umidità dell'aria.

L'ideale sarebbe stato utilizzare l'acciaio inossidabile, acciaio legato contenente almeno l'11 % in peso di cromo che, con il suo ossido, fornisce protezione dalla corrosione.

Si è proceduto quindi al confronto tra un filo di acciaio inox della qualità AISI 302 e una corda in commercio (di quelle più economiche).

Il filo di acciaio inox, fornito dall'azienda TFA FILINOX di Treviso, e la corda rivestita sono state sottoposte a analisi microstrutturali, meccaniche, di resistenza alla corrosione e acustiche.

L'analisi della microstruttura eseguita precedentemente l'attacco chimico ha evidenziato alcuni frammenti scuri nella matrice. Tali frammenti sono impurità (ossidi o componenti estranee) ma sono presenti in piccole quantità e si può dire che entrambi gli acciai sono di buona qualità. Successivamente l'attacco chimico non è stato possibile evidenziare la struttura e i grani, in quanto questi durante il processo di trafilatura sono stati deformati. La struttura che ne è risultata è costituita da bande orientate secondo la lunghezza del filo. Nella sezione longitudinale della corda di violino è risultato visibile lo strato di rivestimento.

La trafilatura produce nel materiale un effetto chiamato incrudimento che lo rende più duro e resistente, ma al contempo meno duttile.

Le prove meccaniche sono servite appunto per determinare le caratteristiche meccaniche dei due fili. Per entrambe le corde, attraverso la prova di trazione, si sono determinati i valori della tensione di snervamento e di rottura, del modulo di elasticità e dell'allungamento percentuale alla rottura.

L'acciaio inox è risultato avere dei carichi di snervamento e di rottura più bassi di circa 500 MPa rispetto la corda in commercio. Il modulo di elasticità è risultato anch'esso più basso di 26000 MPa rispetto la corda di violino, ma questo si traduce in un allungamento percentuale alla rottura più alto dello 0,1%.

La corda di violino quindi ha subito una lavorazione più intensa della corda in acciaio inox che ne ha aumentato la resistenza meccanica ma ne ha diminuito la duttilità.

La corda di acciaio inox ha infatti un diametro di 0,30 mm contro lo 0,26 mm dell'altra. Tale differenza nei valori può essere spiegata anche da una diversa percentuale in peso del carbonio presente nei due tipi di acciaio.

Resistenza meccanica e durezza sono collegate, infatti è emerso dalla prova di microdurezza che la corda di violino ha valori più elevati rispetto quella di acciaio inox. Questa differenza nelle caratteristiche meccaniche delle due corde non costringe però a dover scartare la corda di acciaio inox in quanto non c'è il pericolo che si manifesti la rottura durante l'utilizzo nello strumento.

Le tensioni a cui le corde sono sottoposte in un violino, sono inferiori ai 1400 MPa, ben al di sotto del carico di snervamento di entrambi i materiali.

Analisi essenziale per questo lavoro è rappresentata dalla prova di corrosione. I provini delle due corde sono stati sottoposti al contatto con un ambiente aggressivo allo scopo di confrontare il loro comportamento rispetto il deterioramento.

Inizialmente (fino a 3 ore) entrambe le corde non hanno manifestato nessun tipo di corrosione. Dopo 8 ore, sulla corda di violino sono state osservati dei punti di innesco. Dopo 24 ore, infine, la corda di acciaio inox risultava ancora intatta, mentre nella corda di violino l'area corrosa si era estesa a circa l'11 % della superficie osservata.

Dal punto di vista della corrosione, quindi, "vince" la corda di acciaio inox.

A questo punto era necessario stabilire se la resa acustica dell'acciaio inox, quando suonato col violino, fosse paragonabile a quella della corda in commercio.

Per fare ciò è stata eseguita un'analisi delle frequenze per entrambe le corde. Ciò che caratterizza la qualità di un suono è definito timbro. Il timbro dipende principalmente dalle armoniche del suono in questione e tramite un particolare metodo è possibile rappresentarlo graficamente.

La rappresentazione del tritimo relativo ai timbri delle due diverse corde ha evidenziato che i suoni emessi da queste si possono ritenere simili.

La differenza esistente tra le due corde non si manifesta a livello sonoro e costituisce un risultato molto importante.

Tirando le somme, quindi, la corda in acciaio inox risulta essere un valido sostituto alla corda in acciaio armonico rivestita, soprattutto per quanto riguarda la resistenza alla corrosione e quindi la "vita" stessa della corda.

Sicuramente altri tipi di corde, probabilmente più costose, garantiranno rendimenti acustici di gran lunga migliori ma la maggior parte di queste è dotata di un rivestimento, il che ne diminuisce anche la durata, spesso anche in modo significativo.

A livello di produzione della corda, l'utilizzo dell'acciaio inox permetterebbe di saltare il passaggio costituito dal rivestimento della corda e di tutti i trattamenti che precedono e seguono questo step.

Sarebbe interessante valutare, a livello economico, cosa comporta saltare la fase di rivestimento della corda ma esula da questa tesi.

Ringraziamenti

Mi è sembrato doveroso, al termine di questo lavoro durato parecchi mesi, ringraziare le persone che mi hanno seguito e consigliato.

Non posso negare che è stato un lavoro duro, ma che alla fine mi ha dato anche soddisfazione.

Parto quindi ringraziando il mio relatore, il prof. Paolo Ferro che mi ha proposto questo lavoro e che mi ha permesso anche di sfruttare le mie conoscenze riguardanti un bellissimo strumento quale il violino.

Ringrazio poi l'ing. Filippo Busato, che si è reso disponibile per quanto riguarda la parte relativa all'analisi acustica.

Segue poi un ringraziamento al personale tecnico del Laboratorio di Materiali del Dipartimento, in particolar modo a Giacomo Mazzacavallo che mi ha seguito durante tutte le prove effettuate.

Un ringraziamento va al signor Carlo Boik, Responsabile della Tecnologia e della Qualità dell'azienda TFA FILINOX, che mi ha fornito il materiale.

Il ringraziamento finale va a tutte le persone che, pur non essendo coinvolte direttamente in questa tesi, mi hanno supportato.

Grazie a tutti,

Diego

Bibliografia

- Thomas D. Rossing, 1990, "The science of sound" Second Edition, Addison-Wesley Publishing Company
- Andrea Frova, 2003, "Fisica della musica", Zanichelli
- William D. Callister Jr., Scienza e Ingegneria dei materiali, Edises; Edizione italiana a cura di prof. Claudio Caneva
- Pietro Pedferri, "Corrosione e Protezione dei materiali Metallici", Città Studi Edizioni
- Enrico Berto, 2004, "Caratterizzazione Meccanica e Microstrutturale di Corde per Strumenti Musicali", tesi
- Siti consultati:
www.nonsolocittanova.it

Appendice A

Composizione chimica della colata fornita dal produttore relativa all'acciaio inox della qualità AISI 302 utilizzato in questa tesi:

Simbolo	Elemento	Quantità
Al	Alluminio	0,004 %
C	Carbonio	0,066 %
Co	Cobalto	0,133 %
Cr	Cromo	18,44 %
Cu	Rame	0,43 %
Mn	Manganese	1,27 %
Mo	Molibdeno	0,33 %
N	Azoto	0,044 %
Ni	Nichel	8,06 %
P	Fosforo	0,032 %
S	Zolfo	0,001 %
Si	Silicio	0,39 %
Ti	Titanio	0,003 %

Appendice B

Curve utilizzate per la procedura di Stevens per ottenere la sonorità inserendo in ordinate il livello sonoro (dB) e in ascissa la frequenza (Hz):

