



*Sergio Canazza*  
*[www.dei.unipd.it/english/csc/people/all/Canazza.html](http://www.dei.unipd.it/english/csc/people/all/Canazza.html)*  
*e-mail: [canazza@csc.unipd.it](mailto:canazza@csc.unipd.it)*

# **Restauro Materiale Audio**

## Capitolo 1

# Il Restauro Audio

### 1.1 A contrastare l'eclisse della memoria: il processo di restauro

Nonostante le inefficienze e i ritardi, l'Italia è un paese sensibile alle problematiche della conservazione e del restauro del patrimonio culturale e artistico. Questo, nella grandissima maggioranza, è formato da reperti e siti archeologici, opere architettoniche, dipinti, sculture, materiali scritti, oggetti d'uso, ecc., che risalgono a molti secoli fa e sono realizzati con materiali durevoli nel tempo. Per quanto concerne la musica, che ha ricevuto finora un'attenzione assai inferiore rispetto alle altre arti, la tutela riguarda gli strumenti musicali e i supporti di registrazione in cui vengono memorizzate le opere musicali, raramente concerne la riduzione dei disturbi nel segnale audio.

Le grandi dimensioni del patrimonio artistico del passato assorbono, come è giusto, molte energie per la tutela di quest'ultimo, ma purtroppo inducono a considerare il moderno un bene che non necessita di altrettante attenzioni. Invece, limitandoci allo specifico della musica, sono molte le opere musicali memorizzate su supporti di registrazione relativamente recenti che, se non vengono salvate, rischiano la totale cancellazione con una conseguente grave perdita sul piano culturale.

#### *1.1.1 Le caratteristiche del patrimonio musicale: le opere*

La tutela dei beni musicali è finalizzata a mantenere in vita il pensiero musicale dell'uomo attraverso la conservazione delle opere e degli strumenti, garantendone rispettivamente l'eseguitività e la funzionalità sia per la ricerca musicologica che per l'interpretazione filologica. Anche se in molti casi le opere sono legate in maniera indissolubile al mezzo di produzione, per semplicità espositiva è preferibile separare, per quanto possibile, il problema della conservazione delle opere da quello degli strumenti. Nella maggior parte dei casi l'opera, come viene consegnata dall'autore, è composta di vari elementi fra cui una partitura o un progetto, musica registrata, note per l'esecuzione, e materiali vari che risultano spesso indispensabili per conoscere il percorso ideativo e il processo di realizzazione.

Ciò comporta l'esigenza di conservare sia materiali di natura grafica o di testo (partitura, schemi, note per l'esecuzione), sia materiali audio (parti musicali e/o l'intero brano), sia programmi (per la sintesi dei suoni, per il *live electronics*, etc.). I primi sono generalmente su carta e rientrano nella problematica più generale e diffusa della conservazione dei materiali cartacei. Gli altri si trovano memorizzati su supporti di registrazione di vario tipo e sono purtroppo soggetti a un rapido degrado dell'informazione in essi contenuta.

Le opere musicali possono essere divise in diverse categorie rispetto alla loro conservazione. Obiettivo di questi appunti è focalizzare l'attenzione sulla categoria delle *musiche registrate*, dove con questo termine si intendono le opere musicali

complete o le parti musicali eseguite dall'autore (o da altri sotto la direzione dell'autore) e memorizzate come prodotto definitivo. Si tratta delle composizioni in cui i materiali musicali memorizzati, indipendentemente dalla loro natura, sono già pronti per l'esecuzione in quanto non esiste una partitura e nemmeno un'indicazione esplicita da parte dell'autore per poterli rieseguire.

### ***1.1.2 La babele degli standard***

La conservazione delle opere musicali memorizzate su supporti di registrazione pone problemi nuovi e diversi rispetto a quelli tradizionali della musica scritta o stampata su carta. Bisogna innanzitutto distinguere i supporti incisi che diventano copie multiple di un originale (caso tipico è il disco), da quelli registrabili e riproducibili singolarmente come il nastro magnetico. Per quanto riguarda il primo caso, nell'arco di un secolo si è passati dalla registrazione sui cilindri di cera di Edison (1877) alle incisioni su disco a 78 giri, al *long playing* in vinile a 33 giri, al 45 giri, all'introduzione verso la fine degli anni '50 della codifica stereo e successivamente anche di quella quadrifonica, sebbene quest'ultima non abbia avuto la diffusione sperata. Questi processi di registrazione sono chiamati analogici in quanto memorizzano un segnale continuo analogo all'onda di pressione sonora che raggiunge l'orecchio umano.

È possibile tracciare un percorso analogo, anche se molto più confuso, nella registrazione audio su supporto magnetico, di particolare interesse in quanto attraverso la sua evoluzione si possono capire alcuni dei problemi che caratterizzano la conservazione dei beni musicali. La storia della registrazione su nastro magnetico inizia con il registratore a filo di acciaio di Paulsen (1889), che resterà il più usato fino alla fine della seconda guerra mondiale sebbene già nel 1935 l'industria tedesca AEG avesse presentato il primo magnetofono, un registratore a nastro con velocità di scorrimento di 100 centimetri al secondo (cm/s). Questo tipo di memoria magnetica diventa uno standard a partire dagli anni '50, e si avvale di un nastro, normalmente di materiale plastico, ricoperto e impregnato di una sostanza magnetizzabile quale l'ossido di ferro. Inizialmente la registrazione è monofonica con velocità di scorrimento del nastro di 76 cm/s, che successivamente viene ridotta ai vari sottomultipli: 38 cm/s, 19 cm/s e ancora meno. Il nastro, generalmente alto un quarto di pollice (6.3 mm), è stato suddiviso in due tracce per la stereofonia ed è poi cresciuto con l'avvento dei registratori multitracce fino ad una altezza massima di due pollici (50.4 mm) per sedici tracce. La registrazione, inoltre, può seguire diversi tipi di equalizzazione o può essere codificata (ad esempio con la tecnica Dolby o dBx) per ridurre il rumore di fondo.

Nella registrazione digitale esistono diversi *standard*, ma il settore è in tale evoluzione che un quadro completo della situazione non è possibile. A grandi linee è possibile tracciare alcune tendenze: i supporti utilizzati restano ancora il nastro magnetico tradizionale a bobine per i sistemi multitraccia, con le varianti della cassetta video, dei DAT per la stereofonia o del DCC della Philips per l'ascolto domestico; i dischi magnetici (Hard Disk Drive, HDD); i dischi magneto-ottici, i dischi *worm* (*write once, read many*), quali il CD Audio, il Digital Versatile Disc Audio (DVD-A) e il Super Audio Compact Disc (SA-CD).

Il problema principale della registrazione digitale, oltre alla diversità del supporto che impone spesso diversi sistemi di lettura/scrittura, è il formato di codifica dei dati, il quale è spesso differente in base alle diversità delle esigenze. Alcuni *standard*

privilegiano la qualità della musica memorizzando anche informazioni ridondanti, altri puntano invece sulla compressione dei dati, cercando di mantenere *percettivamente* inalterato il suono ed eliminando tutte quelle informazioni che si presume siano irrilevanti (v. la codifica MP3, divenuto in breve tempo lo standard per la trasmissione della musica in rete).

Questo continuo mutare dei supporti e dei codici di memorizzazione impone, insieme alla conservazione dell'opera, anche quella dello strumento per "leggerla", o, in alternativa, un periodico riversamento dei dati. Il riversamento, in ogni caso, si rende necessario per tutte le opere memorizzate su supporti soggetti a deterioramento, con l'obbligo di eseguire tale operazione prima che il loro contenuto vada perso per sempre.

### ***1.1.3 La conservazione delle musiche registrate***

È già stato sottolineato che le musiche registrate sui vecchi supporti di registrazione sono soggette a un degrado che in tempi brevi, se riferiti al metro della storia dell'arte, provoca danni irreparabili. E quindi innanzitutto necessario riversare tali musiche su un supporto che dia maggiori garanzie di tenuta nel tempo: allo stato attuale il più sicuro sembrerebbe essere il supporto ottico. L'uso del condizionale è quanto mai di rigore in quanto tale tecnologia è così giovane che non ha nessuna verifica sul piano sperimentale se non il tempo trascorso dalla sua nascita: il Compact Disc Audio esiste da meno di venti anni. Prove di invecchiamento artificiale danno buone garanzie, anche se è già sorta una polemica sugli effetti negativi provocati dagli inchiostri di copertina, ed in quella occasione le case discografiche non si sono dimostrate concordi sulla durata di vita futura del supporto.

Il CD-A, comunque, è nato come sistema di riproduzione per la stampa di un elevato numero di copie, ma attualmente la sua enorme diffusione ed il conseguente abbattimento dei prezzi di questo supporto e dei sistemi di stampaggio lo ha reso conveniente anche come sistema di archiviazione audio, nonostante l'esiguo numero di esemplari richiesto in questo caso.

Quando non si può produrre un CD-A ed è necessaria una sola copia dell'originale si può ricorrere al CD-R, un CD registrabile una sola volta e leggibile con i normali lettori (anche se di durata minore rispetto al CD-A), oppure al CD-MO (Magneto-Ottico) che combina i vantaggi della registrazione magnetica (l'audio può essere registrato più volte, in toto o in parte) alla garanzia di durata dei sistemi di memorizzazione ottica; purtroppo il CD-MO non può essere ascoltato con un normale lettore di CD-A. Lo stesso vale per i CD di vetro; questi ultimi, sulla cui superficie ricoperta da una resina fotosensibile i dati vengono memorizzati mediante un raggio laser, vengono utilizzati come "master", da cui le ditte produttrici di CD ricavano le matrici che utilizzano per la stampa dei dischi che poi immettono nel mercato. I CD di vetro impiegati in questo tipo di processi, per le ottime doti di stabilità del materiale con cui sono realizzati, possono essere utilizzati, oltre che per ricavare le matrici sopra citate, anche come supporto per l'archiviazione passiva di dati a lungo termine; una casa produttrice di questo tipo di CD garantisce una durata di secoli delle informazioni in essi memorizzate.

### ***1.1.4 Il processo di restauro***

Negli ultimi anni si è potuto osservare, nel mercato delle registrazioni sonore, un rapido aumento del numero di ripubblicazioni di registrazioni storiche, la maggior parte

delle quali viene riproposta in CD-A. Inoltre, è sempre maggiore il numero di riversamenti effettuati per non perdere il contenuto dei vecchi supporti di registrazione, quali i cilindri, i dischi analogici in acetato e i più recenti nastri magnetici, che risultano soggetti a deterioramento fisico e chimico. Un altro motivo per cui molte registrazioni storiche vengono copiate su più moderni supporti audio, anche quando i supporti originali (come i dischi in vinile) non sono soggetti ad alcuna forma di deterioramento fisico nell'immediato futuro, sta nel fatto che in questo modo si può contare su una maggiore facilità di manipolazione del supporto e su un più agevole e rapido accesso al suo contenuto.

La qualità delle registrazioni storiche si discosta da quella delle registrazioni attuali ed è ovvio che in fase di riversamento dal vecchio al nuovo supporto si cerchi di migliorare il segnale sonoro copiato. I moderni processi di gestione dei segnali audio, operanti sia nell'analogico che nel digitale, consentono di fare ciò mediante una vasta gamma di strumenti tra i quali vanno ricordati i filtri passabanda analogici, i filtri contro il rumore dinamico e quello transitorio, nonché i vari metodi digitali che consentono di elaborare il segnale in modo flessibile e pervasivo. Argomento di questo paragrafo non sono comunque le sopra citate possibilità tecniche, le quali saranno oggetto di attenta analisi in seguito, bensì l'aspetto etico della preservazione, del restauro, e del riversamento dei segnali audio su nuovi supporti di registrazione. Si cerca di trovare una risposta a domande del tipo: quante e quali delle registrazioni originali devono essere preservate? Quali devono essere copiate su nuovi supporti? Quali possono essere scartate? E ancora, su quali registrazioni è giusto, in fase di riversamento, intervenire per migliorarne la qualità del segnale, e di quali invece è preferibile eseguire una copia senza alcuna alterazione?

Per poter provare a dare delle risposte a tali domande, è indispensabile innanzitutto analizzare, dal punto di vista tecnico e artistico, i diversi tipi di supporti di registrazione e i vari processi di memorizzazione e di riproduzione del segnale audio, che nel corso degli anni sono stati adottati. Per fare ciò si utilizzerà lo schema di figura 1.1 riportato al termine del paragrafo [Schuller 1991], il quale schematizza il processo di registrazione, deducendo le possibilità di intervento del restauro.

Il primo livello è quello *dell'esecuzione*. Esso contiene il vero segnale sonoro prodotto dall'artista, assieme a tutti i parametri dell'interpretazione. Tra questi vi è anche l'*impronta* dell'acustica del locale in cui è avvenuta la registrazione, fattore questo che ha una grande influenza sul risultato complessivo dell'interpretazione.

Il livello successivo è quello della *registrazione*. La *registrazione* aggiunge un secondo livello di interpretazione al suono originale, introducendo su quest'ultimo, intenzionalmente o meno, numerose alterazioni. Oltre alla possibilità di unire assieme in un'unica esecuzione più segnali audio registrati separatamente e in diversi momenti, questa fase consente di creare, impiegando diverse soluzioni tecnologiche (scelta e posizionamento dei microfoni, equalizzazione, riverbero e "mixaggio" dei segnali audio), un'opera corrispondente al gusto estetico dell'operatore (che non sempre si identifica col musicista). Questo secondo livello di interpretazione non influenza in modo pervasivo le registrazioni storiche, sebbene dislocare un gruppo di artisti attorno ad un corno di registrazione o ad un unico microfono rappresenti un aspetto non trascurabile della registrazione audio.

Il segnale, così come si presenta nel supporto in cui è stato originariamente

registrato, risulta soggetto a due tipologie di alterazioni: *involontarie* e *intenzionali*. La prima può a sua volta essere suddivisa in due categorie. Una rappresenta le alterazioni del segnale dovute alle imperfezioni della tecnica di registrazione adottata; tali imperfezioni provocano diversi tipi di distorsioni: lineare, non lineare e di modulazione, causata dai movimenti irregolari del supporto durante la registrazione. Nel secondo insieme si trovano invece le alterazioni involontarie del segnale dovute alla non corretta taratura dei dispositivi di registrazione. Rientrano in questa categoria le conseguenze di una scorretta velocità del supporto, della deviazione dall'angolo verticale e della mancanza di allineamento della testina di registrazione.

Appartengono invece al gruppo delle alterazioni tecniche *intenzionali*, quelle dovute all'equalizzazione e ai sistemi di riduzione del rumore impiegati in fase di registrazione (dbx, Dolby, etc.).

Nel processo di *riversamento* di un segnale sonoro su di un nuovo supporto di registrazione, si deve assolutamente procedere alla compensazione delle alterazioni che *intenzionalmente* sono state introdotte sul segnale originale (decodifica del segnale tramite circuiti Dolby o dbx, ad esempio). Per quanto riguarda invece la correzione delle alterazioni involontarie, non è altrettanto certo che questa debba avvenire.

Per quanto riguarda il *supporto* di registrazione invece, anche se questo si presenta in ottime condizioni, è necessario tenere conto che il passare del tempo e la frequenza con cui viene utilizzato, ne comporteranno sicuramente un deterioramento. Il deposito di sostanze esterne, come ad esempio la polvere, nonché il degrado fisico e chimico del supporto, influiscono in diversi modi sulla riproduzione del suo contenuto: perdite di segnale e distorsioni lineari e non lineari, ne sono solo alcuni esempi.

Si cercherà a questo punto di mettere in giusta sequenza i diversi passaggi che caratterizzano un processo di riversamento di un segnale sonoro su di un nuovo supporto di registrazione.

**a) Scelta del campione da riversare.** Oggetto del riversamento deve essere esclusivamente il contenuto del supporto originale e non una sua copia, in quanto quest'ultima può essere stata oggetto di manipolazioni a noi sconosciute. Nel caso in cui non si disponga dell'originale, ma solo di più copie, apparentemente identiche, di quest'ultimo, allora oggetto del riversamento dovrà essere il contenuto di quella che presenta il migliore stato di conservazione.

**b) Restauro del supporto di registrazione.** Si è già accennato al fatto che il deposito di sostanze esterne, nonché la deformazione fisica e chimica del supporto, influenzano la qualità del segnale in esso contenuto, ed è per questo motivo che è di fondamentale importanza riuscire a mantenere il supporto nel migliore stato di conservazione possibile. La massima cura deve essere prestata nel tentativo di impedire non solo l'alterazione del segnale, ma anche il deterioramento del supporto che lo contiene, in quanto in futuro può nuovamente essere indispensabile il suo utilizzo. Quest'ultimo concetto è molto importante, e trae spunto dal fatto che il continuo progresso tecnologico nel campo delle registrazioni sonore autorizza a credere che in futuro saranno disponibili metodi di riversamento capaci di prestazioni e risultati sicuramente migliori di quelli disponibili attualmente. Per tale ragione nei successivi paragrafi saranno descritte le caratteristiche chimico-fisiche dei supporti più utilizzati.

**c) Scelta dell'apparecchiatura.** L'apparecchiatura usata per riversare il segnale dal vecchio al nuovo supporto di registrazione, deve poter controllare tutti i parametri specifici del formato adottato che comparivano nell'attrezzatura originale con cui si era registrato il supporto che ora si vuole copiare. Poiché, qualunque sia l'apparecchiatura utilizzata per realizzarne la copia, vi sarà comunque l'introduzione di un certo livello di distorsione, è anche importante scegliere l'attrezzatura audio in modo da riuscire a mantenere tale livello il più basso possibile. Questo è uno dei motivi per cui è assolutamente preferibile adottare l'apparecchiatura più moderna offerta dal mercato. È sbagliato, infatti, credere che l'attrezzatura usata al momento della registrazione del supporto originale sia la più adatta per effettuare il successivo riversamento di quest'ultimo. Nella maggior parte dei casi è vero il contrario: i parametri meccanici ed elettronici delle moderne apparecchiature superano la qualità di quelli delle attrezzature originali di diversi ordini di grandezza. Nonostante le prime non sempre presentino tutti i parametri specifici del formato originariamente adottato, è sicuramente più vantaggioso adattare le caratteristiche di tale formato all'attrezzatura moderna, piuttosto che utilizzare quella originale, rinunciando così ai numerosi vantaggi offerti dal continuo progresso tecnologico. A tale proposito basti pensare alla notevole riduzione di distorsione che sono in grado di assicurare le moderne attrezzature audio rispetto ai grammofoni acustici ed ai fonografi, i quali non sono assolutamente in grado di compensare, in fase di riproduzione, le distorsioni non lineari contenute nella registrazione. L'utilizzo dell'attrezzatura, in fase di riversamento, a suo tempo impiegata per la registrazione del supporto originale, è giustificabile solo qualora si desideri che il segnale copiato coincida esattamente con quello originariamente sentito al momento della riproduzione del supporto originale.

**d) Compensazione delle alterazioni intenzionali del segnale registrato.** Il passo successivo consiste nella scelta del tipo di equalizzazione (e del circuito di decodifica, nel caso sia stato utilizzato un sistema di riduzione del rumore) da adottare in fase di riproduzione. In pratica, questo passo comporta notevoli difficoltà, in quanto nelle registrazioni effettuate in passato, in particolare quelle sugli LP, si sono utilizzati diversi tipi di equalizzazione, la maggior parte dei quali non sono stati documentati, rendendo così difficile, se non addirittura impossibile, l'individuazione del tipo di equalizzazione usata nella registrazione del supporto originale. Solo recentemente le conoscenze disponibili su questo argomento, e con esse le descrizioni di molte delle equalizzazioni normalmente usate in fase di registrazione, sono state raccolte e successivamente pubblicate.

**e) Compensazione della non corretta taratura dei dispositivi di registrazione.** Le alterazioni del segnale che si vuole riversare, dovute alla non corretta taratura dei dispositivi usati al momento della sua registrazione, interessano soprattutto le registrazioni effettuate in modo amatoriale. È preferibile, quindi, controllare se vi siano, nel segnale contenuto nel supporto originale, degli errori causati da un non corretto angolo verticale di incisione della puntina, ovvero dall'inesatto allineamento della testina di registrazione. Nel caso in cui delle alterazioni di questo tipo vengano effettivamente rilevate nel segnale originale, si dovrà senz'altro intervenire per cercare

di compensarle, evitando così che compaiano anche nel nuovo supporto. Risulta di fondamentale importanza anche la scelta di una corretta velocità del supporto originale da adottare al momento del suo riversamento. Tale velocità dovrà ovviamente coincidere con quella impostata al momento della sua registrazione.

**f) Compensazione delle alterazioni involontarie del segnale registrato.** In questa fase si utilizzano gli strumenti di elaborazione del segnale per compensare, nella copia, le distorsioni non lineari causate dalle imperfezioni della tecnica e dell'attrezzatura di registrazione a suo tempo adottate. Mediante un'opportuna elaborazione, si dovranno cercare di eliminare i rumori di fondo e quelli transitori che compaiono sovrapposti al segnale utile. In una situazione ideale, tutte queste compensazioni, per poter essere applicate, devono basarsi su una conoscenza scientifica e filologica dell'imperfezione che si cerca di eliminare, nonché sulla consapevolezza della propria capacità di contrapporsi alla stessa. Così, se la determinazione e la successiva eliminazione della distorsione del segnale dovuta al non corretto allineamento di un dispositivo di registrazione moderno risulta relativamente facile, altrettanto non accade, per esempio, per le non linearità che caratterizzano un segnale registrato con un'apparecchiatura acustica non documentata. Si può far rientrare in questa fase anche la compensazione dei disturbi provocati al segnale dal deterioramento del supporto, dovuto al suo invecchiamento, alla frequenza di utilizzo e all'attacco di agenti esterni (umidità, temperatura, polvere, etc).

**g) Reinterpretazione.** L'ultimo passo della procedura di riversamento comprende quelle manipolazioni realizzate in fase di *editing*, che comportano l'alterazione del segnale originale che dovrà poi essere copiato. Rientrano in questo campo l'aggiunta di riverbero, l'equalizzazione soggettiva, e, più recentemente, la completa rielaborazione dei segnali originariamente registrati su nastri a più tracce. Appare chiaro d'altronde che manipolazioni di questo tipo esulano completamente dagli scopi che si pone la procedura di riversamento fino a qui descritta: con essi infatti si cerca intenzionalmente di reinterpretare l'esecuzione originale in modo artistico e creativo.

Si possono quindi individuare due obiettivi completamente diversi tramite i quali si può giustificare il riversamento di un segnale audio da un supporto ad un altro.

- 1) In un primo caso ci si può porre l'obiettivo di realizzare una riproduzione storicamente fedele del contenuto del supporto originale. In questo caso è importante accettare il fatto che la "fedeltà storica" può essere soddisfatta a diversi livelli:
  - a) registrare il suono esattamente come era stato sentito a suo tempo da chi aveva assistito all'esecuzione originale.
  - b) registrare il suono esattamente come era stato originariamente prodotto. Ciò implica compensare le alterazioni intenzionali del segnale (passo **d**), eliminare eventuali errori causati dalla non corretta taratura dei dispositivi di registrazione a suo tempo utilizzati (passo **e**) e riprodurre il segnale originale con un'attrezzatura moderna in grado di minimizzare le distorsioni legate alla lettura del contenuto del supporto.



- c) registrare il suono esattamente come era stato originariamente prodotto, ma con l'ulteriore compensazione delle distorsioni non lineari causate dalle imperfezioni della tecnica e dell'attrezzatura di registrazione a suo tempo adottate (passo f).

Se lo stato di conservazione del supporto originale lo permette, nulla vieta di utilizzare quest'ultimo per realizzare diversi tipi di copie del suo contenuto. Nel caso in cui invece l'utilizzo dell'originale può portare alla sua distruzione, e con essa all'irrimediabile perdita del suo contenuto, diventa di primaria importanza evitare tutti quei passaggi le cui conseguenze sullo stato fisico del supporto possono essere irreversibili.

Per ciascuna delle operazioni eseguite nel corso della realizzazione della copia, è sempre estremamente importante redigere una completa ed esauriente documentazione.

- 2) Il secondo tipo di obiettivo che ci si può porre nel riversare un segnale audio da un supporto ad un altro, consiste nella reinterpretazione dell'esecuzione originale in modo creativo, sfruttando a questo scopo le capacità messe a disposizione dalla moderna tecnologia digitale. Questa seconda alternativa si basa sul fatto che le nuove tecnologie e i nuovi comportamenti di ascolto stimolano sempre nuovi tentativi di reinterpretare in chiave artistica vecchie registrazioni, sfruttando le potenzialità dei moderni mezzi tecnologici. Essendo di natura puramente artistica, questi tentativi non possono essere oggetto di critiche, se non sulla base di argomenti esclusivamente estetici.

Per concludere possiamo soffermarci sulle seguenti considerazioni. Gli archivi sonori sono dedicati alla preservazione dei documenti audio. Ogni qualvolta si renda necessario il riversamento del contenuto di un supporto, l'operazione deve essere *fatta* tenendo ben presente la "fedeltà storica". In ogni caso tutti i passaggi che si deciderà di eseguire dovranno essere ampiamente documentati. La reinterpretazione di un'esecuzione originale sfruttando gli strumenti messi a disposizione dalle moderne tecnologie audio, rappresenta un capitolo a parte nel campo delle registrazioni sonore. Se di reinterpretazione creativa si tratta, questa deve confrontarsi esclusivamente con eventuali critiche a carattere artistico ed estetico. Tali manipolazioni devono comunque essere dichiarate, per evitare il rischio che possano essere interpretate come falsificazioni della storia.

Scopo di questi appunti è analizzare le metodologie di intervento da utilizzare nella fase **f**) di cui sopra. È comunque il caso di sottolineare come l'utilizzo di tali tecniche non possa prescindere da una conoscenza filologica dell'opera musicale in questione, al fine di non stravolgere un risultato artistico che è comunque stato approvato dall'autore, anche se dovesse risultare affetto da difetti *tecnici*.

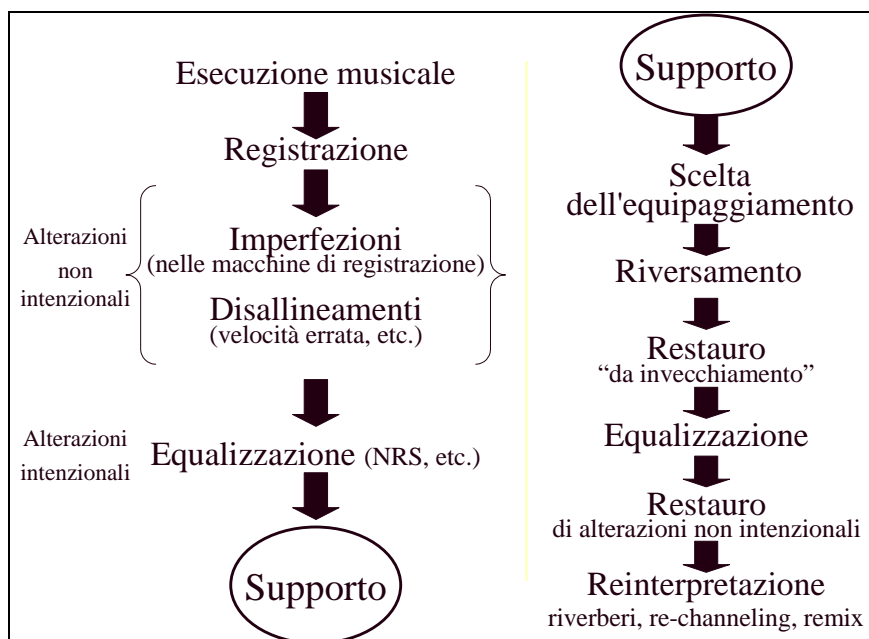


Fig. 1.1: Processo di registrazione e opzioni di restauro.

## 1.2 Il nastro magnetico

### 1.2.1 Cenni storici

La storia della registrazione su nastro magnetico inizia con il registratore a filo di acciaio di Paulsen (1889), che resterà il più usato fino alla fine della seconda guerra mondiale, sebbene già nel 1935 l'industria tedesca AEG avesse presentato il primo magnetofono, un registratore a nastro con velocità di scorrimento di 100 centimetri al secondo (cm/s). Questo tipo di memoria magnetica diventa uno standard a partire dagli anni '50 e si avvale di un nastro, normalmente di materiale plastico, ricoperto e impregnato di una sostanza magnetizzabile quale l'ossido di ferro.

Inizialmente la registrazione è monofonica con velocità di scorrimento del nastro di 76 cm/s, che successivamente viene ridotta ai vari sottomultipli: 38 cm/s, 19 cm/s e ancora meno. Il nastro, generalmente alto un quarto di pollice (6.3 mm), è stato prima suddiviso in due tracce per la stereofonia ed è poi cresciuto con l'avvento dei registratori multitracce fino ad una altezza massima di due pollici (50.4mm) per sedici tracce. Ma il numero di tracce non è sempre stato proporzionale all'altezza del nastro. Ci sono infatti registratori a quattro tracce su nastri da un quarto di pollice, da mezzo pollice e da un pollice.

La registrazione, inoltre, può seguire diversi tipi di equalizzazione (CCIR europea o NAB americana) o può essere codificata (ad esempio con la tecnica Dolby o dBx) per ridurre il rumore di fondo, in particolare quando si diminuisce l'altezza di nastro assegnata a ciascuna traccia.

### 1.2.2 Il processo di registrazione

I nastri magnetici sono prodotti a partire da un supporto in poliestere chiamato Mylar; su di esso viene deposta (in atmosfera priva di polveri ed elettrostaticamente neutra) una sostanza ottenuta dalla macinazione di una miscela di ossido magnetico e di un solvente che ha la funzione di legante. Segue una fase di essiccazione e di calandratura al fine di ridurre al minimo l'abrasività del nastro. Infine si taglia il nastro secondo misure (più o meno) standardizzate e lo si confeziona come bobina aperta (open reel) o come cassetta.

I formati più utilizzati sono riportati in tabella 1.1:

POLLICI	SUPPORTO	UTILIZZO
2	Open reel	Professionale
1	Open reel	Professionale
1/2	Cassetta	Professionale
1/4	Open reel	Professionale
1/4	Open reel	Semi-professionale
1/4	Cassetta	Cartucce stereo 8
1/4	Cassetta	Elcaset
1/4	Cassetta	Compact cassette

Tab. 1.1: Altezze dei nastri usualmente prodotti.

In particolare la qualità delle cassette è stabilita dalle norme IEC in funzione del tipo di ossido magnetico utilizzato. Per quanto riguarda le compact cassette esistono 4 tipi principali di nastro (v. tab. 1.2).

CATEGORIA	TIPO DI NASTRO	LICENZIATARIO
IEC1	Ossido di ferro (Normal)	BASF
IEC2	Biossido di Cromo Cromo equivalenti (High)	BASF
IEC3	Doppio strato ferro cromo	SONY
IEC4	Metal	TDK

Tab. 1.2: Tipologie di cassette.

Solo i produttori indicati forniscono il nastro campione sia ai costruttori di registratori che agli altri produttori di nastri magnetici.

**Registrazione.** E' noto che, sottoponendo un materiale magnetico ad un campo magnetico  $H$  crescente, la *magnetizzazione residua*  $B_r$  (ovvero quella che permane sul materiale dopo la cessazione dell'applicazione del campo magnetico) varia secondo una curva analoga a quella mostrata in figura 1.2.

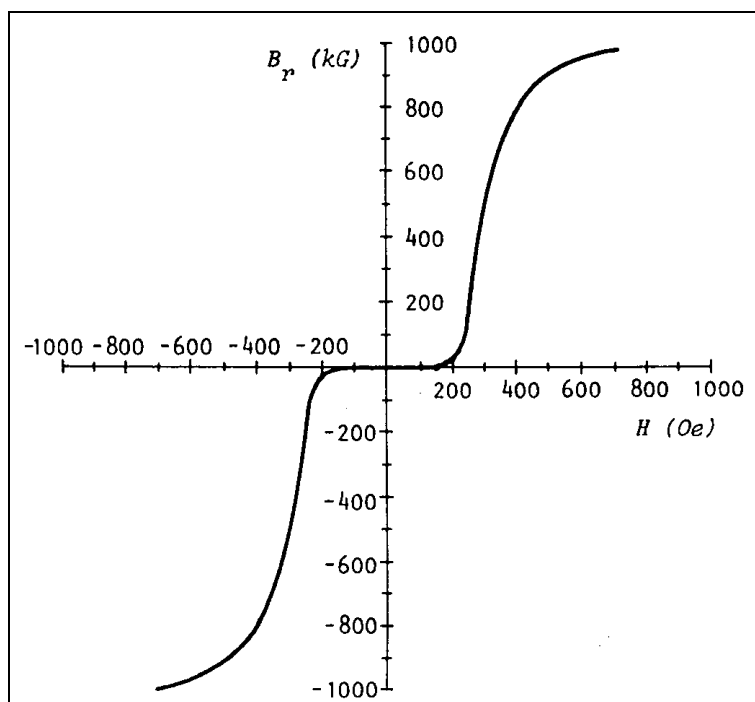


Fig. 1.2: Caratteristica *output/input* dell'ossido magnetico. In ascissa è riportato il campo magnetico applicato sul nastro, in ordinata la magnetizzazione residua memorizzata nel nastro.

Comandando l'intensità del campo magnetico con il segnale audio, è quindi possibile fissare l'informazione audio sul nastro, sotto forma di magnetizzazione residua. Il livello massimo di magnetizzazione dipende dalle caratteristiche magnetiche dell'ossido utilizzato. Il livello minimo è invece in relazione alle dimensioni dei granuli di ossido: più grandi saranno, maggiore sarà l'entità della magnetizzazione minima.

Se poi la concentrazione del pigmento sul nastro è bassa, si introdurrà un "rumore di modulazione" in ampiezza. Un effetto simile al rumore di modulazione è provocato anche da eventuali difetti di calandratura (*drop out*).

In fase di registrazione (v. fig. 1.3), il nastro viene fatto scorrere davanti ad una fessura (traferro) che interrompe un circuito magnetico (testina di registrazione) circondato da spire percorse da una corrente proporzionale al segnale audio che si desidera registrare; questa genera un campo che magnetizza il segmento di nastro che si trova in quell'istante di fronte al traferro (figura 1.3). Poiché il segnale varia col tempo, ogni elemento del nastro così magnetizzato possiede una diversa ampiezza e polarità di magnetizzazione: il nastro può quindi essere considerato come una successione di magneti, ciascuno lungo metà della lunghezza d'onda registrata (nell'ipotesi di segnale sinusoidale), pari allo spostamento del nastro in un semiperiodo (figura 1.4).

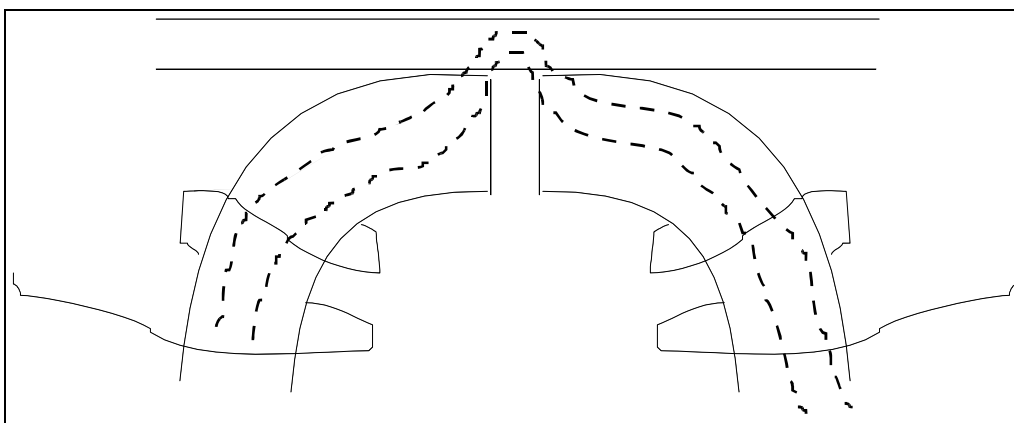


Fig. 1.3: Registrazione del nastro magnetico: sistema traferro-nastro. La bobina percorsa da corrente genera un flusso magnetico (linea tratteggiata) nella testina di registrazione, al fine di magnetizzare il nastro.

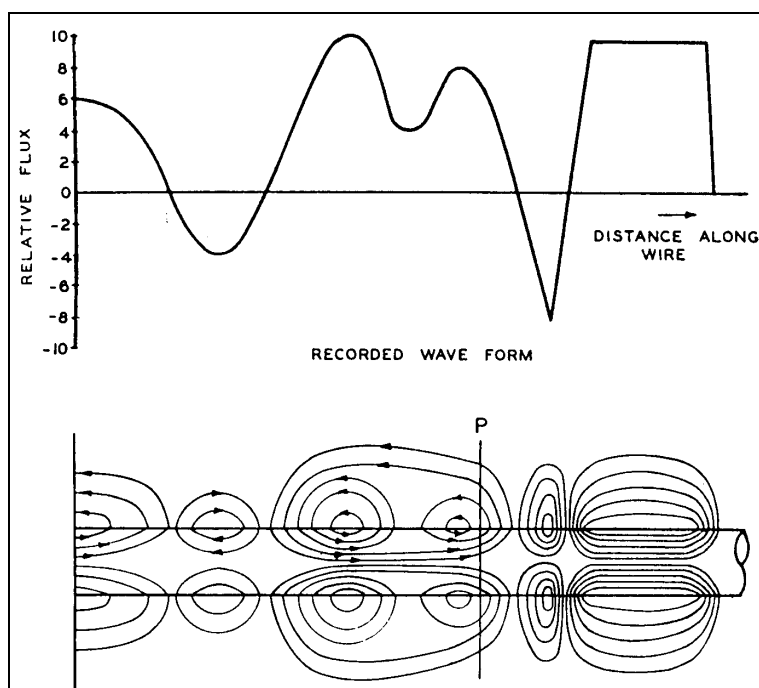


Fig. 1.4: Struttura del nastro magnetico registrato. Forma d'onda registrata (in alto) e corrispondente distribuzione di flusso magnetico sul nastro (in basso).

**Distorsione.** Ciò che interessa la registrazione è l'andamento dell'induzione residua dovuta al campo magnetico all'istante in cui sono affacciati traferro e segmento di nastro; la curva è mostrata in figura 1.5, dove si nota che la mancanza di linearità della curva di magnetizzazione dà luogo a forti distorsioni. Per superare questo problema, si ricorre perciò ad un segnale di premagnetizzazione (bias), avente una frequenza ultrasonica compresa tra 50 e 400 kHz (a seconda del tipo di ossido). Dalla figura 1.6a si evince che, sommando i segnali audio e di bias, il segnale registrato non contiene distorsioni. Si può quindi considerare lineare la curva *output/input*: un esempio è riprodotto in figura 1.6b.

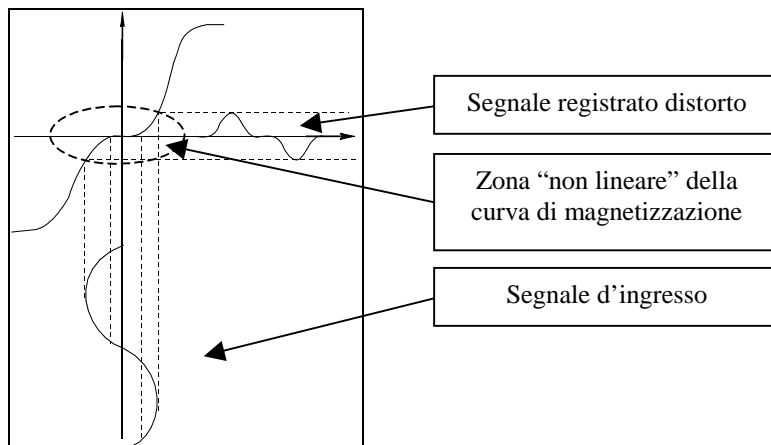


Fig. 1.5: Distorsione dovuta alla non-linearità della caratteristica di *output/input* (magnetizzazione residua vs. campo magnetico applicato). Il segnale registrato risulta fortemente distorto.

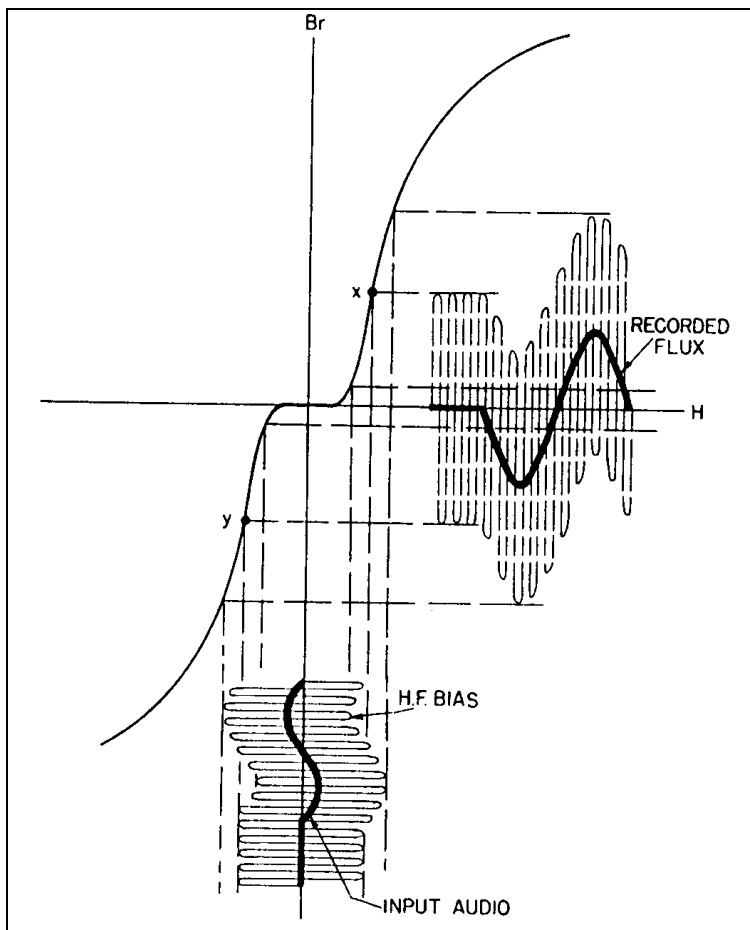


Fig. 1.6a: Funzione del segnale di bias ad alta frequenza (H.F. BIAS): il segnale registrato non contiene distorsioni.

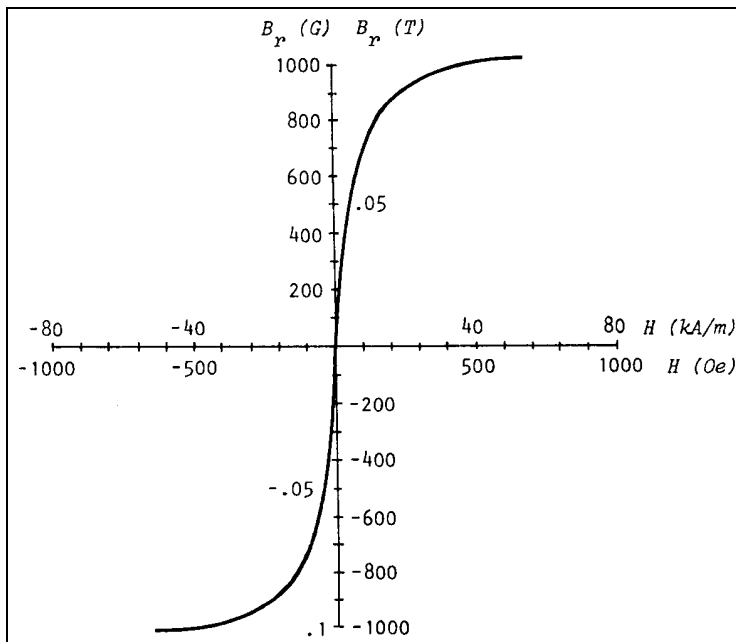


Fig. 1.6b: Caratteristica *output/input* (magnetizzazione residua vs. campo applicato) in presenza del segnale di bias

In lettura, il segnale magnetico del nastro in movimento genera un flusso magnetico nella testina di riproduzione, il quale induce una tensione ai capi della spira proporzionale al segnale registrato. È quindi sufficiente amplificare questa tensione (che è di pochi millivolt) per poter riprodurre il segnale audio.

La struttura dell'informazione sul nastro è anche la causa principale di degrado dello stesso: ogni magnete di cui si può pensare essere costituito il nastro è contiguo a magneti con polarità opposte, i quali creano un campo che provoca un effetto smagnetizzante sul magnete considerato. Questo si manifesta in misura più notevole alle alte frequenze, in quanto i magneti sono di dimensioni inferiori e perciò più facilmente soggetti a reciproche influenze.

Un'altra causa di rumore è l'effetto copia dovuto al fatto che i nastri vengono avvolti a spirale portando a contatto tra loro i domini magnetizzati che inducono così nelle spire adiacenti un campo tanto più forte quanto più è sottile il supporto del nastro.

Ulteriori limiti meccanici al buon funzionamento del nastro sono legati alla velocità di trascinamento e alle dimensioni del traferro. Vale la relazione:

$$F = \frac{v}{L}$$

Essendo  $v$  = velocità trascinamento  
 $L$  = larghezza traferro  
 $F$  = massima frequenza registrabile

Velocità tipiche, nei registratori professionali, sono di 19 cm/s con un traferro di 9,5  $\mu\text{m}$ , da cui si ottiene una banda estesa fino ai 18 kHz, per le compact cassette di 4,75 cm/s con traferro di 2  $\mu\text{m}$ : se si desidera garantire una risposta che non vari più di  $\pm 2$  dB

tra i 40 Hz ed i 15 kHz è necessario raddoppiare la velocità. Nella tabella 1.3 sono riportate le gamme dinamiche per diversi tipi di nastro.

TIPO DI NASTRO	N° TRACCE	VELOCITÀ (cm/s)	GAMMA DINAMICA (dB)
1/4	2	38	60
1/4	2	19	54
1/4	2	9.5	48
1/4	2	4.75	42
1/8 Fe per CC	4	4.75	40
1/8 Fe super CC	4	4.75	52
1/8 Cr per CC	4	4.75	54
1/8 Cr super CC	4	4.75	58

Tab. 1.3: Dinamica in relazione alle diverse tipologie di nastri. (CC= compact cassette)

I valori di dinamica possono essere confrontati con quelli riproducibili in un CD (90 dB), in un ottimo disco in vinile (64 dB) e da un'orchestra di 75 elementi (115 dB).

**Riduttori di rumore Dolby e dbx.** Un efficace metodo per la riduzione del rumore a larga banda (hiss), è stato introdotto da R. Dolby nel 1983. Il metodo, che si è reso indispensabile soprattutto nelle registrazioni su nastro magnetico, in particolare cassette, si basa su un principio analogo a quello dell'accentuazione degli alti previsto nell'equalizzazione RIAA per i dischi LP, eccetto che in esso l'accentuazione è dosata in ragione inversa al livello del suono registrato. Per suoni intensi (grande rapporto segnale/rumore), infatti, la riduzione del rumore non è necessaria: una loro accentuazione, infatti, porterebbe a effetti di distorsione e perdita di fedeltà. La codifica del sistema Dolby B (si veda la figura 1.7a) prevede un rafforzamento degli alti in registrazione che arriva a un massimo di 10 dB per i suoni più deboli (e una corrispondente attenuazione da parte del decodificatore in sede di ascolto). Tale valore è indicativo della caduta del rumore bianco. Quando si ascolta del materiale registrato con correzione Dolby senza il previsto decodificatore, gli alti risultano esasperati: l'inserimento di un filtro passa-basso, naturalmente, consente di ottenere un miglioramento, benché soltanto parziale.

Il sistema Dolby C, costituito da due sistemi B in serie, consente una riduzione del rumore bianco di ben 20 dB. Altri sistemi di abbattimento del fruscio sono il Dolby A, più sofisticato del B, e il compressore/dilatatore dbx, entrambi capaci di riduzioni tra i 5 e i 10 dB.

Il modo di operazione di un compressore/dilatatore dbx è illustrato nella figura 1.7b. L'intervallo dinamico permesso da un sistema di registrazione è sempre molto più piccolo di quello del suono prodotto dalla sorgente (a tale limitazione sfuggono soltanto i CD-A e i DVD-A). Per un'orchestra, l'intervallo dinamico può dirsi, da pppp a ffff, di 90 dB. Invece, tanto un disco LP quanto un nastro magnetico presentano un intervallo dinamico che è, al più, di 50 dB. Ciò richiede che, al fine di registrare tutti i segnali senza distorsione, il materiale d'origine subisca una compressione, vale a dire che i suoni più tenui si rafforzino e quelli più intensi si indeboliscano. Il suono riprodotto



presenta allora caratteristiche innaturali, ma l'orecchio si è abituato, col tempo, a un ascolto del genere.

Tuttavia, se nel sistema di riproduzione si introduce un circuito dilatatore, l'originale intervallo dinamico di 90 dB può venir ripristinato. Il circuito si giova di un amplificatore a controllo di tensione (VCA) (pilotato dal livello di intensità del segnale globale) il quale attenua i segnali accentuati e amplifica quelli attenuati. Tale operazione, naturalmente, determina un contemporaneo abbattimento del rumore bianco, in quanto sulle alte frequenze opera come il sistema Dolby. Basta soltanto preoccuparsi che, nella compressione, il più debole dei segnali registrati si porti nettamente al di sopra del fruscio concernente il disco o il nastro, ad esempio di 20 dB, e questo resterà depresso della stessa misura in fase di riproduzione.

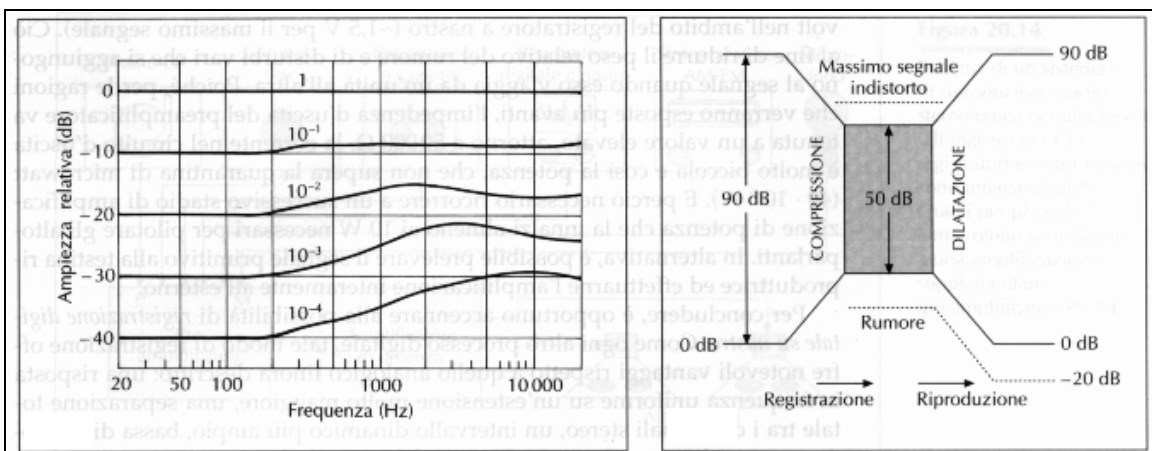


Fig. 1.7: (a) rafforzamento degli alti in registrazione, tramite codifica Dolby; (b) compressore/dilatatore dbx.

Si sottolinea comunque che un nastro codificato tramite il Dolby o il dbx e soggetto a deterioramento fisico offre problematiche di restauro più complesse. Il decodificatore esegue infatti una “amplificazione” dei difetti, in particolare se la decodifica viene eseguita su una macchina diversa a quella utilizzata per la codifica.

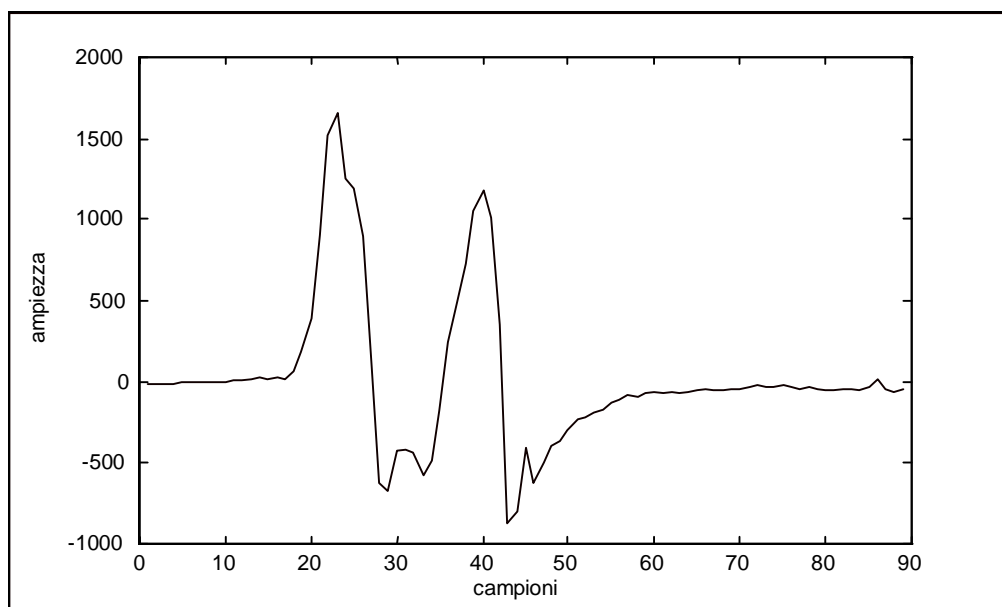


Fig. 1.8: Rumore impulsivo in un nastro magnetico

Le tipologie di rumore fin qui presentate sono comunque da ascrivere al rumore di fondo a larga banda, tuttavia anche nei nastri può crearsi del rumore impulsivo in presenza, per esempio, di locali deformazioni termiche o meccaniche del supporto (figura 1.8).

Si osserva come questo tipo di impulso sia molto diverso da quello generato dai graffi nei dischi, in quanto non si apprezza una fase di smorzamento, l'ampiezza è minore, ma la durata della fase critica (cioè il numero di campioni coinvolti) è di gran lunga maggiore. Ciò si riflette sul contenuto spettrale, composto da frequenze elevate che rendono il disturbo udibile anche se l'ampiezza non è grande. Ciò che i due tipi di impulso hanno in comune, e che comporta anche un medesimo tipo di trattamento di restauro, è il fatto che in presenza del disturbo il segnale può considerarsi cancellato ed è perciò necessario ricostruire i campioni perduti con una interpolazione fatta a partire dalle zone integre di segnale circostante.

### 1.2.3 Le cause di degrado dei nastri magnetici

Un nastro magnetico si compone in generale di tre strati: un rivestimento superiore, in cui le particelle magnetiche vengono miscelate assieme ad altri elementi in un legante, un substrato intermedio, e un rivestimento inferiore nel quale delle particelle di carbonio vengono a loro volta distribuite in un legante. In questo paragrafo descriveremo le possibili cause di degrado che possono interessare le diverse componenti di un nastro magnetico.

#### 1.2.3.1 La degenerazione del legante

Il legante tiene le particelle magnetiche del rivestimento superiore unite tra loro e alla superficie del substrato intermedio del nastro. Se il legante, in seguito alla perdita di coesione o di lubrificazione, perde la sua integrità, il nastro può divenire inutilizzabile.

I leganti polimerici usati nella costruzione dei nastri magnetici sono soggetti ad un processo chimico noto con il nome di *idrolisi*. In questo processo si assiste alla rottura

di lunghe molecole in seguito alla loro reazione con l'acqua, con la conseguente produzione di molecole corte. Il problema deriva dal fatto che queste ultime non garantiscono al legante lo stesso livello di integrità che invece sono in grado di assicurare le molecole lunghe. Più specificatamente, sono le catene di poliestere, presenti nei leganti a base di poliuretano di poliestere, ad essere soggette alla rottura a causa del processo di idrolisi. Ovviamente, affinché avvenga la reazione sopra descritta, è indispensabile la presenza dell'acqua. Inoltre, più acqua è presente e più sarà facile che le catene di poliestere si rompano. Il legante polimerico assorbe l'acqua dall'aria, e come è facile immaginare più elevato è il livello di umidità presente nell'ambiente, maggiore sarà la quantità di acqua assorbita dal legante.

Il fenomeno dell'idrolisi si manifesta rendendo lo strato di collante viscoso, di conseguenza più debole e caratterizzato da un maggiore attrito con la testina del sistema di registrazione; tutto ciò provoca errori in fase di riproduzione, l'accumulo di detriti del legante stesso sulla testina di lettura/scrittura e, nei casi estremi, l'impossibilità di leggere il contenuto del nastro o l'arresto del sistema di trasporto di quest'ultimo. L'idrolisi porta inoltre all'indebolimento del legame esistente tra il collante e il substrato, e questo può dar luogo al distacco tra i due.

#### *1.2.3.2 La perdita del lubrificante*

Del lubrificante viene di solito miscelato nel legante per ridurre l'attrito dello strato superiore del nastro sia con la testina del sistema di registrazione, sia con gli altri strati del nastro con cui quest'ultimo viene a contatto quando risulta avvolto su se stesso. Riducendo l'attrito si facilita il trasporto del nastro attraverso l'apparato di registrazione e si riduce il suo logorio.

La superficie di un nastro magnetico presenta sempre una certa porosità. Nei nastri magnetici in cui nel legante viene aggiunto del liquido lubrificante, quest'ultimo va a distribuirsi all'interno di tali pori, come accade all'acqua trattenuta da una spugna umida. Quando il nastro viene a contatto con la testina di lettura/scrittura o con le diverse guide presenti sia nella cassetta che lo contiene, sia nel sistema di registrazione, il lubrificante viene "spremuta" sulla sua superficie, creando così una interfaccia scivolosa tra il nastro e la testina o la guida. Una volta che questi ultimi sono stati superati, il lubrificante in eccesso rimasto sulla superficie del nastro viene riassorbito nella stessa superficie dalla quale era stato liberato.

Con il passare del tempo la quantità di lubrificante presente nel nastro tende a diminuire. Una parte del lubrificante viene infatti consumata ogni volta che il nastro viene impiegato per una incisione o una riproduzione, in quanto emigra dalla superficie di quest'ultimo alla testina e alle guide del sistema di registrazione con cui il nastro viene a contatto. Il livello di lubrificante diminuisce nel tempo anche quando il nastro non viene utilizzato, in seguito alla sua evaporazione e a causa della sua degradazione. I lubrificanti usati in alcuni nastri sono infatti degli oli liquidi, i quali, essendo volatili, vanno incontro ad una lenta evaporazione con il passare del tempo. Alcuni tipi di lubrificante inoltre degradano nel tempo attraverso i processi di idrolisi e ossidazione, esattamente come accade ai leganti polimerici, perdendo così le loro proprietà lubrificanti.

E' anche importante sottolineare il fatto che se un nastro è troppo lubrificato, il lubrificante in eccesso presente sulla sua superficie sarà causa di accumulo di detriti sia

sul nastro che sulla testina di lettura/scrittura, e porterà inoltre all'aumento dello spazio esistente tra questi ultimi due provocando in alcuni casi l'impossibilità da parte del sistema di registrazione di leggere correttamente il contenuto del supporto.

### 1.2.3.3 L'instabilità delle particelle magnetiche

Le particelle magnetiche, o dipoli, disseminate nel legante sono responsabili della memorizzazione e della successiva conservazione del segnale registrato sul nastro. Il verificarsi di una qualunque alterazione delle proprietà magnetiche dei dipoli, porta inevitabilmente alla perdita del segnale contenuto nel nastro.

La *magnetic remanence* (o induzione residua) caratterizza la capacità delle particelle di mantenere un campo magnetico. Indica cioè il livello del segnale che rimane memorizzato dopo un processo di registrazione. Esiste infatti una relazione diretta tra la forza del segnale registrato sul nastro e la *magnetic remanence* dei dipoli presenti sulla superficie di quest'ultimo. Di conseguenza, una diminuzione nel tempo della *magnetic remanence* delle particelle, si manifesta con un abbassamento del livello di uscita del segnale e con una possibile perdita delle informazioni contenute nel nastro.

La *coercitivity* (o forza coercitiva massima) rappresenta la capacità dei dipoli di resistere alla smagnetizzazione. Indica, in altre parole, la forza del campo magnetico che deve essere applicato ad una particella magnetica affinché questa sia indotta a cambiare la direzione del suo campo magnetico. La smagnetizzazione di un nastro può essere provocata dall'applicazione di un campo magnetico esterno, come quello prodotto dai metal-detector utilizzati ai check point degli aeroporti. Un nastro magnetico i cui dipoli sono caratterizzati da una bassa *coercitivity*, risulta maggiormente soggetto alla smagnetizzazione e alla conseguente perdita del segnale in esso contenuto.

Le particelle magnetiche si differenziano anche in base alla loro stabilità; alcuni tipi di dipoli infatti mantengono le loro proprietà magnetiche più a lungo di altri. Accade quindi che certi tipi di nastri magnetici conservino il segnale in essi memorizzato per un tempo più lungo rispetto ad altri. Le particelle di ossido di ferro sono le più stabili tra quelle attualmente utilizzate nei nastri magnetici.

I nastri magnetici che utilizzano le particelle metalliche (MP da *Metal Particulate*) e quelle di biossido di cromo ( $\text{CrO}_2$ ), presentano un livello di uscita del segnale più elevato e consentono di raggiungere frequenze di registrazione maggiori rispetto ai nastri che impiegano particelle di ossido di ferro; sono però, rispetto a questi ultimi, caratterizzati da una minore stabilità. Nel corso della sua "vita", un nastro di tipo MP o  $\text{CrO}_2$ , può vedere diminuire anche di 2 decibel (dB) il livello di uscita del segnale in esso registrato, ma nonostante questa diminuzione tale livello rimarrà comunque sempre più elevato di quello assicurato da un nastro che utilizza particelle di ossido di ferro. L'abbassamento del livello di uscita del segnale registrato in un nastro, si manifesta con la diminuzione del volume e della nitidezza del suono in esso memorizzato. Non c'è molto che possa essere fatto per prevenire il deterioramento magnetico che colpisce in particolare modo i nastri di tipo MP e  $\text{CrO}_2$ ; in ogni caso il processo di degrado può essere rallentato conservando i nastri in ambienti caratterizzati da bassi livelli sia di temperatura che di umidità (l'argomento verrà dettagliatamente approfondito nel seguito).

Per quanto riguarda i nastri che usano le particelle magnetiche di biossido di cromo ( $\text{CrO}_2$ ), è stato osservato che queste ultime, interagendo con il poliuretano di poliestere

del collante in cui vengono miscelate, accelerano il processo di idrolisi e il conseguente degrado del legante stesso. Per risolvere questo problema vengono aggiunti al legante degli additivi che ne ritardano il deterioramento.

Tra i supporti di registrazione attualmente in commercio si trovano anche i nastri per la produzione dei quali si ricorre all'evaporazione di particelle metalliche (ME da *Metal Evaporated*). In questi nastri non viene utilizzato alcun legante polimerico, in quanto l'intero strato magnetico che ricopre il film intermedio consiste in un singolo e omogeneo strato di lega metallica che viene evaporata sulla superficie del substrato del nastro. Mentre per quanto riguarda la stabilità chimica i nastri di tipo ME sono paragonabili a quelli di tipo MP, altrettanto non vale per l'aspettativa di vita, che nei primi risulta inferiore rispetto ai secondi; questo dipende dal fatto che il rivestimento magnetico dei nastri ME è nettamente più sottile rispetto a quello presente nei nastri di tipo MP.

#### 1.2.3.4 La deformazione del substrato

Il substrato intermedio, o film, supporta lo strato magnetico del nastro e ne consente il trasporto attraverso il sistema di registrazione. Il film deve resistere agli stress dovuti all'utilizzo e all'immagazzinamento del nastro, senza subire deformazioni permanenti né mutare le proprie caratteristiche dimensionali a causa, ad esempio, dell'assorbimento di umidità o di calore.

I materiali che nel corso degli anni sono stati più utilizzati per realizzare il substrato dei nastri magnetici sono l'acetato di cellulosa e il poliestere, i quali presentano delle proprietà fisiche e delle aspettative di durata nettamente diverse tra loro. Negli anni che vanno dal 1935 ai primi anni sessanta, il substrato veniva realizzato con l'acetato di cellulosa, e in alcuni casi con il triacetato di cellulosa. In questi nastri si faceva uso di additivi plastificanti, i quali assicuravano la necessaria flessibilità al supporto, ma erano anche soggetti, con il passare del tempo, all'evaporazione e alla cristallizzazione. Si assisteva così ad una progressiva diminuzione della flessibilità del supporto che risultava sempre più soggetto alle rotture.

I nastri con il substrato in acetato di cellulosa sono soggetti a fenomeni di espansione lineare se conservati in ambienti umidi e/o caldi. A causa delle diverse proprietà che caratterizzano il substrato e il rivestimento magnetico di questo tipo di nastri, l'assorbimento da parte di questi ultimi di umidità e calore può provocare delle alterazioni fisiche del supporto, quali l'arricciamento del nastro. La conseguenza più evidente di tali fenomeni consiste nel peggioramento della qualità del suono riprodotto, a causa del non più perfetto contatto tra la testina di lettura/scrittura e il nastro.

Il problema più serio che interessa il substrato in acetato di cellulosa consiste nel processo di idrolisi che sta alla base del fenomeno noto con il nome di "sindrome dell'aceto" (o *Vinegar Syndrome*): si manifesta con il rilascio da parte del nastro del tipico odore dell'acido acetico, il quale è un sottoprodotto della decomposizione del film in acetato. Il degrado del substrato a causa del processo di idrolisi viene accelerato dalla presenza di umidità e di particelle magnetiche di ferro nel nastro. Dal momento in cui il film in acetato inizia a decomporsi, emettendo acido acetico, aumenta l'umidità assorbita dal nastro. Il processo, una volta iniziato, proseguirà a velocità sempre maggiore (propagazione *a valanga*) e attualmente nessuna soluzione in grado di arrestarlo è stata ancora trovata. Una volta che il substrato ha raggiunto un avanzato

stato di decomposizione, il nastro magnetico risulterà fragile e facilmente soggetto a rotture se piegato o teso con troppa forza.

È interessante osservare che negli anni in cui è stato impiegato il substrato in acetato di cellulosa, lo strato magnetico del nastro veniva realizzato utilizzando un legante in vinile che presenta apprezzabili doti di stabilità. Di conseguenza, la durata dei nastri prodotti in quel periodo è legata più al degrado del substrato intermedio che a quello del legante.

A partire dai primi anni sessanta, i produttori di nastri magnetici hanno iniziato ad utilizzare il poliestere orientato (noto anche con la sigla PET da *PolyEthylene Terephthalate*) per realizzare il substrato dei loro prodotti. È stato provato che il poliestere risulta essere un materiale chimicamente molto stabile. I film in PET presentano un'elevata resistenza sia all'idrolisi che all'ossidazione.

I film in poliestere sono caratterizzati da un basso punto di snervamento: questo fa sì che se sottoposti ad una elevata trazione possono deformarsi irrimediabilmente, anziché strapparsi in maniera netta, ma pur sempre riparabile, come invece accade con i film in acetato. Da questo punto di vista assumono notevole importanza le condizioni ambientali in cui il nastro viene conservato; ogni volta che la temperatura o l'umidità subiscono delle variazioni, il nastro è infatti soggetto a dilatazione o contrazione. Queste alterazioni dimensionali del nastro, comportano un notevole stress nei confronti del substrato in poliestere il quale può andare in contro a deformazioni permanenti.

Prima di concludere, è giusto ricordare che tra i primi materiali utilizzati per realizzare il substrato dei nastri magnetici c'è stata anche la carta; questa veniva utilizzata prima dell'avvento dell'acetato di cellulosa. I nastri il cui substrato è stato realizzato con questo tipo di materiale sono molto rari e particolarmente fragili. Sono infatti facilmente soggetti alla rottura e richiedono quindi un'enorme cautela sia nella loro conservazione che nel loro utilizzo.

#### *1.2.3.5 Il fenomeno del print-through (effetto spira)*

Il fenomeno del *print-through*, consiste nell'involontario trasferimento magnetico di ciò che è registrato in uno strato di nastro sulla spira adiacente a quest'ultimo, all'interno della bobina di cui il nastro fa parte. Il segnale che "stampandosi" si aggiunge a quello già presente nel nastro, in quanto registrato in precedenza, si manifesta con "un'eco" della registrazione precedente, o con "un'anteprema" di quella successiva, entrambi ad un livello molto basso. Il segnale stampato presenta infatti un livello di 50-60 dB inferiore a quello del segnale registrato. L'effetto risulta particolarmente evidente quando un passaggio di intensità elevata è preceduto o seguito da uno tenue.

L'effetto spira è principalmente correlato alle seguenti cause:

1. La temperatura: all'aumentare della temperatura aumentano gli effetti del *print-through*.
2. Il tempo: gli effetti dovuti al *print-through* si intensificano con il passare del tempo.
3. Lo spessore del nastro: più il nastro è sottile, maggiore sarà l'intensità del *print-through*.
4. Il numero di riavvolgimenti: ad ogni riavvolgimento del nastro si riduce il *print-through*.
5. La presenza di campi magnetici: avvicinando il nastro a campi magnetici la cui

intensità sia dell'ordine di 10-20 kAs/m (10-20 Gauss), o maggiore, si accelera il processo di *print-through*.

6. La lunghezza d'onda dei segnali registrati: il *print-through* si manifesta con maggiore intensità alle basse frequenze.

Si valuterà ora, in particolare, il legame esistente tra il processo di *print-through* ed aspetti quali la temperatura, il tempo e lo spessore del nastro.

**Dipendenza dalla temperatura:** con l'aumentare della temperatura si osserva un incremento tendenzialmente lineare del fenomeno. Gli effetti della temperatura possono essere descritti attraverso un coefficiente termico che varia da nastro a nastro, ma che con buona approssimazione può essere assunto in generale uguale a 0.14 dB/°C. In figura 1.9 viene riportato l'andamento del processo di *print-through* in funzione della temperatura per due periodi di osservazione: 4 e 48 ore.

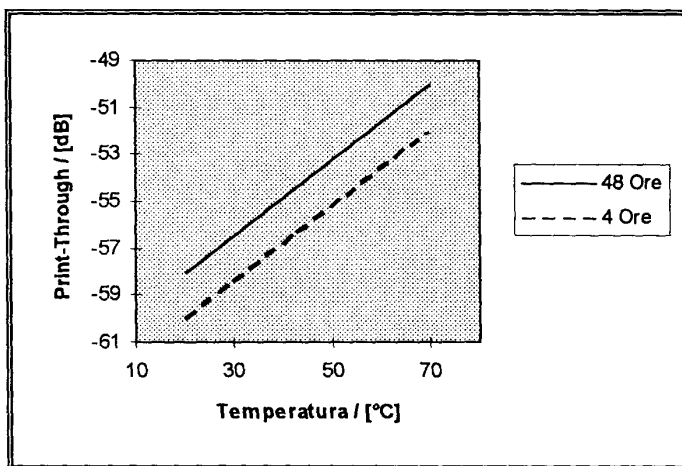


Fig. 1.9: Il fenomeno del *print-through* al variare della temperatura. Nel grafico viene riportato l'andamento del processo di *print-through*, in funzione della temperatura, per due periodi di osservazione: 4 e 48 ore.

**Dipendenza dal tempo:** come per la temperatura, anche il progredire del tempo comporta un aumento del fenomeno di *print-through*. Il processo inizia dal momento in cui i due strati di nastro vengono a contatto, e continua fintanto che rimangono aderenti tra loro. Il legame esistente tra il tempo e il *print-through* può essere descritto con una relazione del tipo  $20 \log_{10}(\log_{10}(\beta t))$ ; relazione (il cui andamento viene riportato in figura 1.10) in cui il tempo viene espresso in secondi, mentre  $\beta$  è una costante relativa a ciascun tipo di nastro.

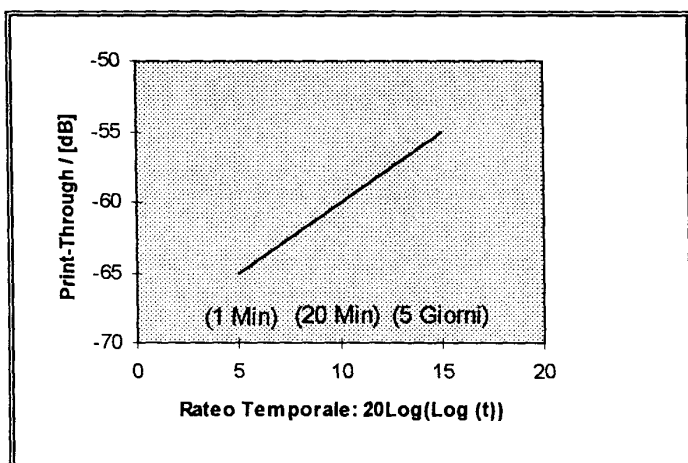


Fig. 1.10: Il fenomeno del *print-through* al variare del tempo. L'effetto del tempo sul *print-through* può essere descritto con una relazione del tipo  $20 \log_{10}(\log_{10}(\beta t))$ .

**Dipendenza dallo spessore del nastro:** il *print-through* dipende anche dalla geometria del nastro magnetico; indicando con  $d$  lo spessore del rivestimento magnetico, e con  $d_s$  quello del substrato intermedio, vale la relazione:

$$\text{Print-through}(R) = 20 \log_{10} (R/(R+1)) + \text{cost.}$$

dove  $R=d/d_s$ .

In figura 1.11 viene riportato l'andamento della precedente espressione; si può osservare come, al decrescere del fattore  $R$ , diminuisca di conseguenza il *print through* misurato. E' interessante notare che una variazione di  $R$  da 0.6 (valido per le cassette C-120) a 0.2 (valido per i nastri professionali) consente una diminuzione del fenomeno di *print-through* di circa 7 dB.

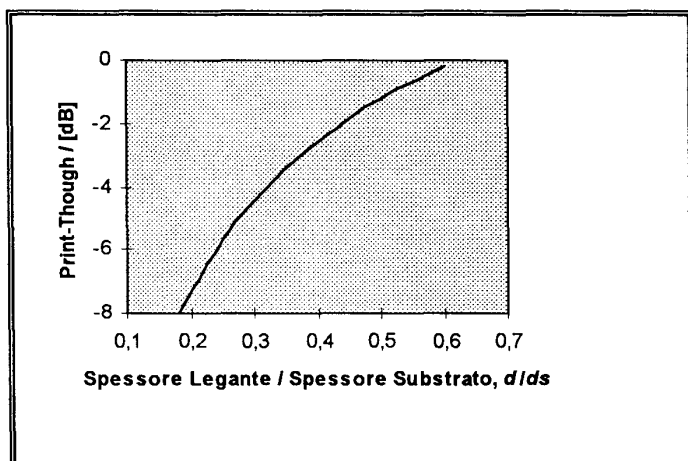


Fig. 1.11: Il fenomeno del *print-through* al variare del rapporto tra spessore del legante e spessore del substrato.



### 1.2.3.6 La preservazione dei nastri magnetici

Una interessante definizione del termine *preservare* proposta dall'IIC (*International Institute for Conservation*) cita testualmente: “tutte le azioni atte a ritardare il deterioramento, e a prevenire il danneggiamento, di un qualunque bene di natura culturale. Preservare implica controllare la situazione ambientale e le condizioni d'uso, e include tutte quelle azioni il cui scopo è di mantenere il più possibile inalterato lo stato del bene stesso”.

Conservare un nastro magnetico in un ambiente pulito e controllato, è la più importante precauzione da prendere allo scopo di prolungarne la vita. Le elevate temperature e le alte umidità, la presenza di polvere e di sostanze corrosive nell'aria, sono tutti fattori che possono provocare la perdita dei dati contenuti nel supporto a causa della diminuzione della sua capacità magnetica e del deterioramento del legante o del substrato del nastro. Si devono comunque evitare anche le temperature troppo basse; in alcuni casi infatti, temperature inferiori agli 8°C possono danneggiare il nastro ed accorciarne la vita in seguito alla trasudazione del lubrificante contenuto nel legante e della conseguente lordura accumulatasi sulla testina del sistema di registrazione.

In ogni caso, le precauzioni da rispettare allo scopo di preservare un nastro magnetico, possono essere riassunte in tre regole generali:

- a) Proteggere il nastro dal deposito di sostanze esterne.
- b) Evitare ogni pressione sul nastro che ne possa causare la deformazione.
- c) Conservare il nastro in un ambiente stabile e controllato.

**a) Deposito di sostanze esterne sul nastro.** Le impurità che si rilevano in un nastro magnetico possono essere classificate in due categorie: (1) deposito di sostanze esterne che non fanno parte del supporto magnetico originale, come il grasso lasciato dalle impronte digitali, la fuliggine, le macchie di colore e (2) residuo delle alterazioni subite dal materiale con cui è realizzato il nastro stesso; tali alterazioni possono essere dovute a reazioni chimiche interne al materiale stesso, o a reazioni di quest'ultimo con agenti presenti nell'ambiente in cui il nastro si trova.

Con il termine *polvere* si intende una mistura composta da frammenti di pelle umana, minute particelle di materiale minerale e vegetale, fibre tessili, sali, fumi industriali, grasso lasciato dalle impronte digitali, e altri materiali organici e inorganici. In questa mistura chimica trovano posto le spore di innumerevoli muffe, funghi e microrganismi che si nutrono del materiale organico in essa contenuto. La maggior parte delle sostanze presenti nella polvere risultano essere igroscopiche (attirano cioè l'acqua), e questa loro proprietà favorisce la crescita delle muffe, aumenta la corrosività dei sali e accelera il processo di idrolisi e il rilascio degli acidi. A causa della polvere depositatasi sulla superficie del nastro si può osservare un abbassamento della qualità del suono riprodotto mediante il sistema di registrazione. In condizioni ottimali infatti, la testina di lettura/scrittura di quest'ultimo deve rimanere a stretto contatto con la superficie magnetica del nastro. La presenza di una particella di polvere su tale superficie fa sì che la testina vi scivoli sopra perdendo il contatto con il nastro e provocando di conseguenza un abbassamento del livello del suono riprodotto in uscita dal sistema di registrazione. La polvere può danneggiare permanentemente il nastro quando, per la sua abrasività combinata con la pressione esercitata dalla testina del registratore sulla

superficie del nastro, arriva a graffiare lo strato magnetico che riveste il nastro stesso.

Allo scopo di minimizzare il deposito di impurità sulla superficie dei nastri magnetici è indispensabile seguire i seguenti accorgimenti:

- Mai toccare con le dita la superficie del supporto di registrazione. Se quest'ultimo necessita di essere manipolato, utilizzare a tale scopo dei guanti bianchi di cotone, necessariamente puliti, cercando di toccare solo il bordo laterale del nastro.

- Quando il nastro non viene usato deve sempre essere riposto all'interno di un contenitore sigillato, che ovviamente deve rimanere chiuso.

- Nei locali destinati ad accogliere i nastri, bisogna evitare la presenza di impurità gassose quali: ammoniaca, cloro, solfuri, perossidi, ozono, ossidi di azoto, fumo e gas acidi.

- I perni e i bordi laterali delle bobine, le cassette contenenti il nastro, e i contenitori utilizzati per la loro archiviazione, devono essere realizzati con materiali chimicamente stabili, indeformabili e che non producano polvere. Non devono inoltre trattenere l'umidità.

- Mai avvicinare il nastro a possibili fonti di polvere, quali la carta e il cartone.

- E' importante mantenere puliti gli ambienti in cui i nastri vengono conservati e manipolati; evitare quindi di consumare cibi e bevande in tali aree.

- Realizzare i pavimenti in materiali antistatici che risultino facilmente lavabili; evitare quindi l'uso di moquette e di tappeti.

- Curare molto la pulizia delle attrezzature usate nella conservazione e nell'impiego dei supporti di registrazione.

- Eventuali sistemi di condizionamento dell'aria dovranno essere equipaggiati con filtri antipolvere di maglia sufficientemente fine (0.3 mm risulta una misura ragionevole).

- Sui contenitori, evitare l'impiego di etichette che possono danneggiarli; è preferibile usare al loro posto gli inchiostri neutri.

- Prestare particolare attenzione alla pulizia dei nastri. Poiché la polvere depositata sulla superficie del supporto magnetico viene trattenuta dalla carica elettrostatica presente sul nastro, spesso effettuare la pulizia di quest'ultimo in modo inadeguato, risulta inutile se non addirittura dannoso. Infatti, la pressione esercitata con il panno sul nastro per rimuovere la polvere presente sulla sua superficie, può provocare la graffiatura del nastro stesso. E' preferibile quindi ricorrere ai numerosi prodotti disponibili sul mercato e specificatamente realizzati a tale scopo. Si tratta di panni estremamente soffici con i quali i corpi estranei presenti sulla superficie del nastro, dopo essere stati rimossi dalle fibre del tessuto, vengono asportati senza danneggiare il supporto di registrazione.

**b) Deformazione del nastro.** Poiché sulla superficie del nastro magnetico sono conservate le informazioni in esso registrate, diventa di fondamentale importanza proteggere il supporto da qualunque deformazione fisica. Sottoporre il nastro a tensioni longitudinali, piegarlo su se stesso, o causarne la caduta da una altezza qualunque, può avere delle conseguenze deleterie sull'integrità del segnale sonoro in esso memorizzato.

Con l'obiettivo di minimizzare le possibili cause di deformazione di un nastro, si suggerisce di adottare i seguenti accorgimenti:

- Evitare al nastro ogni tipo di caduta; lo shock conseguente potrebbe riordinare le

particelle magnetiche, con il risultato di attenuare le alte frequenze del segnale in esso registrato.

- Mai avvicinare il nastro a sorgenti di calore o di luce, specie se di luce ultravioletta.

- I nastri non vanno riposti né orizzontalmente, né tanto meno uno sopra l'altro; la posizione migliore è quella verticale, con le bobine o le cassette contenenti il nastro affiancate tra loro.

- Evitare di appoggiare oggetti pesanti sopra la bobina di nastro o la cassetta che lo contiene.

- Le cassette contenenti il nastro, devono essere conservate con quest'ultimo completamente avvolto su una delle due bobine.

- Il nastro deve essere riavvolto almeno ogni tre anni; in questo modo si dissipano quelle tensioni presenti all'interno della bobina, che altrimenti potrebbero causare contrazioni o espansioni lineari del nastro stesso. La procedura consiste, se il nastro è contenuto in cassetta, nel riavvolgerlo lentamente due volte in modo tale che, al termine della procedura, il nastro si ritrovi nella situazione di partenza. Se invece il nastro è avvolto in bobina, si dovrà prima riversarlo in un'altra bobina, per poi riavvolgerlo in quella di partenza con la quale potrà essere nuovamente immagazzinato.

- Il nastro deve essere riavvolto lentamente per evitare che tra strato e strato di quest'ultimo si formino sacche d'aria; la loro presenza porterebbe infatti all'aumento dello stress a cui è sottoposto il nastro, e all'esposizione del suo strato magnetico all'aria. Un modo per riavvolgere il nastro ad una velocità sufficientemente lenta, consiste nel farlo "girare in lettura" con un normale sistema di registrazione dal quale sia stata rimossa la testina di lettura/scrittura.

Alcune raccomandazioni particolari devono essere fatte circa la manipolazione dei nastri avvolti in bobina ma non protetti da una cassetta di plastica. Si tratta dei primi supporti utilizzati per la registrazione su nastro magnetico, e in figura 1.12 ne viene riprodotto un esempio.

- Questo tipo di supporto di registrazione deve essere manipolato con estrema cautela ed esclusivamente prendendolo per il perno centrale e mai per i bordi laterali; questi ultimi potrebbero infatti deformarsi, danneggiando così il nastro della bobina.

- Le bobine devono essere conservate in appositi contenitori, nei quali dovranno essere sostenute tramite il loro perno, e non appoggiandosi sul bordo esterno facendo gravare su quest'ultimo l'intero peso del supporto.

- Non riporre in posizioni adiacenti tra loro bobine di nastro di diverse dimensioni; le più piccole possono andare perse o danneggiate, mentre le più grandi possono risentire della disomogeneità di pressione esercitata su di esse.

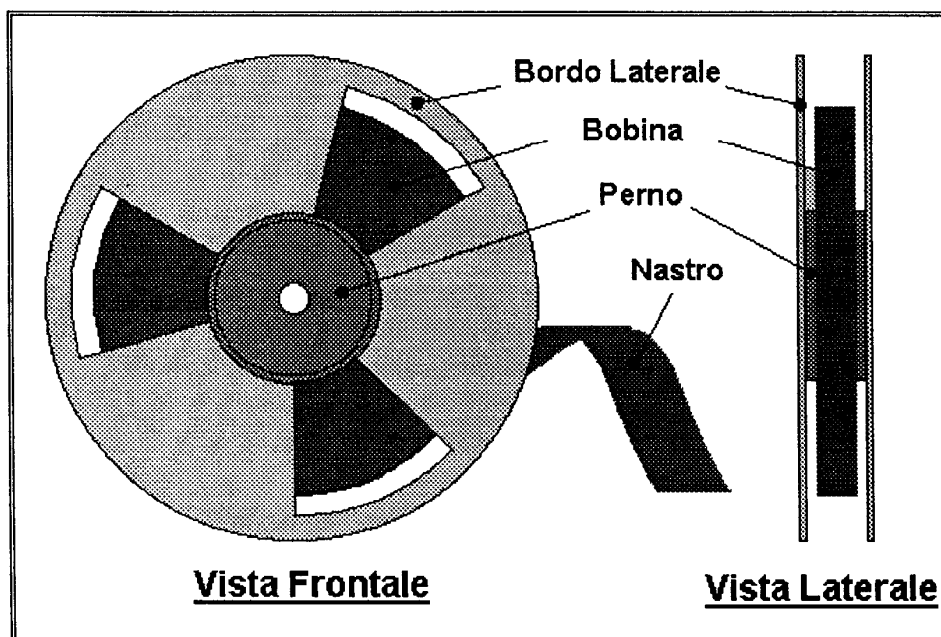


Fig. 1.12: Principali componenti di una bobina di nastro magnetico. Il nastro è avvolto attorno al perno formando una bobina che il bordo laterale protegge dalle lesioni.

**c) Condizioni ambientali.** Un ambiente appropriato per la conservazione dei nastri magnetici risulta un elemento essenziale per ritardarne i meccanismi di degrado. Elevate temperature e umidità possono dare il via a pericolose reazioni chimiche e in ogni caso favoriscono la crescita dei funghi. Risulta quindi di fondamentale importanza attenersi il più possibile alle seguenti raccomandazioni:

- Conservare i nastri in ambienti in cui la temperatura si mantenga sempre tra i 15 e i 20°C.
- La temperatura deve essere il più costante possibile, e in ogni caso sono assolutamente da evitare escursioni termiche superiori ai 2°C nell'arco di 24 ore.
- Nei locali destinati ad accogliere i nastri, l'umidità relativa deve essere sempre compresa tra il 20 e il 40%.
- Come la temperatura, anche l'umidità deve rimanere il più stabile possibile. In questo senso diventano inaccettabili variazioni dell'umidità relativa superiori ai 5% in un periodo di 24 ore.
- Mantenere in ogni istante un'appropriata ventilazione e circolazione d'aria nei locali in cui i nastri vengono conservati, così da rendere la temperatura e l'umidità relativa uniformi in ogni loro punto.
- Per far sì che la temperatura e l'umidità soddisfino le specifiche indicate nei punti precedenti, diventa indispensabile l'uso di un sistema automatico di condizionamento dell'aria nei locali adibiti alla conservazione dei nastri. Se ciò non fosse possibile, un'elevata umidità può essere abbassata mediante l'uso di deumidificatori elettrici. Questi ultimi utilizzano delle sostanze essiccanti inerti, come ad esempio del gel di silice chimicamente pura. Sia i condizionatori d'aria che i deumidificatori elettrici, dovranno in ogni caso essere dotati di filtri antipolvere.
- Tenere il nastro lontano dalle sorgenti di campi magnetici. In particolare,

l'ampiezza di picco dei campi magnetici esterni non deve superare i 4 kAs/m (50 Oe) nei campi prodotti da correnti continue, e gli 800 As/m (10 Oe) in quelli prodotti da correnti alternate. Campi magnetici esterni di una certa intensità sono osservabili nelle vicinanze dei motori e dei trasformatori; si tratta comunque di dispositivi elettromeccanici quasi sempre schermati, per cui l'intensità del campo magnetico da essi prodotto decade rapidamente una volta al di fuori della schermatura. In generale, tenendo i nastri ad una distanza di 1-2 metri da tali sorgenti, si assicura loro una sufficiente protezione.

- Non immagazzinare i nastri in locali che possono subire allagamenti, ed eliminare da tali ambienti qualunque materiale facilmente infiammabile come carta, legno e cartone. In questo senso si raccomanda di realizzare gli scaffali destinati ad accogliere i nastri in acciaio.

- I nastri che non devono essere consultati, è opportuno vengano riposti in contenitori robusti e che non lascino filtrare la luce. Questi devono essere sigillabili e a tenuta d'aria.

- Per quanto riguarda l'impianto di illuminazione dei locali, si raccomanda l'uso di tubi fluorescenti che non producano radiazioni ultraviolette per una quantità superiore a 75  $\mu\text{w}/\text{lm}$  (microwatt per lumen).

- Non avvicinare mai i nastri a sorgenti di calore, ed evitare di esporli alla luce diretta del sole.

- Nel caso in cui un nastro emani il tipico odore dell'acido acetico, deve essere immediatamente separato dagli altri, isolato, e il suo contenuto deve quanto prima essere copiato in un altro nastro.

- Ogni cinque anni devono essere effettuate delle ispezioni su dei campioni di nastri che rappresentino l'intero archivio. Se in questo arco di tempo si verificano delle situazioni particolari (brusche variazioni dell'umidità relativa, forti sbalzi di temperatura, ecc.) nei locali adibiti alla loro conservazione, tali ispezioni dovranno avvenire ad intervalli più frequenti. Di ciascun nastro scelto per l'ispezione si dovrà controllare la qualità del segnale in esso registrato, eventuali distorsioni fisiche, e la presenza di processi di deterioramento in atto che possono riguardare il nastro, la cassetta che lo contiene, il contenitore, nonché le etichette applicate su di essi. Se durante l'ispezione si rilevano dei nastri interessati da processi di deterioramento, questi dovranno essere immediatamente separati dai nastri "sani" per poi essere sottoposti alle cure del caso. I nastri sui quali vengono rilevati accumuli di polvere dovranno essere opportunamente puliti prima di venire nuovamente immagazzinati. La pulizia del nastro dovrà avvenire con un panno soffice, asciutto e ovviamente pulito.

#### *1.2.3.7 Come intervenire in situazioni particolari*

In questo paragrafo vengono prese in considerazione alcune situazioni particolari in cui un nastro magnetico può essere coinvolto, e per ognuna di esse si propone una soluzione al problema venutosi a creare.

- **II nastro viene sottoposto per breve tempo ad elevate temperature.** La bobina di nastro può sopportare, per brevi periodi, temperature superiori anche ai 70°C senza subire danni apparenti. Purtroppo lo stesso non vale per le cassette contenenti il nastro, le quali essendo realizzate in plastica, se sottoposte a temperature superiori ai

55°C andranno quasi sicuramente incontro a deformazioni permanenti. Tale eventualità non è poi così rara, se si pensa che durante una tipica calda giornata estiva all'interno di un'auto esposta al sole si possono raggiungere temperature prossime ai 70°C. Se un nastro magnetico, in bobina o in cassetta, è stato sottoposto a temperature elevate, bisogna raffreddarlo molto lentamente fino a portarlo ad una temperatura di circa 20°C. Trascorse 48 ore il nastro dovrà, altrettanto lentamente, essere riavvolto per eliminare le tensioni che, a causa delle variazioni di temperatura, si sono accumulate all'interno della bobina.

- **Il nastro viene a contatto con l'acqua.** Un nastro proveniente da un ambiente particolarmente umido deve essere “asciugato” prima che i funghi lo possano attaccare. A questo scopo deve essere mantenuto in un forno alla temperatura di 50°C per circa 24 ore. Al termine di queste ultime il nastro verrà lasciato raffreddare lentamente fino a raggiungere la temperatura ambiente, per poi essere riavvolto a bassa velocità con un registratore che presenti il minor numero possibile di punti di contatto con il nastro stesso. Se il nastro è venuto a contatto con l'acqua, allora è consigliabile ripetere tutte le operazioni sopra descritte una seconda volta. Fatto ciò, se si vogliono neutralizzare completamente gli effetti del liquido, si può mantenere il nastro ad una temperatura di 15°C per 3-4 giorni. Trascorsi questi ultimi, una volta riportatolo lentamente alla temperatura ambiente, lo si riavvolge più volte, sempre a bassa velocità, per dissipare le tensioni accumulate nella bobina.

- **Il nastro necessita di essere lubrificato.** I nastri magnetici prodotti a partire dai primi anni settanta presentano, miscelata nel legante, una sostanza lubrificante. Quest'ultima ha lo scopo di annullare l'attrito tra nastro e testina di lettura/scrittura, nonché tra nastro e tutte le parti del sistema di registrazione (perni, guide) con cui il supporto magnetico viene a contatto durante il suo utilizzo. La quantità di lubrificante contenuta nel nastro tende però inesorabilmente a diminuire; ciò accade sia in seguito all'utilizzo del nastro, per il consumo fisico del lubrificante, sia con il passare del tempo, per la sua evaporazione e il suo deterioramento. Per evitare i conseguenti problemi di attrito, la soluzione migliore consiste nel “ringiovanire” il nastro reintroducendo in esso il lubrificante andato perduto. E' possibile ottenere ciò facendo girare il nastro a contatto con un tampone inzuppato in una soluzione opportuna (ad es. 1% di *Kritoxml* e 99% di *freon TF*) acquistabile presso un negozio specializzato.

- **Il nastro avvolto in una bobina è troppo poco teso.** Per giudicare il livello di tensione con cui un nastro è avvolto in una bobina è sufficiente, afferrando quest'ultima per il perno, tirare l'estremità libera del nastro; se, con il perno bloccato, la bobina ruota e il nastro si svolge significa che la tensione è troppo bassa. In questo caso è necessario ripristinare la tensione corretta, facendo prima girare il nastro in lettura fino alla sua fine, per poi riavvolgerlo completamente.

- **Per evitare fenomeni di *print-through*.** Si propongono una serie di accorgimenti al fine di minimizzare gli effetti del *print-through*:

- Preferire i nastri di un certo spessore a quelli più sottili.
- Conservare i nastri alle basse temperature (20°C o inferiori), evitando comunque

di portarli fino al punto di congelamento.

- Quando i nastri non vengono utilizzati devono essere riposti in contenitori termoisolati, per evitare che subiscano variazioni di temperatura.
- I contenitori destinati ad accogliere i nastri è preferibile siano realizzati in acciaio, così da proteggere il loro contenuto da eventuali campi magnetici esterni.
- E' importante riavvolgere i nastri almeno ogni due anni (meglio se ogni anno). Trattandosi di una frequenza particolarmente elevata, tale operazione dovrà interessare solo quei supporti magnetici che, per le loro caratteristiche, risultano essere più facilmente soggetti al fenomeno del *print-through*; per tutti gli altri nastri sarà sufficiente eseguire il riavvolgimento con una scadenza triennale. La procedura di riavvolgimento dovrà seguire le già citate precauzioni.
- Se il nastro è registrato in modo unidirezionale, conservarne le bobine avvolte "al contrario", cioè con la coda del nastro all'esterno. In questo modo il nastro dovrà essere riavvolto prima di poter essere ascoltato.
- Non copiare mai un nastro affetto dal *print-through* nella speranza di eliminarlo; infatti questo vorrebbe dire trasferire permanentemente lo stesso problema sul nuovo nastro.

#### 1.2.3.8 La tensione del nastro

La tensione con cui il nastro magnetico viene avvolto risulta essere un fattore molto importante. Le conseguenze di una tensione elevata del nastro possono essere un aumento della sua lunghezza e il trasferimento della ruvidità che caratterizza il rivestimento inferiore del supporto, sul suo rivestimento superiore, viceversa liscio, con cui viene a contatto. Se il nastro è invece troppo poco teso, si possono creare delle pieghe indesiderate all'interno della bobina.

La tensione ideale alla quale avvolgere il nastro prima di archivarlo risulta proporzionale all'area della sua sezione trasversale (larghezza x spessore). In figura 1.13 viene riportata, per un nastro largo 6mm, la relazione esistente tra lo spessore del nastro e la tensione che per esso si raccomanda di adottare.

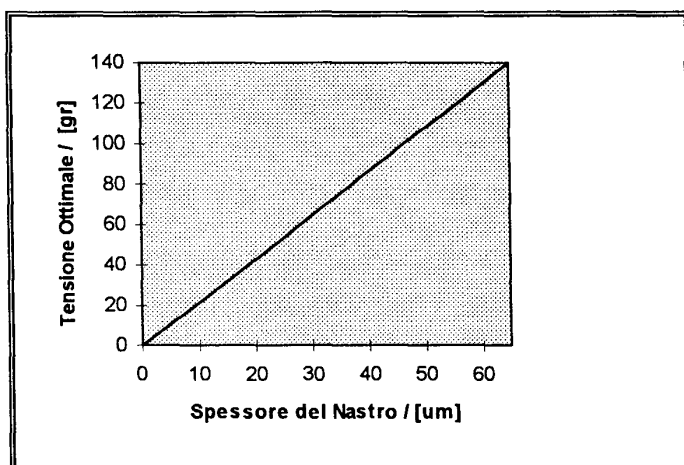


Fig. 1.13: Il grafico mostra, per un nastro largo 6mm, la relazione esistente tra lo spessore del nastro (in micrometri) e la tensione ottimale (in grammi) alla quale deve essere avvolto.

Per determinare lo spessore del nastro è indispensabile l'uso di un micrometro; si determina lo spessore totale di dieci strati di nastro sovrapposti, e lo si divide per 10 così da determinare lo spessore di un singolo strato. Si fa a questo punto riferimento alla figura 1.13 per conoscere la tensione più opportuna alla quale avvolgere il nastro. A questo scopo si potrà usare un sistema di registrazione che avvolga il nastro ad una tensione costante precedentemente memorizzata.

#### *1.2.3.9 La scelta dei materiali*

Un aspetto molto importante della conservazione dei nastri magnetici consiste nella scelta dei materiali con cui realizzare tutti quegli elementi che, assieme al nastro magnetico, formano il supporto di registrazione vero e proprio.

- Si è già detto in precedenza che i perni e i bordi laterali delle bobine, le cassette contenenti il nastro, ma anche i contenitori utilizzati per la loro archiviazione, devono essere realizzati con materiali chimicamente stabili, indeformabili e che non producono polvere. Non devono inoltre trattenere l'umidità.

- Nel caso in cui si vogliano utilizzare dei metalli, questi devono essere amagnetici. La plastica può essere impiegata per realizzare i perni e i bordi laterali delle bobine e le cassette contenenti il nastro, ma deve in questo caso trattarsi di plastica indeformabile e sufficientemente robusta.

- Il perno centrale delle bobine deve essere cilindrico e realizzato con materiale indeformabile. La superficie esterna del perno, venendo a contatto con il nastro, deve essere liscia e priva di aperture. E' preferibile che il perno abbia il diametro il più elevato possibile, in modo da evitare distorsioni fisiche al nastro avvolto attorno ad esso.

- E' bene che le protezioni laterali della bobina presentino delle piccole aperture, e siano inoltre amovibili e sostituibili.

- Le cassette contenenti il nastro devono essere in grado di resistere agli urti che derivano da eventuali loro cadute. Devono essere realizzate in modo tale da non danneggiare il nastro che contengono, ed inoltre essere facilmente smontabili e ricomponibili.

- I contenitori in cui dovranno essere immagazzinati i nastri, devono essere in grado di resistere agli urti ed impedire l'intrusione al loro interno di luce e polvere. Evitare l'uso di contenitori realizzati in carta o cartone. Devono essere contenitori indeformabili e dotati di un lucchetto, o di una serratura, che ne impedisca l'apertura accidentale.

- Le bobine, le cassette e i contenitori, devono essere etichettati in modo tale da consentirne l'immediata identificazione del loro contenuto; a tale scopo le etichette dovranno indicare la data di registrazione, il numero di identificazione, la collocazione nel magazzino e il titolo di tutti i brani in essi contenuti. Le etichette non devono rilasciare acidi, polvere o ossidanti, e devono rimanere attaccate al supporto che identificano per l'intero arco di vita di quest'ultimo. Se si utilizzano etichette adesive, queste non devono in alcun modo venire a contatto con il nastro.

- Il nastro magnetico non deve venire a contatto con nessun elemento della cassetta, della bobina o del contenitore in cui viene immagazzinato, che lo possa



danneggiare, deformare o che ne possa accelerare il deterioramento.

- I contenitori devono essere realizzati in modo tale che al loro interno le cassette e le bobine vengano posizionate verticalmente. Le bobine, in particolare, non devono appoggiarsi sul loro bordo laterale, ma devono invece essere sorrette attraverso il loro perno centrale.
- Gli scaffali devono essere sufficientemente robusti da sostenere il peso dei contenitori, e disegnati in modo tale che questi ultimi non possano essere posizionati uno sopra l'altro.
- I contenitori nei quali le cassette e le bobine vengono conservate, devono essere realizzati con materiali non infiammabili e termoisolanti, in grado cioè di proteggere il loro contenuto da un eventuale incendio che si sviluppi nei locali in cui sono sistemati.

#### 1.2.3.10 L'acclimatazione dei nastri

Non sempre le condizioni ambientali (in particolare temperatura e umidità relativa) dei locali nei quali i nastri vengono conservati, coincidono con quelle in cui gli stessi nastri vengono ascoltati. Accade quindi che un nastro rimasto per lungo tempo nel contenitore sigillato, prima di essere ascoltato necessita di un periodo di acclimatazione. I tempi di tale procedura dipendono sia dalle caratteristiche geometriche del nastro, sia dallo sbalzo totale di temperatura e umidità relativa al quale il nastro deve essere sottoposto.

In tabella 1.4 vengono riportati, per nastri di diversa larghezza, i tempi necessari ad acclimatare il supporto alle nuove condizioni ambientali, nell'ipotesi che le condizioni di archiviazione siano di 15°C e del 30% di umidità relativa. Ad esempio, un nastro magnetico della larghezza di 6.35 mm che viene portato dalla temperatura di archiviazione di 15°C a quella della sala di ascolto di 25°C, prima di poter essere utilizzato richiede almeno un'ora di acclimatazione, nell'ipotesi che i due locali presentino lo stesso livello di umidità relativa.

Larghezza del nastro, (mm)	Tempo di acclimataz. alla temperatura, (ore) <sup>(1)</sup>	Tempo di acclimataz. alla umidità relativa, (giorni) <sup>(2)</sup>
6.35	0.5	1
12.70	0.5	4
19	1	8
25.4	1	14
50.8	4	50
(1) Tempo di acclimatazione del nastro per aumenti della temperatura di 5 °C.		
(2) Tempo di acclimatazione del nastro per aumenti dell'umidità relativa del 10%.		

Tabella 1.4. Tempi di acclimatazione dei nastri magnetici in relazione in relazione alla temperatura e all'umidità relativa.

Una volta terminato il periodo di acclimatazione, il nastro deve essere riavvolto lentamente, per eliminare le tensioni accumulate a causa delle variazioni di temperatura e umidità alle quali è stato sottoposto. Solo al termine di quest'ultima operazione il nastro potrà essere ascoltato o sottoposto a sessioni di registrazione.

#### *1.2.3.11 La cottura dei nastri*

Si è già visto come il processo di degenerazione del legante che ricopre il substrato del nastro, sia una delle più importanti cause di degrado di quest'ultimo. Quando il legante, a causa del fenomeno dell'idrolisi, perde la sua integrità, la conseguenza più evidente consiste nell'accumulo di detriti del legante stesso sulla testina del sistema di registrazione, fino a bloccare lo scorrimento del nastro rendendone impossibile la lettura.

Mediante la procedura di cottura del nastro si riesce a ripristinare temporaneamente l'integrità del legante, rendendo possibile la lettura del contenuto del nastro che in questo modo potrà essere riversato su di un nuovo supporto di registrazione. L'operazione di cottura del nastro dovrà avvenire in un forno ad una temperatura compresa tra i 50 e i 55°C per un periodo che, a seconda del livello di degrado raggiunto dal legante, potrà essere di qualche ora fino a più giorni.

È importante sottolineare il fatto che gli effetti del trattamento appena descritto sono in ogni caso temporanei e impongono, entro una o al massimo due settimane dalla sua esecuzione, il riversamento del contenuto del nastro trattato su di un nuovo supporto di registrazione.

## 1.3 Il disco

### *1.3.1 Cenni storici*

Nel 1877 Thomas A. Edison inventò un fonografo cilindrico con il quale fu in grado di registrare i suoni per mezzo della conversione delle vibrazioni dell'aria in un solco scolpito su di un foglio in alluminio che ricopriva un cilindro rotante. Nonostante questo dispositivo dimostrasse la possibilità di registrare e riprodurre il suono, fu ben presto chiara l'impraticabilità della sua produzione e del suo uso su larga scala. Successivi modelli dello stesso fonografo usarono come superfici di registrazione dei cilindri ricoperti con una speciale cera; tutt'oggi molti dei cilindri di cera registrati in quegli anni vengono conservati in archivi pubblici e privati e vengono letti tramite appositi sistemi ottici, al fine di non procurare danni ai supporti.

I cilindri di cera usati da Edison presentavano due fondamentali inconvenienti: erano difficili da riprodurre e da conservare. Nel 1887 Emil Berliner inventò il "disco piatto" che si basava su principi ancora oggi utilizzati. Anche se il disco introdotto da Berliner poteva essere prodotto su larga scala, offriva in ogni caso prestazioni molto scadenti: era rumoroso, il suono presentava una forte distorsione, e assicurava una risposta in frequenza estremamente bassa.

Fino al 1925 tutte le registrazioni vennero effettuate acusticamente. Il suono veniva registrato catturando mediante un corno le variazioni di pressione dell'aria, le quali venivano poi incanalate verso un diaframma montato su una testina di incisione. Il diaframma trasformava le variazioni di pressione dell'aria in movimenti meccanici paralleli della testina di incisione con la quale si realizzava un solco sulla superficie del disco o del cilindro di cera.

Nel 1925 l'uso combinato del primo microfono, inventato dallo stesso Berliner, e del "tubo sottovuoto", rese possibile la conversione del suono in impulsi elettrici. I segnali elettrici, dopo essere stati amplificati, venivano utilizzati per comandare la testina di incisione che andava ad incidere la superficie del disco; questa fu l'innovazione che aprì la strada a tutte le moderne tecniche di registrazione del suono.

Numerose furono le invenzioni che in questo campo si susseguirono negli anni trenta e quaranta. Tra queste risultarono di fondamentale importanza l'introduzione della modulazione multicanale ad opera di Arthur Keller nel 1929, e l'invenzione nel 1931 del riproduttore acustico ai cristalli da parte di Sawyer. Queste e molte altre innovazioni introdotte in quegli anni nel campo della registrazione del suono, fecero ben presto del disco analogico un fenomeno di massa.

### *1.3.2 La registrazione del suono sul disco analogico. Taratura del sistema di lettura*

Il suono può essere definito come una variazione della pressione dell'aria al di sopra e al di sotto di un punto di equilibrio (generalmente la pressione barometrica). Colpendo la membrana acustica di un altoparlante, quest'ultima inizia a vibrare avanti e indietro. Quando la membrana si muove in avanti rispetto alla sua posizione di riposo, la pressione dell'aria circostante aumenta superando quella barometrica. Viceversa,

quando la membrana va indietro rispetto alla sua posizione di equilibrio, la pressione dell'aria diminuisce, diventando inferiore a quella barometrica. Questo movimento oscillatorio della membrana acustica si ripete numerose volte al secondo, creando delle onde di compressione e di decompressione nell'aria circostante. Sono proprio queste onde che, incanalate dall'orecchio verso il timpano provocano la vibrazione di quest'ultimo. In particolare, le vibrazioni del timpano causate dalle variazioni di pressione dell'aria avvengono in sintonia con i movimenti oscillatori della membrana dell'altoparlante che quelle stesse variazioni ha provocato. Per concludere, le vibrazioni del timpano, sollecitando il cervello con impulsi elettrici, inducono la sensazione del suono.

Così come un altoparlante converte una variazione della tensione elettrica ad esso applicata in movimenti meccanici paralleli della membrana acustica presente al suo interno, in maniera analoga la testina di incisione converte la stessa variazione in un movimento meccanico sulla superficie del disco. Quando la tensione applicata sulla testina di incisione aumenta, la testina si muove in una direzione; quando invece la tensione diminuisce, la testina si muove nella direzione opposta. I movimenti della testina sulla superficie del disco determinano l'incisione su quest'ultima di un solco. Trattandosi inoltre di movimenti che risultano sincronizzati con quelli della membrana acustica dell'altoparlante, l'incisione che ne deriva appare essere l'immagine fisica dei movimenti oscillatori di tale membrana.

Per estrarre le informazioni contenute in un disco analogico si utilizza ancora una testina, in questo caso di lettura, che segue i solchi presenti sulla superficie del disco. Il riproduttore acustico sul quale è montata la testina, converte i movimenti di quest'ultima in una tensione elettrica che, dopo essere stata amplificata, viene inviata ad un altoparlante. Quest'ultimo, come già detto, convertirà le variazioni della tensione applicata al suo ingresso in movimenti meccanici paralleli della membrana acustica presente al suo interno. I movimenti della membrana acustica dell'altoparlante risulteranno essere paralleli a quelli della testina di lettura che segue il solco inciso sulla superficie del disco.

Più in particolare, nel disco l'informazione audio è trascritta mediante l'incisione di un solco con un bulino comandato da due bobine (controllate in tensione dal segnale audio): i due tipi di movimento possibile (a-a e b-b nella figura 1.13) corrispondono all'incisione del canale destro e del canale sinistro sui due lati del solco (nei dischi stereo).

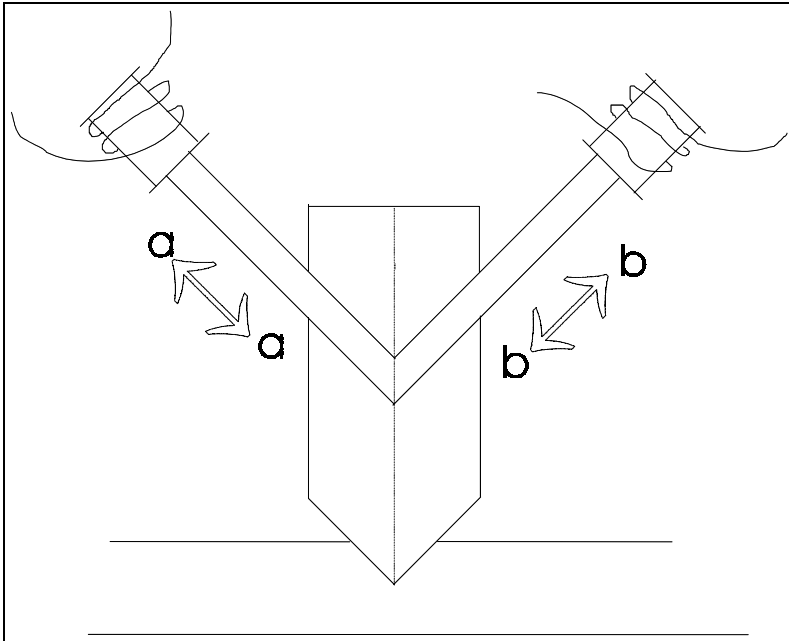


Fig. 1.14: Incisione del solco di un disco stereo.

I dischi sono solitamente costituiti di due materiali, i più antiquati in ebanite, i più moderni in vinile. Le cause più macroscopiche di degrado dei dischi sono legate alla natura granulosa di questi materiali; specialmente l'ebanite, in presenza di un graffio, perde compattezza e nel tempo è soggetta ad uno sfarinamento naturale. L'erosione per attrito del solco evidenzia l'effetto della granulosità: il rumore di fondo che si produce è costituito da una grande densità di piccoli impulsi estremamente ravvicinati; la dimensione e la vicinanza di questi impulsi fanno sì che il tipico rumore "friggente" dei dischi sia assimilabile più ad un rumore di fondo che ad un rumore impulsivo, anche perché si tratta comunque di un tipo di degrado globale e, in generale, stazionario.

Viceversa l'effetto dei graffi è locale e si manifesta come un impulso avente un forte attacco e un successivo smorzamento meccanico. La fase di attacco brusco è tale che il segnale sottostante può considerarsi perso, mentre nella fase di smorzamento è possibile applicare un modello additivo segnale + rumore, con un trattamento analogo a quello del rumore di fondo (figura 1.15), come sarà dettagliatamente illustrato in seguito.

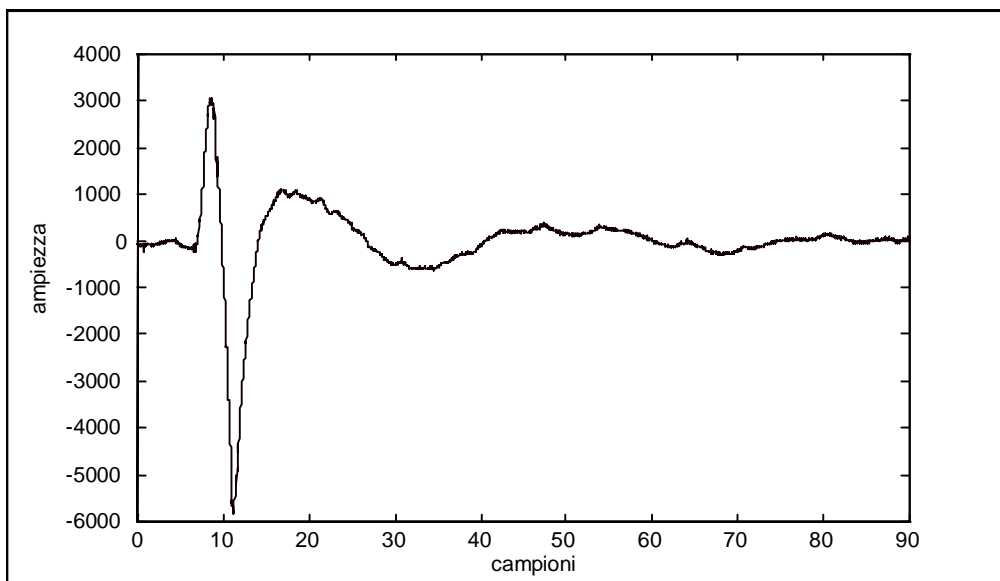


Fig. 1.15: Il grafico illustra l'andamento temporale del suono causato da un graffio presente sulla superficie di un disco.

Alcuni rumori possono essere evitati assicurando le condizioni ottimali di riproduzione: il più importante di questi è senz'altro il *rumble*, dovuto alle vibrazioni del motore trasmesse al piatto e al braccio. La misura del *rumble* si effettua con un disco di prova in cui è inciso un segnale sinusoidale a 1000 Hz seguito da silenzio: il rapporto tra il livello delle tensioni di uscita del *rumble* sommato al segnale e del *rumble* "puro" fornisce un rapporto tra *rumble* e segnale che secondo le norme DIN deve essere inferiore a  $-35$  dB.

Un secondo problema in riproduzione è causato dall'errore di tangenza, dovuto al fatto che in fase d'incisione il bulino è sempre in posizione tangente al solco (figura 1.16). In riproduzione, al contrario, il braccio si sposta secondo l'arco *ASO* (v. figura 1.17), per cui l'asse del braccio non è tangente al solco: infatti la retta *a* passante per *C* forma con la tangente *b* al solco (passante per *S*) un angolo  $\vartheta$ .

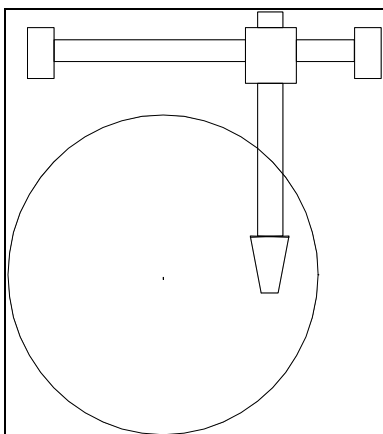


Fig. 1.16: Fase d'incisione di un disco. Il bulino è sempre in posizione tangente al solco incisione.

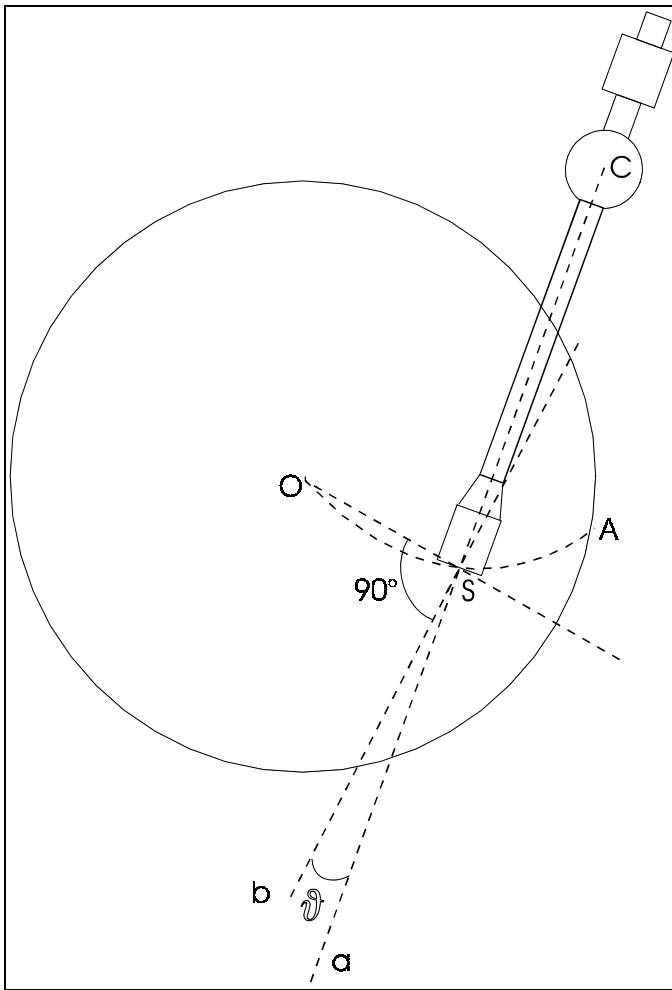


Fig. 1.17: Errore di tangenza. L'asse del braccio non è tangente al solco.

Questo errore causa una distorsione proporzionale a  $\vartheta$  ed alla velocità con cui è stato registrato il segnale, e inversamente proporzionale alla velocità di lettura, perciò la distorsione è maggiore (fin oltre il 5%) quanto più ci si avvicina al centro del disco.

L'errore di tangenza si corregge utilizzando bracci articolati che riducono la distorsione a livelli molto bassi, ma che, dovendo sfruttare l'attrito con il solco per orientarsi, non offrono buone prestazioni dal punto di vista della sensibilità (fig. 1.18).

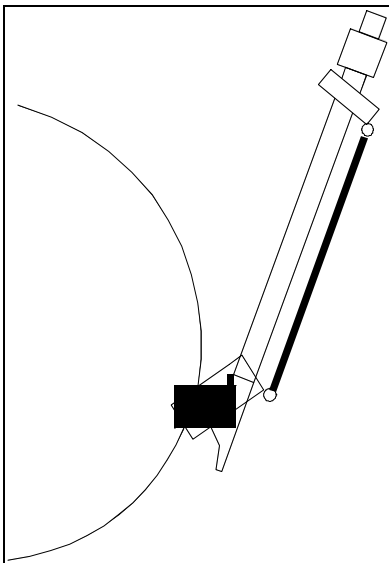


Fig. 1.18: Braccio articolato per la correzione dell'errore di tangenza.

Una soluzione più efficace, ma meno utilizzata, è quella di usare per la riproduzione un dispositivo tangenziale simile a quello utilizzato per l'incisione. In questo caso l'avanzamento del braccio è comandato passo-passo dal movimento del piatto.

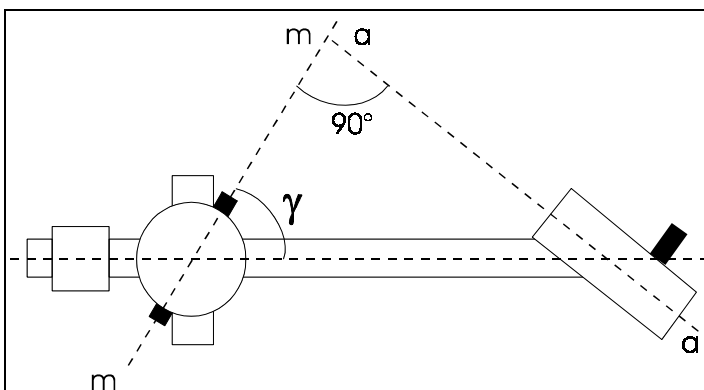


Fig. 1.19: Direzione della puntina.

E' comunque sempre necessario assicurare la perpendicolarità della puntina alla superficie del disco, il che richiede la regolazione di un apposito comando che consente di porre l'asse di rotazione orizzontale, indicato in figura 1.19 come m-m, inclinato rispetto all'asse del braccio, in modo da essere perpendicolare al piano di simmetria della testina a-a.

Ulteriori importanti regolazioni sono quelle dei contrappesi. Il primo problema da risolvere è quello di adattare il peso di lettura alle caratteristiche della testina utilizzata: in genere le testine richiedono valori dagli 1,2 ai 5 grammi; l'equilibratura va fatta sostituendo alla testina un peso equivalente e agendo sul contrappeso e su una regolazione fine, generalmente a molla. Il secondo problema è quello di bilanciare lateralmente il braccio, che, avendo una forma curva per ridurre l'errore di tangenza, si trova ad avere il baricentro spostato rispetto all'asse e tende così a ruotare verso il



centro del piatto. Questo bilanciamento si ottiene con un contrappeso, oppure dando al braccio un profilo autobilanciato (purché la testina abbia un peso compreso entro determinati limiti).

Vi è un ultimo problema che è causa di una alterazione permanente della riproduzione, si tratta dello “skating”, o forza centripeta. Questa forza tende a muovere il braccio verso il centro del disco caricando maggiormente la parete interna del solco rispetto alla parete esterna. I dispositivi di lettura più sofisticati sono dotati di sistemi antiskating che si regolano semplicemente poggiando la puntina su un disco in rotazione privo di solchi e compensando fino ad eliminare la traslazione del braccio verso l'interno. L'uso del disco con giradischi privi di questa compensazione provoca un degrado permanente di un canale rispetto all'altro, situazione tipica di cui bisogna tenere conto in sede di restauro.

### *1.3.3 Le cause di degrado del disco analogico*

L'aspettativa di vita di un prodotto realizzato in materiale plastico è fortemente caratterizzata dal suo processo di fabbricazione. La quantità di resine utilizzata, i tipi di materiali miscelati a queste ultime per alterarne le proprietà, la laminazione o meno di materiali con proprietà diverse tra loro ed il processo stesso di fabbricazione, sono tutti aspetti che incidono fortemente sulla durata del prodotto plastico finito.

Altri elementi che determinano l'aspettativa di vita di un prodotto plastico sono i fattori ambientali in cui quest'ultimo viene a trovarsi una volta terminato il suo processo di fabbricazione; si parla in questo caso delle condizioni in cui viene conservato, della temperatura e dell'umidità presente negli ambienti adibiti a tale scopo e, non meno importante, della cura con cui viene manipolato.

I materiali plastici possono essere suddivisi in due classi principali: i prodotti termoplastici e quelli termoindurenti. Entrambi quando vengono riscaldati per la prima volta si ammorbidiscono fino a fondere e quindi entrambi vengono normalmente sagomati ad alte temperature ed elevate pressioni. Ma mentre i primi, se vengono nuovamente riscaldati, si ammorbidiscono esattamente come la prima volta, nei prodotti termoindurenti, in fase di sagomatura, quando vengono riscaldati per la prima volta, interviene una reazione chimica che comporta la loro carbonizzazione se li si riporta successivamente ad alte temperature.

Nel corso degli anni sono stati usati diversi materiali per realizzare i dischi analogici da impiegare come supporti di registrazione, e molti di questi materiali presentano proprietà spiccatamente diverse tra di loro. Mentre alcuni, ad esempio gli LP, sono stati prodotti ricorrendo al vinile che è un materiale termoplastico, per altri si è fatto uso di plastiche termoindurenti, con tutte le conseguenze che ne derivano per quanto riguarda le loro possibili cause di degrado e le precauzioni che è preferibile adottare per prolungarne la vita. Non ha quindi senso affrontare l'analisi delle cause di deterioramento e dei metodi di conservazione dei dischi analogici, senza metterle in relazione ai diversi tipi di dischi che nel corso degli anni sono stati prodotti.

**I cilindri in cera.** I cilindri in cera sono stati il primo supporto sul quale sia stato sperimentato con successo la registrazione e la riproduzione del suono, nel 1877 ad opera di Thomas Edison. I primi cilindri utilizzati a tale scopo erano ricoperti con un sottile foglio di stagnola, successivamente si passò all'uso della cera e quindi a quello

della celluloidi. I cilindri vennero utilizzati come supporti di registrazione fino alla seconda metà degli anni venti.

I cilindri, come tutti i primi tipi di dischi, venivano registrati acusticamente. Il suono veniva raccolto mediante un corno e da questo incanalato verso una membrana posizionata sull'uscita più stretta del corno stesso. La membrana era a sua volta attaccata ad una testina di incisione e le sue vibrazioni provocavano dei movimenti paralleli della testina sulla superficie del cilindro. Si otteneva così la trasformazione del suono catturato dal corno, in una incisione della superficie del cilindro praticata dalla testina. Quest'ultima nel corso degli anni venne realizzata con svariati materiali che andarono dalle pietre preziose all'acciaio, fino all'uso delle spine di cactus.

Dopo la rottura e lo scioglimento, il principale nemico dei cilindri in cera è sicuramente la muffa. Quest'ultima fiorisce nei luoghi caldi e umidi e si nutre della materia organica morta, trovando quindi nella cera che ricopre i cilindri un ottimo posto dove attecchire e svilupparsi. Fino ad oggi sono state analizzate più di 50.000 specie di muffe le cui spore vengono normalmente trasportate dall'aria. Le spore delle muffe trovano un ottimo mezzo di trasmissione anche nei polpastrelli delle mani, dove si accumula regolarmente il grasso corporeo; il passaggio dalle mani alla superficie in cera dei cilindri diventa inevitabile quando questi ultimi vengono manipolati senza le dovute cautele. La muffa che si sviluppa sulla superficie dei cilindri in cera si manifesta con la comparsa di macchie bianco-grigie e, nutrendosi della stessa cera che ricopre il cilindro, ne provoca la progressiva distruzione con la conseguente perdita delle informazioni in precedenza registrate.

Presso la Libreria del Congresso di Washington sono conservati circa 50.000 dei 300.000 cilindri (soprattutto di cera e di celluloidi) sopravvissuti fino ai giorni nostri: si tratta della più vasta collezione esistente al mondo. A causa della loro fragilità, i cilindri ancora esistenti devono essere conservati con estrema cautela e manipolati solo per copiarne il contenuto, il quale, altrimenti, considerata l'alta deperibilità del supporto, rischierebbe di andare perduto per sempre.

**I dischi in ebanite.** L'ebanite, una gomma particolarmente dura ed elastica, fu il primo materiale usato da Emil Berliner nel 1887 quando ideò i primi dischi piatti (fino ad allora le registrazioni venivano effettuate sui cilindri di cera).

Nel 1839 Hancock in Inghilterra e la Goodyear negli Stati Uniti avevano contemporaneamente inventato la vulcanizzazione, il processo con cui il caucciù viene trattato con lo zolfo o con dei composti solforati in varie proporzioni e a differenti temperature. Si riesce in questo modo ad ottenere un prodotto che presenta una maggiore forza ed elasticità rispetto al caucciù di partenza, e che prende appunto il nome di ebanite.

L'ebanite è un materiale che, non esposto alla luce, conserva buone doti di stabilità mantenendo inalterate le sue proprietà e il suo aspetto lucente. Al contrario, lo stesso materiale diventa fragile e opaco se viene esposto alla luce o al calore, in seguito alla perdita dello zolfo con cui è stato miscelato il caucciù durante il processo di vulcanizzazione. La luce infatti provoca l'ossidazione del caucciù e, in presenza di umidità, comporta l'emissione di ossidi dello zolfo e di acido solforico. Questi ultimi, raggiunto un livello di acidità sufficientemente elevato, provocano la decomposizione del materiale che costituisce il disco. Le conseguenze di questo degrado diventano

evidenti: cercando di ascoltare un disco affetto da tali problemi, la sua superficie viene letteralmente raschiata via dalla testina di lettura del fonografo.

L'uso dell'ebanite comportava seri problemi anche in fase di produzione dei dischi. A causa delle irregolari contrazioni del materiale che si verificano durante la fase di raffreddamento, possono formarsi serie deformazioni del supporto e la comparsa di bolle dovute al gas rimasto racchiuso al suo interno.

**I dischi in gommalacca.** I primi dischi in gommalacca fecero la loro comparsa a partire dai primi anni del 1900. La gommalacca è una resina prodotta da certi alberi asiatici in seguito alla puntura di un particolare insetto. Questa resina, una volta raschiata via dal tronco e dai rami degli alberi, veniva impiegata come legante nella produzione di plastiche artificiali, come ad esempio l'acetato di cloruro di vinile, che rappresentarono per un certo numero di anni la materia maggiormente utilizzata dai produttori di dischi.

**I dischi in gommalacca Columbia.** Questi dischi vennero prodotti dalla Columbia a partire dal 1906, e furono i primi dischi ad essere realizzati adottando un processo di laminazione. La tecnica impiegata per la loro fabbricazione prevedeva infatti l'uso di una base in carta, accuratamente deumidificata, sulla quale veniva steso un sottile ed uniforme strato di gommalacca polverizzata. Il tutto veniva poi cotto in un forno in modo tale che lo strato di polvere si fondesse con la base di carta. Per i dischi a due facce veniva ripetuta la medesima operazione sull'altro lato della base. Il vantaggio derivante da questa tecnica di fabbricazione consisteva nel fatto che la quantità di materiale superficiale indispensabile per poter poi realizzare il solco dell'incisione sulla facciata del disco si riduceva drasticamente. Il fatto di poterne diminuire la quantità, consentì ai produttori di dischi di aumentarne la qualità, adottando le migliori plastiche in quel momento disponibili sul mercato.

Nel 1922 la Columbia, pur rimanendo fedele alla tecnica della laminazione, modificò parzialmente il processo di fabbricazione dei suoi dischi. Lo strato uniforme di gommalacca polverizzata veniva steso tra due dischi di carta, e i tre strati così ottenuti (carta-gommalacca-carta) venivano fusi assieme all'interno di un forno.

Individuare le cause di degrado dei dischi in gommalacca risulta particolarmente difficile per la notevole diversità delle plastiche derivanti da questo materiale, utilizzate per produrre i dischi in quegli anni. La percentuale di gommalacca effettivamente presente in questo tipo di dischi risulta non superiore al 20%, mentre il restante 80% è costituito da una miscela di elementi che vanno dalla cellulosa a particolari tipi di minerali. Si comprende quindi come le proprietà fisiche del disco dipendano più dalle caratteristiche di questi elementi che da quelle della gommalacca in esso presente.

In ogni modo, se conservati in condizioni opportune, i dischi realizzati con l'impiego della gommalacca risultano relativamente stabili. Il processo di vulcanizzazione al quale viene sottoposta la gommalacca durante la realizzazione del disco genera una reazione chimica che comporta l'eliminazione delle molecole d'acqua e di ammoniaca presenti nel materiale. Questo fenomeno provoca il restringimento della gommalacca, rendendola più densa ma anche più fragile. Purtroppo il processo di condensazione della gommalacca prosegue, anche se in maniera molto più lenta, anche dopo che la fabbricazione del disco è terminata. La velocità di tale fenomeno dipende

sostanzialmente dalla temperatura e dall'umidità presenti nell'ambiente in cui il disco viene conservato.

Questo tipo di dischi soffrono comunque di un lento ma progressivo aumento della fragilità della gommalacca presente al loro interno; tale processo, purtroppo inesorabile, si manifesta con il rilascio da parte del disco di una polvere finissima ad ogni passaggio della testina di lettura sulla sua superficie.

**I dischi *Edison-Diamond*.** I dischi Edison-Diamond, prodotti tra la prima e la seconda guerra mondiale, furono i primi ad essere realizzati utilizzando una plastica completamente sintetica, in particolare un materiale chiamato fenolo. Si tratta di dischi laminati, nei quali entrambi i lati di una spessa e compatta base interna venivano ricoperti da un sottile strato di vernice. La base si ricavava dalla compressione dei seguenti elementi utilizzati nelle proporzioni indicate: farina di legno (58%), alcool etilico modificato (26%), bakelite (fenol-formaldeide) (15%) e nerofumo (1%). La vernice invece, era composta da: alcool etilico modificato (55%), bakelite (38%) e altri elementi meno importanti (7%).

La vernice veniva stesa con un pennello sulla base del disco mentre quest'ultimo girava lentamente. Su entrambe le facce della base venivano in questo modo effettuate quattro applicazioni di vernice, separate tra loro da opportuni intervalli di tempo per consentire alla vernice appena stesa di asciugarsi. Dopo l'ultima applicazione il disco veniva inserito in un forno a vapore per la cottura finale. All'interno del forno il disco veniva riscaldato e pressato, fino a portare a termine l'essiccazione della vernice ed ottenere la completa reazione degli elementi in essa contenuti.

In generale il fenolo è un materiale molto stabile e non presenta particolari problemi di decomposizione. Risulta inoltre immune dall'attacco di funghi e batteri. Nonostante ciò, in presenza di un'elevata umidità la superficie dei dischi realizzati con questo tipo di materiale plastico può essere attaccata dalla muffa che trova nel legno presente all'interno del disco e nella polvere che si deposita sulla sua superficie, un ottimo nutriente.

**I dischi in acetato.** Prima dell'avvento dei nastri magnetici, le registrazioni sonore venivano realizzate quasi esclusivamente su dischi in acetato. Di conseguenza, la preparazione chimica di questi ultimi doveva essere un compromesso tra una facile incisione e una buona qualità della registrazione risultante.

A partire dagli anni trenta, la maggior parte dei dischi in acetato venne realizzata con una base di alluminio rivestita su entrambi i lati da uno strato di acetato di nitrocellulosa che veniva plastificato con dell'olio di ricino. Le principali varianti a questo metodo di fabbricazione si registrarono durante la seconda guerra mondiale, quando la base dei dischi anziché in alluminio veniva realizzata in vetro per le applicazioni professionali, e in cartone per quelle commerciali destinate all'uso di massa.

In ogni caso, indipendentemente dal materiale impiegato per realizzarne la base, a causa delle proprietà intrinseche del rivestimento di quest'ultima, i dischi in acetato risultano essere il tipo di supporto più instabile mai utilizzato per la registrazione analogica dei suoni. La continua e purtroppo inarrestabile perdita dell'olio plastificante di ricino che impregna il rivestimento, ne provoca la graduale disgregazione. Inoltre, l'acetato di nitrocellulosa è soggetto ad una progressiva decomposizione, e nel tempo

tende a reagire con il vapore acqueo e con l'ossigeno. Il prodotto di queste reazioni idrolitiche sono degli acidi (tra i quali l'acido palmitico che si manifesta con delle macchie oleose di colore bianco sulla superficie del disco) che agiscono da catalizzatori per numerose altre reazioni chimiche. Le conseguenze sul rivestimento del disco di questi processi degenerativi, consistono nella sua progressiva disgregazione e nel suo distacco dalla base in alluminio del disco stesso, con la conseguente perdita delle informazioni in esso contenute.

Attualmente si stimano sull'ordine dei tre milioni il numero di dischi in acetato ancora esistenti, molti dei quali rappresentano copie uniche di materiale mai fatto oggetto di riversamento.

**I dischi in vinile.** Il vinile si è fino ad ora dimostrato il più stabile tra tutti i materiali utilizzati nella produzione di supporti per la registrazione analogica dei suoni (nastri magnetici compresi).

I dischi in vinile sono composti da cloruro di polivinile (PVC da polyvinyl chloride) e da una piccola percentuale (meno del 25%) di elementi secondari quali stabilizzatori, coloranti e sostanze antistatiche. Per assicurare all'impasto risultante le proprietà plastiche necessarie, si effettua una copolimerizzazione dell'acetato di vinile con il cloruro di vinile ottenendo in questo modo il prodotto finale desiderato.

Il cloruro di polivinile è soggetto a fenomeni degenerativi quando viene esposto alla luce ultravioletta o a sbalzi di temperatura. Se un disco in vinile viene sottoposto a rapide variazioni di temperatura, il PVC che lo compone risente di un irreversibile processo di degrado termico, rilasciando dell'acido idroclorico (HCl). Questo è il motivo per cui in fase di produzione dei dischi, al cloruro di polivinile, vengono aggiunti degli stabilizzatori chimici. Questi, anche se non consentono di prevenirne il degrado, permettono comunque di tenerlo sotto controllo consumando l'acido idroclorico a mano a mano che viene rilasciato.

I dischi in vinile si sono diffusi a partire dalla fine della seconda guerra mondiale (durante il programma V-disc) essenzialmente in due formati: il 33 giri, indicato spesso con la sigla LP (dall'inglese *Long Playing*) e il 45 giri (il 78 giri cessò definitivamente di essere prodotto nel 1955). Si stima che attualmente i dischi in vinile conservati negli archivi sonori e nelle librerie musicali pubbliche e private siano più di 30 milioni.

#### ***1.3.4 La preservazione dei dischi analogici***

Il problema di preservare i dischi analogici esiste fin da quando Thomas A. Edison realizzò nel 1877 la prima registrazione sonora mediante il suo fonografo cilindrico. Polvere, umidità, alte temperature, ossidazione, funghi e la non corretta manipolazione, sono le principali cause di deterioramento dei dischi analogici.

Le precauzioni da adottare allo scopo di preservare un disco analogico sono le stesse già viste per i nastri magnetici e possono essere riassunte nelle seguenti tre regole generali:

- Proteggere il disco dal deposito di sostanze esterne.
- Evitare ogni pressione sul disco che ne possa causare la deformazione.
- Conservare il disco in un ambiente stabile e controllato.

Nei prossimi tre paragrafi, prendendo spunto da tali regole, verranno elencati una serie di suggerimenti che consentono di evitare, o, meglio, rallentare, buona parte dei processi di degrado che normalmente interessano i dischi analogici.

Alcuni di tali suggerimenti risultano uguali a quelli già indicati nel precedente capitolo, in cui lo stesso argomento veniva trattato per i nastri magnetici. La cosa non deve stupire in quanto sia per i dischi analogici che per i nastri magnetici, il rispetto delle tre regole sopra indicate risulta essere la più importante precauzione da adottare allo scopo di prolungarne la vita.

#### *1.3.4.1 Deposito di sostanze esterne sul disco*

La polvere è abrasiva e combinata con la pressione esercitata sulla superficie del disco dalla testina del fonografo, può danneggiare permanentemente il solco inciso sulla facciata del disco stesso. La polvere può inoltre essere assorbita dai materiali termoplastici contenuti nel disco. Poiché solo la punta della testina di lettura viene a contatto con le pareti del solco inciso sul disco, ciò comporta che una pressione di solo un grammo e mezzo esercitata della testina su una così piccola superficie, equivale ad una pressione di diverse tonnellate per centimetro quadrato. Al passaggio della testina nel solco del disco, quindi, si crea nel punto di contatto tra i due un calore, dovuto all'attrito, talmente elevato da provocare il parziale scioglimento del materiale termoplastico circostante. In questo modo la polvere depositatasi sulla superficie del disco può venire assorbita dal materiale plastico prima che quest'ultimo si solidifichi nuovamente. Si comprende quindi l'importanza di minimizzare il deposito di impurità sulla superficie dei dischi analogici, e a questo scopo si suggerisce di adottare i seguenti accorgimenti:

- Mai toccare con le dita la superficie incisa del disco. Se quest'ultimo necessita di essere manipolato, utilizzare a tale scopo dei guanti bianchi di cotone, necessariamente puliti, cercando di toccare solo il bordo laterale e l'etichetta centrale del disco.
- I cilindri devono essere manipolati inserendo il dito medio e quello indice di ciascuna mano nelle due aperture opposte del buco centrale. Evitare assolutamente di toccare con le dita la superficie incisa dei cilindri in cera; oltre ad essere facilmente attaccabile dalla muffa, quest'ultima risulta essere molto sensibile al calore, e quello delle dita può essere sufficiente a provocarne lo scioglimento.
- Quando il disco non viene usato deve sempre essere inserito all'interno della sua copertina, con la quale deve essere riposto all'interno di un contenitore sigillato.
- Le copertine destinate a contenere i dischi non devono essere né di carta né di cartone. E' preferibile in particolare utilizzare buste in polietilene.
- Mai avvicinare il supporto di registrazione a possibili fonti di polvere, quali la carta e il cartone.
- E' importante mantenere puliti gli ambienti in cui i dischi e i cilindri vengono conservati e manipolati; evitare quindi di consumare cibi e bevande in tali aree.
- Realizzare i pavimenti in materiali antistatici che risultino facilmente lavabili; evitare quindi l'uso di moquette e di tappeti.
- Curare molto la pulizia delle attrezzature usate nella conservazione e nell'impiego dei supporti di registrazione.
- Eventuali sistemi di condizionamento dell'aria dovranno essere equipaggiati con filtri antipolvere di maglia sufficientemente fine (0.3mm risulta una misura

ragionevole).

- Sui contenitori, evitare l'impiego di etichette che possano danneggiarli; è preferibile usare inchiostri neutri.

- Prima di essere ascoltati i dischi devono sempre essere accuratamente puliti.

- Poiché la polvere depositatasi sulla superficie del disco viene trattenuta dalla carica elettrostatica presente su di essa, spesso effettuare la pulizia del supporto in modo inadeguato risulta inutile se non addirittura dannoso. Per la pulizia dei dischi analogici si raccomanda l'uso di una soffice spazzola di velluto o, nei casi particolarmente gravi, di procedere al loro lavaggio con acqua distillata. L'acqua distillata, infatti, presenta gli indubbi vantaggi di non lasciare alcun residuo sulla superficie del disco una volta asciugatasi, di disperdere il carico elettrostatico eventualmente presente, e di essere poco costosa.

Un altro modo per eliminare le sostanze esterne depositatesi sulla superficie dei dischi consiste nel farli girare su di un fonografo sul cui braccio sia montata, più esternamente rispetto alla testina di lettura, una spazzola in grado di raccogliere la polvere. Scivolando sulla superficie del disco la spazzola, isolata elettricamente, produce su se stessa un carico elettrostatico che le consente di raccogliere e di trattenere la polvere che di volta in volta incontra. Si riesce in questo modo ad ottenere un duplice risultato: la pulizia del disco e la lettura dello stesso con una testina che rimane a sua volta pulita, in quanto scivola su dei solchi già liberati dalla polvere che in essi si era accumulata. Nel caso si decida di adottare questo tipo di soluzione, è comunque necessario assicurarsi che la testina di lettura sia perfettamente bilanciata. Si corre infatti il rischio che quest'ultima venga sbilanciata dalla spazzola montata sul braccio del fonografo, causando da un lato il peggioramento della qualità del suono riprodotto, e dall'altro il possibile danneggiamento, da parte della stessa testina di lettura, dei solchi incisi sulla superficie del disco.

Attualmente lo strumento più efficace impiegabile nella pulizia dei dischi consiste in una apparecchiatura realizzata in Inghilterra dalla Keith Monks Ltd.: si tratta di un giradischi dotato di due bracci, che sfrutta un principio simile a quello appena descritto. All'estremità del braccio utilizzato per primo vengono montate una speciale spazzola e un distributore di liquido che dispensa una miscela di alcool e acqua distillata sulla superficie del disco. La loro azione combinata consente di staccare dalla superficie del disco i corpi estranei, i quali rimangono sospesi nel liquido detergente. Successivamente mediante l'uso di un aspiratore il cui boccaglio è montato all'estremità del secondo braccio, si provvede ad asportare il liquido e il materiale in esso sospeso.

Il mercato offre diversi tipi di liquidi detergenti, spazzole, spray, e speciali apparecchiature per la pulizia dei dischi. La loro efficacia dipende molto da come vengono usati e su che tipo di materiali vengono impiegati. In ogni caso è indispensabile, prima di utilizzare un qualunque prodotto, leggere attentamente le istruzioni fornite dal produttore ed effettuare comunque delle prove su un certo numero di dischi campioni, prima di impiegarlo sull'intero archivio.

E' importante rammentare che l'uso eccessivo di sostanze detergenti risulta spesso dannoso per il disco e, soprattutto, per la testina di lettura del fonografo. L'accumulo di sostanze pulenti o antistatiche su quest'ultima comporta un abbassamento delle prestazioni del sistema di riproduzione ed è per questo che la sua pulizia risulta non meno importante di quella dei dischi.

- Un disco lavato deve essere perfettamente asciutto prima di poter essere nuovamente immagazzinato. Riporre il disco nella sua busta quando questo è ancora umido, comporterebbe la comparsa di muffa sulla sua superficie.

- I dischi in acetato che presentano depositi di acido palmitico (si osservano in questo caso sulla superficie del disco accumuli di sostanza grassa di colore bianco) devono essere puliti aggiungendo dell'ammoniaca (1 parte di ammoniaca ogni 100 parti di liquido detergente) al liquido normalmente utilizzato per pulire i dischi.

- Non usare mai ammoniaca, alcool o miscele liquide che li contengono, per pulire i dischi in gommalacca.

#### *1.3.4.2 Deformazione del disco*

Poiché sulla superficie del disco analogico sono conservate le informazioni in esso registrate, diventa di fondamentale importanza proteggere il supporto da qualunque deformazione fisica.

Con l'obiettivo di minimizzare le possibili cause di deformazione di un disco, si suggerisce di adottare i seguenti accorgimenti:

- Mai avvicinare i dischi e i cilindri a sorgenti di calore o di luce, specie se di luce ultravioletta.

- I dischi non vanno riposti né orizzontalmente, né, peggio, uno sopra l'altro; la posizione migliore è quella verticale, con i dischi affiancati tra loro.

- Non riporre in posizioni adiacenti tra loro dischi di diverse dimensioni; i più piccoli possono andare persi o danneggiati, mentre quelli di diametro maggiore possono risentire della disomogeneità di pressione esercitata su di essi.

- I cilindri devono essere conservati in posizione verticale.

- Evitare di appoggiare qualunque tipo di oggetto sopra i dischi.

#### *1.3.4.3 Condizioni ambientali*

Un ambiente appropriato per la conservazione dei dischi e dei cilindri risulta un elemento essenziale per ritardarne i meccanismi di degrado. Elevate temperature e umidità possono dare il via a pericolose reazioni chimiche e in ogni caso favoriscono la crescita dei funghi. Risulta quindi di fondamentale importanza attenersi il più possibile alle seguenti raccomandazioni:

- Conservare i dischi in ambienti in cui la temperatura si mantenga sempre tra i 15 e i 20°C.

- La temperatura deve essere il più costante possibile, e in ogni caso sono assolutamente da evitare escursioni termiche superiori ai 2°C nell'arco di 24 ore.

- Nei locali destinati ad accogliere i dischi, l'umidità relativa deve essere sempre compresa tra il 20 e il 40%

- Come la temperatura, anche l'umidità deve rimanere il più stabile possibile. In questo senso, diventano inaccettabili variazioni dell'umidità relativa superiori al 5% in un periodo di 24 ore.

- Mantenere in ogni istante un'appropriata ventilazione e circolazione d'aria nei locali in cui i dischi e i cilindri vengono conservati, così da rendere la temperatura e l'umidità relativa uniformi in ogni loro punto.

- Per far sì che la temperatura e l'umidità soddisfino le specifiche indicate nei punti precedenti, diventa indispensabile l'uso di un sistema automatico di condizionamento dell'aria nei locali adibiti alla conservazione dei dischi. Se ciò non



fosse possibile, un'elevata umidità può essere abbassata mediante l'uso di deumidificatori elettrici. Questi ultimi devono utilizzare delle sostanze essiccanti inerti, come ad esempio del gel di silice chimicamente pura. Sia i condizionatori d'aria che i deumidificatori elettrici, dovranno in ogni caso essere dotati di filtri antipolvere.

- Non immagazzinare i supporti in locali che possono subire allagamenti, ed eliminare da tali ambienti qualunque materiale facilmente infiammabile, come carta, legno o cartone. In questo senso si raccomanda di realizzare in acciaio gli scaffali destinati ad accogliere i dischi.

- I dischi e i cilindri che non devono essere consultati, è opportuno vengano riposti in contenitori robusti e che non lascino filtrare la luce. Questi devono essere sigillabili e a tenuta d'aria.

- Per quanto riguarda l'impianto di illuminazione dei locali, si raccomanda l'uso di tubi fluorescenti che non producano radiazioni ultraviolette per una quantità superiore a 75  $\mu\text{w}/\text{lm}$  (microwatt per lumen).

- Mai avvicinare i dischi e i cilindri a sorgenti di calore ed evitare di esporli alla luce diretta del sole.

- Ogni cinque anni devono essere effettuate delle ispezioni su dei campioni di dischi che rappresentino l'intero archivio. Se in questo arco di tempo si verificano delle situazioni particolari (brusche variazioni dell'umidità relativa, forti sbalzi di temperatura, ecc.) nei locali adibiti alla loro conservazione, tali ispezioni dovranno avvenire ad intervalli più frequenti. Di ciascun disco scelto per l'ispezione si dovrà controllare la qualità del segnale in esso registrato, eventuali distorsioni fisiche, e la presenza di processi di deterioramento in atto che possono riguardare il disco, la cassetta che lo contiene, il contenitore, nonché le etichette applicate su di essi. Se durante l'ispezione si rilevano dei dischi interessati da processi di deterioramento, questi dovranno essere immediatamente separati dai supporti "sani" per poi essere sottoposti alle cure del caso. I dischi sui quali vengono rilevati accumuli di polvere dovranno essere opportunamente puliti prima di venire nuovamente immagazzinati.

## 1.4 Compact Disc Audio

L'introduzione del formato digitale ha comportato una svolta decisiva nel campo della memorizzazione dei segnali audio. Sessanta minuti di segnale stereofonico, digitalizzati con 16 bit per canale e con una frequenza di campionamento di 44.1 kHz, generano più di 5 miliardi di bit. Se si vuole registrarli, ad essi bisogna aggiungere i bit di correzione di errore, i bit di sincronizzazione e quelli di modulazione, portando così la capacità totale del supporto di registrazione destinato ad accoglierli ad oltre 15 miliardi di bit. Se il supporto è destinato ad un uso commerciale, oltre a possedere la capacità indicata, dovrà consentire l'accesso casuale ai dati in esso contenuti, essere di piccole dimensioni, pratico nell'uso, durevole nel tempo, facile da riprodurre ed acquistabile ad un costo contenuto.

I CD-A sono stati sviluppati per soddisfare le caratteristiche sopra indicate. In un compact disc audio più di un'ora di musica stereofonica viene memorizzata su di un supporto robusto ed economico e con il sistema di lettura per esso sviluppato diventa possibile accedere ad uno qualunque dei brani in esso registrati in meno di un secondo di tempo.

Il declino dei dischi analogici osservato durante gli anni 80, non è quindi imputabile a delle carenze dell'LP, ma ai numerosi ed importanti vantaggi offerti dai CD-A. In più, la stessa tecnologia utilizzata sui CD-A è stata poi utilizzata in numerose altre applicazioni, non necessariamente di tipo sonoro. Per esempio, un disco CD-I (dove I sta per *Interactive*) può contenere più ore di musica assieme a numerose immagini e testi.

In questo paragrafo, dopo un breve commento sul passaggio dal formato analogico a quello digitale, si approfondiranno le caratteristiche dei compact disc audio e della tecnologia su cui essi si basano. Si descriveranno quindi le loro possibili cause di degrado, per concludere esponendo le soluzioni e gli accorgimenti che consentono di prolungarne la vita.

### 1.4.1 Dall'analogico al digitale

In una registrazione analogica il segnale memorizzato sul nastro magnetico o sul disco analogico, rappresenta con continuità il segnale audio originariamente catturato attraverso il microfono. L'ampiezza di tale segnale risulta essere direttamente legato alla forza del segnale magnetico registrato sul nastro o alla profondità dei solchi incisi sul disco. In una registrazione digitale, al contrario, il segnale audio originale viene *catturato* (campionato) ad intervalli regolari di tempo (11.025, 22.05, 44.1, 48, 192 kHz sono le frequenze di campionamento attualmente impiegate nelle applicazioni digitali) e i campioni di segnale così ricavati vengono convertiti in altrettanti numeri binari correlati all'intensità del segnale di partenza negli istanti in cui è stato campionato. I numeri binari così ricavati vengono infine memorizzati sul supporto di registrazione sotto forma di impulsi. In fase di lettura dello stesso supporto, i numeri binari vengono letti e *interpolati* al fine di ricostruire un segnale sonoro che rappresenta quello originale.

Uno dei motivi che giustificano l'adozione delle tecnologie digitali per

l'elaborazione del suono, è la possibilità di memorizzare un segnale sonoro in modo *permanente*, ovvero essere in grado di rileggerlo in un secondo tempo senza subire alcuna perdita di dati.

Questo risultato non può essere ottenuto con nessuna tecnica di tipo analogico. Ad esempio, un disco fonografico può essere letto con sistemi di alta qualità, ottenendo un ascolto di qualità elevatissima, ma questo sarà comunque destinato a contenere un rumore di fondo dato dall'attrito tra la puntina ed il disco, sul quale si deposita, inevitabilmente, la polvere. Anche nel caso del nastro magnetico si hanno gli stessi inconvenienti, a causa dell'attrito tra la testina di lettura e il nastro. Il rumore introdotto è in questo caso simile ad un fruscio, ed è inutile sottolineare il fatto che ad ogni riversamento, tale fruscio va aumentando, rendendo di fatto impossibile una memorizzazione di tipo *permanente* del segnale sonoro. Un riproduttore analogico (fonografo o lettore di nastri) non è in grado, infatti, di distinguere tra il segnale originariamente registrato e il rumore che ad esso si è sovrapposto con il passare del tempo, così che entrambi vengono letti e riprodotti sul nuovo supporto di registrazione.

Nella registrazione digitale, invece, ciò che il sistema legge o scrive sul supporto sono sempre e solo dei numeri binari, composti esclusivamente da 1 e da 0. I disturbi introdotti a causa del deterioramento del supporto (almeno sino a che la frequenza di questi rimane minore di un certo valore di soglia) vengono *corretti* automaticamente dal lettore (con l'ausilio di appositi circuiti adibiti alla *correzione d'errore*, possibili grazie alla ridondanza con cui sono registrati i dati), così che il nuovo supporto conterrà una copia identica del segnale registrato nel supporto di partenza. Con i supporti digitali, quindi, risulta possibile riprodurre o copiare il segnale audio senza introdurre degenerazioni.

#### ***1.4.2 Caratteristiche tecniche dei CD-A***

Il compact disc audio consiste in un supporto di memorizzazione per segnali audio in formato digitale, di tipo ottico a sola lettura.

A partire dal 1980 i principali costruttori si sono accordati su di uno *standard* che definisce con precisione tutti gli aspetti di questo tipo di supporto di registrazione e dei relativi sistemi di riproduzione. In base a questo *standard*, i CD-A presentano un diametro di 120 millimetri, uno spessore di 1.2 millimetri, e un foro centrale caratterizzato da un diametro di 15 millimetri. Quest'ultimo serve per assicurare il CD-A al braccio del motore del sistema di lettura. Dalla figura 1.20 si possono evincere i diversi strati che caratterizzano il disco. Sulla superficie di un substrato di plastica trasparente (tipicamente policarbonato), vengono realizzate le depressioni (*pit*) che contengono fisicamente le informazioni registrate nel supporto. La superficie di tali depressioni è ricoperta da un sottilissimo (50-100nm) strato metallico riflettente realizzato in alluminio, argento o oro. Vi è poi uno strato plastico protettivo dello spessore compreso tra i 10 e i 30 $\mu$ m, sulla cui superficie viene applicata l'etichetta identificativa del CD-A.

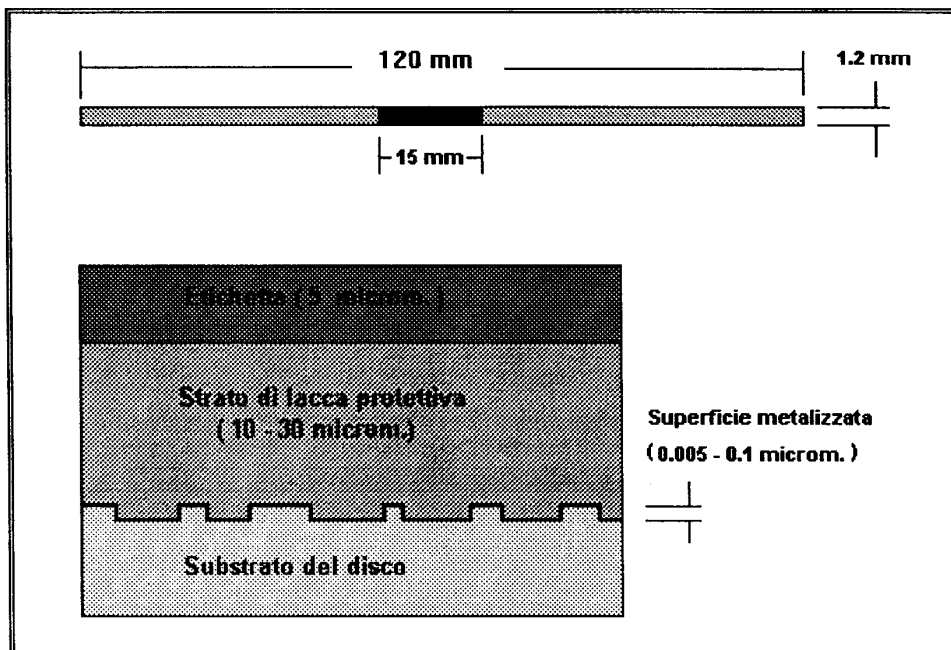


Fig. 1.20: Compact disc per audio digitale. È schematizzata la struttura a strati del disco. I singoli bit di informazione di cui è composto il segnale digitale, assieme alle informazioni aggiunte per la correzione degli errori, vengono codificati tramite le depressioni (*pit*) realizzate sulla superficie del substrato.

#### 1.4.3 Incisione e lettura del CD-A

Si è già detto che i dati memorizzati in un CD-A sono fisicamente contenuti in depressioni realizzate sulla superficie del substrato plastico del disco. Tali depressioni, più comunemente chiamate *pit*, sono disposte lungo una spirale che dal centro del disco evolve verso l'esterno. Esistono due ragioni per cui le informazioni registrate nel disco vengono memorizzate a partire dalla sua circonferenza interna. Innanzitutto perché la circonferenza esterna del disco è maggiormente soggetta a difetti di fabbricazione rispetto a quella interna. In secondo luogo, iniziando la registrazione dei dati dalla circonferenza interna, se *standard* futuri prevederanno dischi di diametri diversi dall'unico fino ad ora usato (pari a 120 millimetri), non vi sarà alcun problema di compatibilità con i CD-A attuali.

La larghezza delle depressioni è fissata dallo *standard* già citato in precedenza, ed è pari a  $0.6\mu\text{m}$ , mentre la loro lunghezza dipende dalle sequenze binarie memorizzate. La distanza tra le successive rivoluzioni della spirale è invece di  $1.6\mu\text{m}$ .

La scrittura delle informazioni sul disco avviene tramite un procedimento di stampaggio a caldo, del tutto simile a quello utilizzato per la duplicazione dei dischi analogici in vinile. Come già detto in precedenza, i dati vengono disposti lungo un percorso a spirale che parte dal centro del disco e si sviluppa verso la sua circonferenza esterna. Le prime rivoluzioni della spirale ospitano la così detta TOC (*Table Of Contents*), ovvero la tabella che contiene gli indirizzi dei vari brani che compongono il contenuto musicale del disco. La TOC viene caricata nella memoria del sistema di lettura al momento del caricamento del disco. I campioni digitali del segnale audio sono disposti nella zona rimanente, assieme ad altre informazioni necessarie per la

localizzazione dei brani e per la correzione degli errori.

Per leggere i dati memorizzati nel disco viene impiegato un raggio laser. Tale raggio viene applicato sotto il disco e, dopo aver attraversato il substrato di plastica trasparente, viene riflesso dallo strato metallico che ricopre la superficie del *pit*. La lettura del contenuto di un CD-A avviene quindi senza alcun contatto fisico tra lo strato del disco che contiene le informazioni e il sistema di lettura.

Il fatto che la superficie del substrato sulla quale sono incisi i *pit* sia fisicamente separata da ciascuna delle due facciate esterne del disco, costituisce la più importante tra le caratteristiche dei CD-A. La polvere che si deposita su tali facciate e le eventuali loro deformazioni, non vengono infatti in questo modo a trovarsi sul piano focale del raggio laser e di conseguenza il loro effetto viene minimizzato. In particolare, ogni ostruzione più piccola di 0.5 mm diventa insignificante, e non provoca alcun errore in fase di lettura del CD-A.

Per ottenere che in fase di lettura dei CD-A la velocità relativa tra quest'ultimo e il dispositivo di lettura si mantenga uniforme, è indispensabile che la velocità lineare con cui ruota il disco rimanga costante. Per ottenere ciò, la velocità di rotazione del disco deve variare a seconda della posizione radiale del dispositivo di lettura. In particolare, a mano a mano che quest'ultimo si sposta dal centro del disco verso l'esterno, la velocità di rotazione del disco dovrà necessariamente diminuire. Si passa in questo modo da una velocità iniziale di 500 giri/minuto (quando viene letta la circonferenza più interna del disco), ad una finale di 200 giri/minuto (quando invece ad essere letta è la circonferenza più esterna).

E' opportuno sottolineare che, nella pratica, i dati non vengono utilizzati così come vengono letti. Occorre operare una serie di complesse correzioni sui dati letti per minimizzare gli errori (generati da sequenze di *pit* mancanti o danneggiati a causa di difetti di scrittura o graffi). Tra le metodologie impiegate, vanno citate la modulazione EFM (Eight to Fourteen Modulation) e il codice RS-PC (Reed Solomon Product Code): tramite queste correzioni è possibile neutralizzare graffi fino a 2.5 mm di larghezza (corrispondenti a circa 3500 bit).

#### ***1.4.4 Cause di degrado del CD-A***

In precedenza è stato detto che una delle caratteristiche più importanti dei CD-A sta nel fatto che non esiste alcun contatto fisico tra il sistema di lettura e la superficie del substrato sulla quale sono incise le depressioni contenenti i dati da leggere. Grazie a ciò, in fase di lettura del disco, non si verifica alcuna deformazione fisica del supporto a causa delle sostanze esterne che si depositano sulla sua superficie. Nonostante ciò, la polvere può comunque impedire od ostacolare la lettura dei dati contenuti nel disco e può inoltre accelerare i processi di degrado dei suoi componenti. Attualmente, la maggior parte dei processi di degrado che possono interessare i CD-A nel lungo periodo risultano ancora sconosciuti. In ogni caso, la rimozione forzata di tale polvere può causare danni fisici permanenti al supporto, graffiandone la superficie esterna dello strato protettivo.

Se lo strato metallico che ricopre i *pit* perde le sue proprietà riflettenti, possono insorgere seri problemi di lettura dei dati contenuti nel disco. Nei primi CD-A (ma spesso anche in quelli prodotti attualmente con materiali scadenti) lo strato metallico perde progressivamente la capacità di riflettere il raggio laser emesso dal sistema di

lettura. Questo avviene a causa dell'ossidazione dell'alluminio che ricopre le depressioni presenti all'interno del disco. L'ossidazione di un CD-A è favorita dalle alte temperature e dalle elevate umidità e si manifesta, in particolare, con un aumento della trasparenza delle aree del disco interessate da tale processo degenerativo. Molti produttori hanno risolto il problema dell'ossidazione dell'alluminio presente nei loro CD-A, ricoprendo i *pit* con delle particolari leghe contenenti solo una piccola parte di alluminio.

I CD-A risultano essere particolarmente sensibili alle variazioni di temperatura e di umidità che si possono verificare negli ambienti in cui vengono conservati. In seguito a rapide ed ampie escursioni di questi due fattori climatici possono infatti insorgere nei CD-A gravi fenomeni degenerativi, quali la già citata ossidazione dello strato metallico riflettente, il deterioramento del substrato plastico e dello strato protettivo, nonché lo scolorimento dell'etichetta applicata sul disco.

Un altro aspetto molto importante della preservazione dei CD-A consiste nella scelta dei contenitori in cui i dischi devono essere conservati quando non vengono utilizzati. Riporre i CD-A in economiche buste di plastica spesso comporta delle spiacevoli conseguenze se i dischi non vengono conservati in ambienti idonei. L'esposizione ad elevate temperature ed umidità può infatti comportare l'unione tra il disco e il contenitore in cui quest'ultimo è stato riposto, e il successivo tentativo di separare i due può concludersi con la de-laminazione del disco e l'irrimediabile perdita del suo contenuto.

Le più frequenti cause di danneggiamento fisico dei CD-A sono la conseguenza di una loro scorretta manipolazione e in particolare dei tentativi di flettere, piegare o curvare il disco e di pressioni esercitate sulla superficie del supporto con oggetti appuntiti o taglienti. Queste azioni provocano infatti la deformazione del substrato e possono arrivare ad alterare le depressioni contenenti i dati da leggere, causando l'irrimediabile perdita di questi ultimi.

Spesso l'applicazione di etichette adesive sulla facciata superiore del CD-A provoca lo sbilanciamento del disco, rendendo difficile la lettura del suo contenuto da parte del sistema di riproduzione. Inoltre tali etichette, in presenza di elevate umidità, possono staccarsi dalla superficie del compact disc audio. In ogni caso, quando un'etichetta viene applicata sul disco è estremamente importante non tentare di rimuoverla, in quanto un tentativo del genere potrebbe provocare la de-laminazione del disco. Se proprio è indispensabile scrivere sulla facciata superiore del CD-A, è preferibile utilizzare uno dei prodotti specifici consigliati dai produttori, evitando in ogni caso l'uso di inchiostri contenenti solventi, in quanto questi ultimi potrebbero penetrare all'interno dello strato protettivo del disco.

#### ***1.4.5 Preservazione dei CD-A***

Fino al momento attuale, nessun *standard* nazionale o internazionale inerente alle condizioni di conservazione a lungo termine per i compact disc audio è stato ancora pubblicato dall'ANSI o dall'*International Standards Organization* (ISO). Di conseguenza, le uniche indicazioni relative devono essere ricavate direttamente dalle pubblicazioni emesse dalle ditte produttrici. Nei punti che seguiranno verranno riassunti una serie di suggerimenti raccolti dai maggiori produttori di CD-A. In ogni caso le regole che si devono adottare nella conservazione dei CD-A sono certamente meno

rigide di quelle elencate nei precedenti capitoli per i nastri magnetici e i dischi analogici.

- Manipolare i CD-A solo quando questi devono essere ascoltati.
- Quando i CD-A non vengono utilizzati devono sempre essere riposti nella loro custodia.
  - Evitare di lasciare un CD-A per lungo tempo al di fuori della sua custodia.
  - Mai appoggiare un qualunque oggetto sopra un CD-A
  - Le custodie contenenti i CD-A devono a loro volta essere conservate in contenitori chiusi e preferibilmente sigillati. Tali contenitori dovranno essere in grado di proteggere i dischi dalla polvere, dalla luce e dalle variazioni climatiche (sbalzi di temperatura e di umidità in particolare).
    - Tenere i CD-A lontano da fonti di calore, polvere e luce (specie quella solare).
    - Mai toccare con le dita la superficie del disco. Quest'ultimo deve essere manipolato esclusivamente prendendolo per il suo bordo esterno.
    - E' importante mantenere puliti gli ambienti in cui i dischi vengono conservati e manipolati.
      - Evitare di bere, mangiare o fumare vicino ai CD-A.
      - Mai flettere, piegare o curvare un CD-A.
      - Tenere lontano dalla superficie dei CD-A qualunque oggetto appuntito o tagliente.
      - Non si dovranno applicare etichette e nemmeno realizzare scritte sulla facciata inferiore del CD-A, in quanto impedirebbero al raggio laser del sistema di lettura di raggiungere lo strato interno del disco contenente le informazioni che si vogliono leggere.
        - Evitare, per quanto possibile, di applicare etichette adesive anche sulla superficie superiore del CD-A; potrebbero sbilanciare il disco. Su tale facciata non si dovranno nemmeno usare inchiostri che contengono solventi in grado di penetrare nello strato protettivo del disco.
        - Mai rimuovere eventuali etichette adesive presenti sulla superficie superiore del disco; così facendo se ne potrebbe causare la de-laminazione.
        - Prima di essere ascoltati i dischi devono sempre essere puliti.
        - Per la pulizia dei compact disc audio si raccomanda l'uso di un panno di tessuto non abrasivo, ad esempio di cotone o di velluto. Ricordando che delle due facciate del disco è sicuramente più importante mantenere pulita quella inferiore (in quanto è quella su cui incide il raggio laser del sistema di lettura), si raccomanda comunque di utilizzare il panno con dei movimenti radiali (dal centro del disco verso il suo bordo esterno) su entrambe le superfici del supporto. Solo nei casi in cui sulla superficie dei CD-A si riscontrino accumuli particolarmente accentuati di polvere, grasso o altre sostanze esterne, si dovrà procedere al loro lavaggio con un panno imbevuto con del liquido detergente. Evitare in questo caso l'uso di solventi, e ricorrere preferibilmente all'utilizzo di semplice acqua distillata. Terminato il lavaggio, il disco dovrà essere accuratamente asciugato prima di poter essere ascoltato o riposto nella sua custodia.
          - Conservare i CD-A in ambienti in cui la temperatura si mantenga sempre tra i 10 e i 25°C.
          - Nei locali destinati ad accogliere i CD-A, l'umidità relativa deve essere sempre compresa tra il 20 e il 50%

- Evitare il più possibile, negli ambienti in cui i CD-A vengono conservati, forti e improvvisi sbalzi sia di temperatura che di umidità. Per quanto riguarda la prima sono da evitare escursioni termiche superiori ai 15°C nell'arco di un'ora. Si considerano egualmente pericolose variazioni dell'umidità relativa superiori al 10% in un periodo di 60 minuti. Si osservi come, in pratica, entrambi i gradienti citati risultano essere facilmente evitabili.

- Non immagazzinare i supporti in locali che possono subire allagamenti, ed eliminare da tali ambienti qualunque materiale facilmente infiammabile come carta, legno e cartone. In questo senso si raccomanda di realizzare gli scaffali destinati ad accogliere i CD-A in acciaio.

#### 1.4.6 Digital Versatile Disc

Il compact disc si è evoluto rapidamente dal suo iniziale formato per riproduzione di musica verso applicazioni di memoria ottica nei personal computer (CD-ROM) e di rappresentazione di immagini (Photo-CD). I modi di codifica e gli algoritmi di trattamento dei dati sono divenuti via via più sofisticati, grazie soprattutto al notevole progresso della microelettronica integrata. Parallelamente, le parti meccaniche e ottiche del sistema di lettura ottica divengono sempre più raffinate.

Nel corso del 1995, compare quello che si presenta come il primo esemplare di una nuova generazione di CD, il DVD (Digital Versatile Disc), a cui si affianca, ovviamente, un DVD-ROM. Il DVD è ricco di innovazioni progettuali, che vanno da una minor dimensione dei pit, e quindi un'aumentata densità, all'impiego di due strati sovrapposti per l'immagazzinamento dei dati, anziché uno solo, a una maggior velocità di scansione, a un potenziamento dei sistemi di correzione degli errori e a molti altri miglioramenti, ad esempio una più efficace azione della lente che focalizza il fascio laser. Il DVD è capace di memorizzare, nel caso più favorevole, ben 8,5 GB, contro 0,68 GB del CD tradizionale. Un incremento di capacità pari, dunque, a più di dodici volte. Un confronto dettagliato tra le caratteristiche di un DVD e di un CD è riportato nella tabella 1.5.

Caratteristica	CD	DVD
Diametro	120 mm	120 mm
Spessore	1,2 mm	1,2 mm
Stratificazione dei dati	1 strato	1 oppure 2 strati
Lunghezza della spirale di pit	5 km	11 km
Separazione delle file di pit	1,6 µm	0,74 µm
Densità delle tracce	6250 per cm	13500 per cm
Lunghezza minima dei pit	0,83 µm	0,4 µm
Lunghezza d'onda del diodo laser	0,78 µm (quasi infrarosso)	0,635-0,65 µm (rosso)
Apertura numerica della lente	0,45	0,60
Velocità di scorrimento dei pit	1,25 rn/s	4,0 rn/s
Capacità di	0,68 GB	4,7 GB (1 strato)
Immagazzinamento dati		8,5 GB (2 strati)
Velocità di lettura dei dati	153,6 kB/s o 176,4 kB/s	1108 kB/s

Tab. 1.5: Confronto dettagliato tra le caratteristiche di un DVD e di un CD



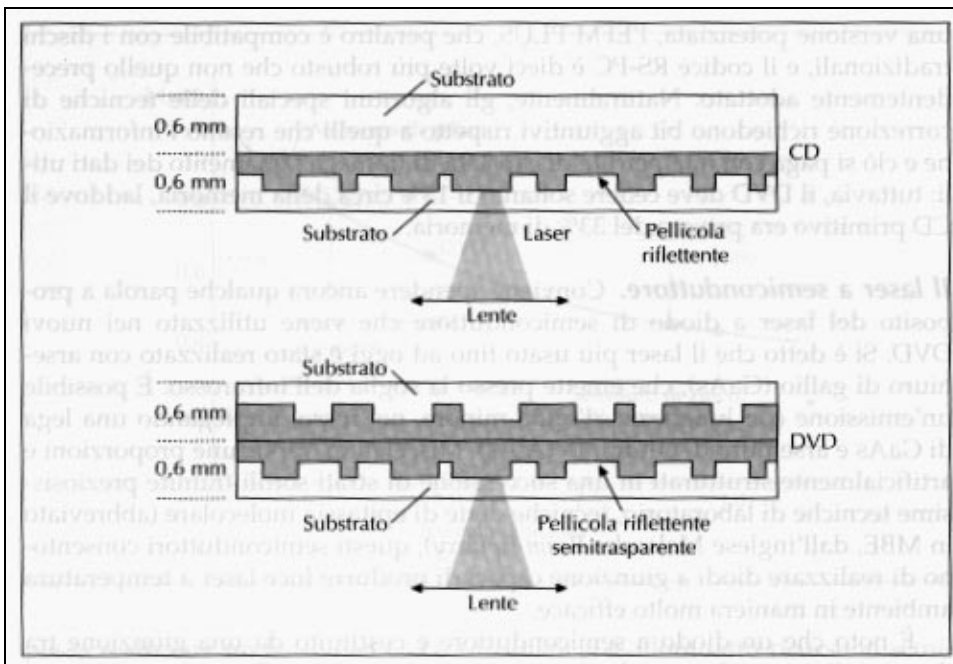


Fig. 1.20b: Spaccato verticale di un disco CD a strato singolo di *pit* e di un DVD a doppio strato di *pit*. Nel secondo caso, lo strato inferiore è semitrasparente e la lente può focalizzare il fascio laser sull'uno oppure sull'altro dei due strati.

Il DVD, si è detto, viene realizzato con due strati sovrapposti di spessore pari alla metà del singolo strato di un CD. La scrittura dei dati viene realizzata su entrambi gli strati, con i *pit* che si trovano faccia a faccia nel modo illustrato nella figura 1.20b, dove di nuovo si propone il confronto con il CD tradizionale.

La lettura viene effettuata sempre dallo stesso lato, perché lo strato che sta dalla parte di provenienza del raggio laser è fatto di materiale semitrasparente e lascia passare una buona frazione della luce (come del resto avviene con la speciale colla che unisce i due substrati). Il laser fa una scansione completa del disco con la lente in posizione tale da focalizzare il fascio sul primo strato di *pit*; a fine corsa, il sistema di lettura riaccomoda automaticamente la lente in modo che il fuoco si sposti sull'altro strato. In questo caso, il laser attraversa il primo strato in posizione non focale, formandovi perciò un'immagine ovalizzata e allargata, cosicché l'intensità luminosa riflessa dentro il cono che raggiunge la lente del sensore è sufficientemente bassa da non disturbare la lettura dei dati dal secondo strato (in realtà, una piccola riduzione di qualità è inevitabile, ma viene compensata riducendo la capacità di memoria globale dai potenziali 9,4 agli effettivi 8,5 GB).

L'utilità del doppio strato non è soltanto di raddoppiare la capacità di memoria, ma anche di attenuare gli effetti derivanti dalla deformazione del materiale costituente il disco: le variazioni dei due strati tendono a compensarsi vicendevolmente, minimizzando tale inconveniente.

Nel DVD, le tecniche di controllo e correzione degli errori sono alquanto più avanzate che non nel CD. Lo schema di modulazione EFM è sostituito da una versione potenziata, l'EFM PLUS, che peraltro è compatibile con i dischi tradizionali, e il codice

RS-PC è dieci volte più robusto rispetto a quello adottato precedentemente. Naturalmente, gli algoritmi delle tecniche di correzione richiedono bit aggiuntivi rispetto a quelli strettamente necessari a contenere l'informazione e ciò si paga con una perdita di capacità di immagazzinamento dei dati utili (*ridondanza*): tuttavia, il DVD deve cedere soltanto il 13% circa della memoria, laddove il CD primitivo era privato del 33% di memoria.

#### 1.4.7 Il laser a semiconduttore

E' forse utile, a questo punto, spendere qualche parola a proposito del laser a diodo di semiconduttore che viene utilizzato nei nuovi DVD. Il laser più usato fino ad oggi è stato realizzato con arseniuro di gallio (GaAs), che emette presso la soglia dell'infrarosso. E' possibile un'emissione con lunghezza d'onda minore, nel rosso, impiegando una lega di GaAs e arseniuro di alluminio (AlAs). Miscelati in opportune proporzioni e artificialmente strutturati in una successione di strati sottili utilizzando la tecnica di epitassia molecolare (*Molecular Beam Epitaxy*, MBE), questi semiconduttori consentono di realizzare diodi a giunzione capaci di produrre luce laser a temperatura ambiente in maniera molto efficace.

Un diodo a semiconduttore è costituito da una giunzione tra due tipi di materiale, uno di tipo *n* (la corrente è trasportata da cariche negative) e uno di tipo *p* (la corrente è trasportata da cariche positive). Una giunzione così formata ha il potere di rettificare la corrente elettrica, ossia di offrire una diversa resistenza al suo passaggio a seconda della polarità della tensione applicata.

Un diodo a semiconduttore emette radiazione luminosa allorché viene fatto attraversare da corrente elettrica nel senso di bassa resistenza. In tale caso, i due tipi di portatori di carica elettrica vengono a mescolarsi nella zona di giunzione (zona attiva) e per la loro stessa natura si annientano vicendevolmente. In questo processo si libera dell'energia, che emerge all'esterno del materiale sotto forma di radiazione luminosa.

La lunghezza d'onda della luce emessa è tanto più piccola quanto più alta è l'energia liberata da ogni coppia elettrone-lacuna che si distrugge<sup>1</sup>. Detta energia è una caratteristica specifica di ciascun materiale e prende il nome di banda proibita (energy gap). Il silicio, il più comune, economico e tecnologicamente sviluppato tra i semiconduttori, ha una banda proibita di circa 1 elettronvolt, corrispondente a una lunghezza d'onda  $\lambda \approx 1.2 \mu\text{m}$ . Non solo tale valore è troppo grande per le esigenze di una buona focalizzazione, ma l'efficienza di produzione della luce è troppo bassa perché si possa realizzare un laser. Nei CD tradizionali si è allora fatto ricorso ai semiconduttori composti, tipicamente quelli appartenenti alla famiglia III-V, di cui emblematico è il GaAs, dove l'elemento di valenza III è il gallio e quello di valenza V l'arsenico. Questo materiale e certe sue leghe sono ottimi emettitori di radiazione già a livello di LED (diodi luminescenti) e si prestano a costruire laser grazie alla loro docilità nei processi di

---

<sup>1</sup> La relazione che lega l'energia liberata *E* e la lunghezza d'onda  $\lambda$  della radiazione luminosa che ne scaturisce è:

$$\lambda = hc/E$$

dove  $h = 6.62 \cdot 10^{-24}$  Js è la costante di Planck e  $c = 3 \cdot 10^8$  m/s è la velocità della luce nel vuoto. Introducendo i valori nella formula, si ricava:

$$\lambda \text{ (in micron)} \approx 1.24/E \text{ (in elettronvolt)}$$

Nel caso del GaAs, *E* vale  $\approx 1.43$  eV, per cui  $\lambda \approx 0.87 \mu\text{m}$ .

crescita epitassiale che portano alle complesse strutture a diodo necessarie.

Nella figura 1.20c è mostrata la natura della radiazione emessa dall'arseniuro di gallio puro e da due leghe dello stesso con l'arseniuro di alluminio, che differiscono per la percentuale di alluminio, realizzate per impiego rispettivamente nei CD e nei DVD. Per confronto, nella figura vengono mostrati i dati relativi a due leghe di semiconduttore appartenenti invece alla famiglia dei II-VI. Questi materiali, che appaiono nettamente superiori in quanto la loro lunghezza d'onda corrisponde alla regione blu, sono rimasti finora in disparte perché non è facile realizzare giunzioni *p-n* di qualità comparabile a quella dei laser III-V. Le tecnologie stanno tuttavia evolvendosi ed è prevedibile che la generazione di compact disc che seguirà il DVD ne farà uso. Una riduzione di un fattore 1.5 nel diametro nella macchia luminosa che legge i dati permetterebbe un impacchettamento almeno due volte più denso rispetto all'attuale DVD.

In conclusione, il progresso del disco DVD riflette il notevole progresso conseguito dal compact disc come veicolo ottico di informazione per i programmi di computer, le banche di dati, il software multimediale. Queste applicazioni, oltre all'aumentata domanda di grafica ad alta risoluzione, spingono ad un continuo avanzamento della tecnologia dei sistemi di archiviazione dei dati.

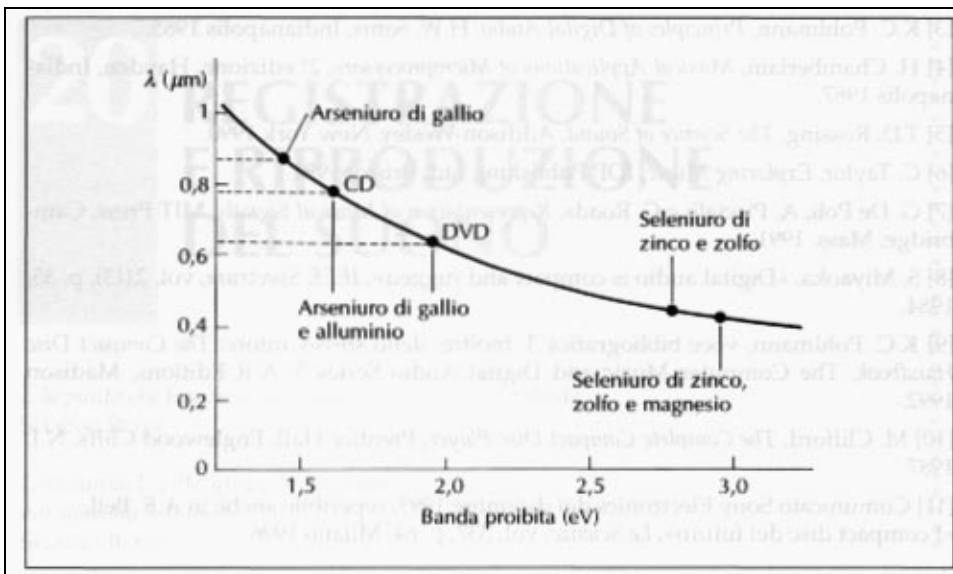


Fig. 1.20c: Lunghezza d'onda in micron dei laser a diodo di semiconduttore. CD e DVD usano entrambi laser di AlGaAs, ma con differenti rapporti di concentrazione tra Al e Ga. I due seleniuri, semiconduttori appartenenti al gruppo dei II-VI, non sono ancora utilizzabili.

## 1.5 Le tecnologie di restauro

L'introduzione di supporti digitali ad alta qualità, quali il Compact Disc Audio (CD-A), il Digital Versatile Disc Audio (DVD-A), il Super Audio Compact Disc (SACD), il Digital Audio Tape (DAT), il MiniDisc e il Digital Compact Cassette (DCC), ha incrementato in modo sensibile l'aspettazione della qualità sonora da parte dell'utente. Questo, combinato con un crescente interesse verso il materiale storico, ha portato ad una grande richiesta di restauri di materiale degradato, afferente alle registrazioni eseguite sui cilindri di cera, sui dischi (78 giri, LP, etc.) e sui nastri magnetici. Riduzione del rumore può anche essere occasionalmente richiesta nelle registrazioni digitali contemporanee nei casi in cui il rumore di fondo è considerato essere intrusivo.

Tecniche analogiche di restauro sono state a lungo utilizzate coi nastri magnetici, editando (nella forma "taglia e incolla") manualmente il nastro al fine di rimuovere i difetti locali (dovuti, ad esempio, a graffi) ed equalizzando nel dominio della frequenza, al fine di ridurre i disturbi a carattere globale. Poiché i disturbi locali possiedono un grande contenuto nelle alte frequenze (v. figura 1.21), più efficaci risultati si possono ottenere rilevandoli tramite un filtraggio passa-alto e rimuovendoli con filtri di tipo passa-basso. Nessuno di questi metodi, comunque, è abbastanza sofisticato da permettere un consistente grado di riduzione dei disturbi senza interferire con la qualità del segnale. Le tecniche digitali, al contrario, permettono un maggior grado di flessibilità nel processare il segnale, sebbene vada sottolineato come l'utilizzo inadeguato di queste metodologie possa provocare esiti maggiormente disastrosi che l'utilizzo del processo analogico, il quale risulta essere più *robusto* ad un utilizzo non consapevole.

Esistono diverse tipologie distinte di degradi audio. Queste possono essere sommariamente distinte in due gruppi: disturbi *locali* e *globali*. I disturbi locali sono discontinuità nella forma d'onda che affliggono solo alcuni campioni; esempi di queste sono i clicks, crackles, scratches, breakages and clipping. I disturbi a carattere globale influenzano tutti i campioni del segnale e includono: rumore di fondo, wow e flutter e alcuni tipi di distorsione non lineare.

Nei seguenti paragrafi saranno descritte le caratteristiche di questi disturbi e le metodologie d'intervento idonee alla rilevazione e alla rimozione degli stessi.

### 1.5.1 Modelli del segnale audio

Molti algoritmi di restauro audio sono basati sulla progettazione di un modello matematico che rispecchi le caratteristiche del segnale. Più il modello assunto è vicino al segnale audio, migliori esiti si ottengono da questi algoritmi. È necessario notare che il segnale audio, il quale può contenere parlato, musica e rumore, ha una natura pesantemente non-stazionaria: i modelli generalmente ne ipotizzano una stazionarietà *a breve termine*.

I modelli solitamente utilizzati per rappresentare un segnale audio sono principalmente due, il primo è un modello Auto-Regressivo (AR) *a soli poli* [Box 1970], il secondo è un modello sinusoidale [McAuley 1986].

Nel modello AR il segnale all'istante  $nT$  è espresso come somma pesata di  $P$  (ordine del modello) campioni precedenti e di un *residuo*  $e(n)$ :

$$s(n) = \sum_{i=1}^P s(n-i)a_i + e(n) \quad (1)$$

Questo modello rappresenta bene tanto segnali armonici che rumorosi.

L'ordine del modello riflette la complessità del segnale rappresentato e va da un minimo di  $P=30$  per segnali audio *semplici* fino a  $P>100$  per forme d'onda complesse. In genere, data la varietà di segnali contenuti in una registrazione, si assume un ordine sufficiente alla descrizione del più complesso dei segnali presenti.

Poiché le caratteristiche frequenziali del segnale audio non sono costanti nel tempo, l'ipotesi di stazionarietà viene a cadere, ed è quindi necessario operare per blocchi di dati praticando una finestra pesata del segnale utilizzando, tipicamente, delle finestre di Hanning o di Blackman; per non avere perdita di informazione è necessario inoltre una sovrapposizione (overlap) delle finestre, per cui il tipo di finestra, il passo di overlap e la larghezza della finestra diventano parametri critici.

Tutti i parametri dipendono dalle caratteristiche specifiche del segnale trattato; comunemente, ad una frequenza di campionamento di 44100 Hz, si adoperano finestre di ampiezza da 500 a 2000 campioni (10÷50 ms). Nella stima dei parametri del modello si utilizzano criteri di massima verosimiglianza robusti alle sovrastime che potrebbero essere indotte dalla presenza di click. Un approccio standard è l'uso dello stimatore M [Huber 1981], che è un sistema di stima ai minimi quadrati in cui si pesano iterativamente le variabili di eccitazione utilizzando funzioni non lineari come la *psi* di Huber o la funzione biquadratica di Tukey.

Un modello che ha trovato numerose applicazioni nell'analisi e nella sintesi del parlato, è il modello sinusoidale: consiste in una rappresentazione del segnale mediante una sintesi additiva di sinusoidi modulate in frequenza:

$$s(n) = \sum_{i=1}^{P_n} a_i(n) \sin\left(\int_0^{nT} \omega_i(t) dt + \varphi_i\right) \quad (2)$$

Questo modello permette una modulazione in frequenza ed in ampiezza (poiché  $a_i(n)$  e  $\omega_i(t)$  variano nel tempo) e considera la *nascita* e la *morte* delle singole componenti frequenziali ( $P_n$  varia nel tempo). La stima dei parametri di questo modello è estremamente complessa, inoltre il modello si presta poco a rappresentare segnali assimilabili a rumore (poco armonici).

Ulteriori modelli utilizzano funzioni appropriate al segnale audio (come le Wavelets [Haddad 1992]) e trasformazioni basate sullo sviluppo dell'Analisi delle Componenti Principali (PCA) [Gerbrands 1981].

La scelta del tipo di rappresentazione sarà un compromesso tra le conoscenze a priori che si hanno del segnale, la pesantezza computazionale richiesta dal modello ed il grado

di criticità che l'accuratezza del modello rappresenta per l'applicazione; nella pratica si sono trovate molte implementazioni di tipo AR.

### 1.5.2 Disturbi locali: definizione

Si definisce *click* un generico tipo di degradazione localizzata di durata limitata e presente in posizione casuale lungo la forma d'onda. I click affliggono particolarmente le registrazioni su disco e vengono classificati come *tick* quando l'ampiezza e il numero di campioni interessati sono ridotti (è il caso di disturbi provocati da polvere aderente alla superficie del disco o da granulosità del materiale usato nella produzione del disco), oppure come *scratch*, *crackle* e *pop* quando si tratta di disturbi più ampi (è il caso dei graffi superficiali). Tuttavia a questi modelli sono riconducibili un gran numero di disturbi impulsivi, compresi quelli dovuti a perdite di sincronia presenti nelle registrazioni digitali.

A titolo d'esempio, un normale disco 78 giri è tipicamente affetto da 2000 click per secondo dovuti alla granulosità del materiale, con durate che vanno dai 20 $\mu$ s a 4ms. In figura 1.21 è riportato un tipico esempio di un segnale audio degradato da click (rappresentato nel tempo (a) e in frequenza (b)). Nei casi di interesse, è lecito comunque ritenere che almeno il 90% dei campioni sia esente da disturbi impulsivi: è quindi ragionevole ipotizzare di giungere ad un restauro *convincente*.

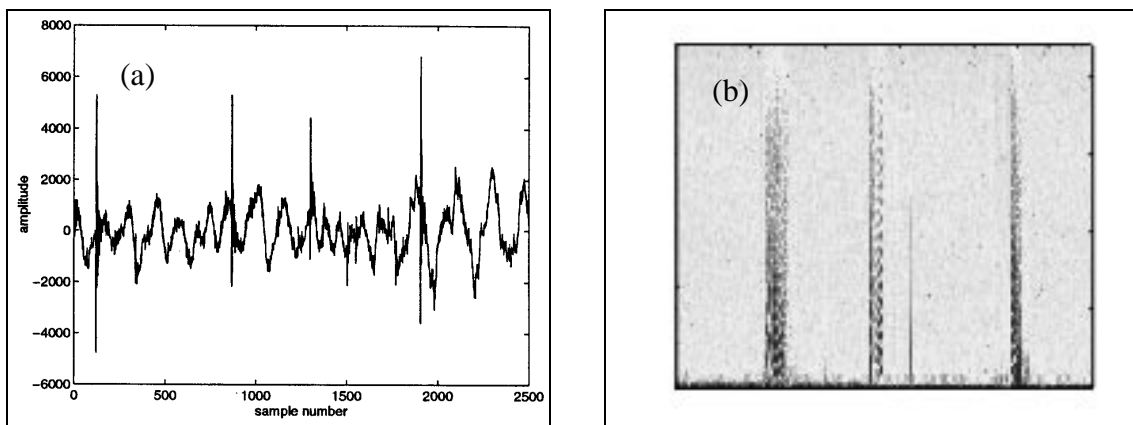


Fig. 1.21: musica degradata da click estratta da un disco a 78 giri. (a) rappresentazione nel dominio temporale. (b) rappresentazione tramite sonogramma. Si noti, in (b), il grande contenuto spettrale a tutte le frequenze.

Le diverse tipologie click sono dovute a cause eterogenee. Tipiche fonti sono la polvere ed il grasso che si deposita sulla superficie dei dischi (v. figura 1.22), la granulosità del materiale utilizzato per lo stampaggio o piccoli graffi sulla superficie. Analoghi artefatti sono riscontrabili in altri supporti analogici, quali pellicole contenenti colonne sonore e cilindri di cera, mentre i nastri magnetici sono afflitti da click in quantità minore. Nelle registrazioni digitali è possibile riscontrare tick dovuti a errori compiuti durante la scrittura o errori di temporizzazione.

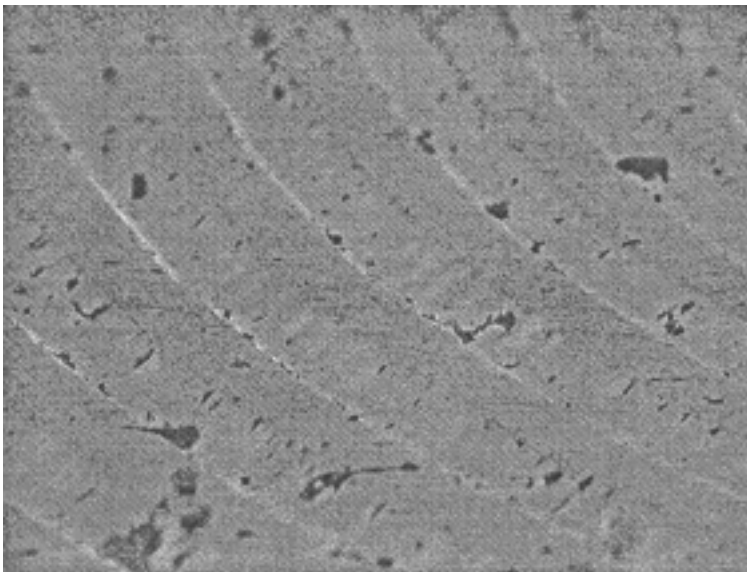


Fig. 1.22: fotografia al microscopio elettronico di una superficie di un disco a 78 giri. Si noti il degrado provocato dalla polvere depositatasi sulla superficie.

### 1.5.3 Disturbi locali: modelli

Il segnale degradato da disturbi locali può essere modellato in modi diversi. Ad esempio, il click può essere considerato additivo o rimpiazzare il segnale per un breve periodo. Il modello additivo è considerato accettabile per i difetti riscontrabili comunemente, come piccoli graffi o tick causati dalla polvere, mentre il modello sostitutivo risulta necessario per graffi estesi o rotture del supporto che coprono il segnale per lunghi periodi.

In questo ambito viene descritto il seguente modello additivo di validità generale e in grado di considerare una gran varietà di disturbi caratteristici:

$$x(n) = s(n) + i(n)v(n) \quad (3)$$

dove  $x(n)$  è il segnale disponibile,  $s(n)$  è il segnale non rumoroso,  $v(n)$  è il disturbo e  $i(n)$  è un vettore di variabili binarie (in grado di assumere solo i valori 0 e 1) che assumono il valore 1 in corrispondenza dei campioni affetti dal disturbo: la statistica del processo  $i(n)$  decide quando un campione è danneggiato mentre la statistica di  $v(n)$  determina l'ampiezza caratteristica del campione danneggiato. In questo modello si ipotizza che il disturbo non interferisca col segnale  $s(n)$ : ipotesi ragionevole sempre, tranne nei casi di rilevanti degradazioni in grado di modificare la velocità di scorrimento del nastro o della puntina sul disco, ovvero rotture del supporto riparate meccanicamente (come frammenti di dischi incollati tra loro o giunture raccordate con nastro adesivo).

Alcune importanti caratteristiche comuni ai segnali audio degradati da click sono:

- Il disturbo tende ad affliggere un treno di campioni consecutivi, con inizio e durata casuale. Questo provoca una forte correlazione tra i successivi campioni di  $i(n)$ , rendendo più complessa l'individuazione di click adiacenti, in quanto i loro effetti

possono cancellarsi a vicenda (*missed detection*) ovvero sommarsi dando l'impressione che esistano altri impulsi intermedi (*false alarm*).

- L'ampiezza del disturbo varia considerevolmente all'interno della stessa registrazione. Alcuni click possono superare l'ampiezza massima del segnale, mentre altri, restando comunque udibili, restano al di sotto di 40 dB sotto il livello locale del segnale. In particolare, l'esistenza di click di grande ampiezza, tende a far trascurare al modello l'esistenza di piccoli artefatti.

Esistono molti approcci per il restauro dei disturbi impulsivi. È chiaro che un sistema ideale dovrebbe elaborare solo i campioni degradati, lasciando inalterati gli altri. La procedura di restauro si deve allora dividere in due sezioni distinte:

- a) la procedura di localizzazione in cui viene stimato  $i(n)$
- b) il processo di rimozione, in cui si ricostruisce il segnale audio nei punti in cui esso compare essere deteriorato ( $i(n)=1$ ).

Se non si assumono alcune ipotesi sul comportamento del segnale sottostante il click, si esegue una semplice interpolazione dei dati mancanti utilizzando i campioni non degradati; in alternativa, si ricostruisce il segnale a partire dai dati estratti dai campioni degradati utilizzando modelli del disturbo.

#### **1.5.4 Disturbi locali: rilevamento**

L'obiettivo di qualsiasi restauro audio è rimuovere solamente gli artefatti che risultano avvertibili dall'orecchio umano: qualsiasi altra elaborazione non solo risulterebbe inutile, ma incrementerebbe la possibilità di peggiorare la qualità del segnale udibile. Il processo di restauro deve quindi trovare il miglior compromesso possibile tra l'attenuazione dei disturbi e la distorsione introdotta come risultato indesiderato del processo di elaborazione del segnale audio. Si dovranno quindi valutare gli effetti psicoacustici che avvengono all'interno dell'orecchio umano (v. cap. 2 e [Canazza 1999]).

Come già accennato i più semplici metodi per il rilevamento dei click consistono in un'operazione di filtraggio sul segnale di tipo passa-alto: il segnale audio, infatti, contiene poca informazione sulle alte frequenze (sopra gli 8 kHz), mentre i disturbi impulsivi possiedono un contenuto spettrale a tutte le frequenze (v. fig. 1.21). Possono quindi essere facilmente localizzati con l'ausilio di un rilevatore a soglia situato in cascata al filtro. Questo metodo ha il vantaggio di essere facilmente implementabile in qualsiasi sistema (anche analogico) e non richiede la stima di particolari parametri, tranne il valore della soglia; diventa invece inutilizzabile qualora i click possedessero una banda limitata ovvero quando il segnale fosse dotato di un contenuto importante in alta frequenza (magari di carattere impulsivo), come succede nella musica elettroacustica, dove alcuni suoni di sintesi utilizzati possiedono caratteristiche fisiche analoghe ai disturbi impulsivi.

Altre metodologie incorporano in un modello informazioni *a priori* del segnale e dei disturbi. In questo modo, si localizzano i click utilizzando un rilevatore a soglia applicato sul segnale ottenuto come differenza tra il segnale originale (contenente i disturbi) e la parte *armonica* del modello di tipo AR (v. eq. 1).



#### 1.5.4.1 Rilevamento basato su modelli AR

In questo metodo il segnale non rumoroso  $s(n)$  è rappresentato da un processo AR stazionario *a breve termine* (v. eq. 1). I parametri  $a_i$  del modello sono stimati a partire dal segnale originale  $x(n)$  (degradato) utilizzando una qualsiasi procedura che risulti *robusta* ai rumori impulsivi, come, ad esempio, lo stimatore M [Huber 1981]. Si può quindi dedurre un segnale (per la) localizzazione  $e_l(n)$  (contenente i click) come differenza:

$$e_l(n) = x(n) - \sum_{i=1}^P x(n-i)a_i \quad (4)$$

Sostituendo la (1) nella (4) usando la (3) si ottiene:

$$e_l(n) = e(n) + i(n)v(n) - \sum_{i=1}^P i(n-i)v(n-i)a_i \quad (5)$$

la quale è composta dal residuo  $e(n)$  e dalla somma pesata dei valori corrente e passati del disturbo impulsivo. In pratica si è così ridotto il segnale corrotto  $x(n)$  alla sola componente residua  $e(n)$ , diminuendo quindi selettivamente l'ampiezza del segnale non rumoroso rispetto alla componente di rumore  $v(n)$  che è rimasta invariata.

Va comunque notato che questa amplificazione del rapporto tra *disturbo/segnale\_non\_rumoroso* è raggiunta a scapito di precisione nella localizzazione temporale del click, il cui effetto influenza ora  $P+1$  campioni del segnale  $e_l(n)$ .

L'imprecisione diventa critica quando si hanno click di ampiezze molto diverse tra loro e ravvicinati in senso temporale, in quanto i loro effetti possono sommarsi o cancellarsi reciprocamente. Poiché la rivelazione avverrà tramite confronto con un'opportuna soglia, valori bassi di questa, corretti per piccoli click, darebbero falsi allarmi o mancati rilevamenti nei  $P$  valori successivi ad un click di ampio valore.

Per il rilevamento dei click si può utilizzare un rilevamento a soglia sul segnale  $e_l(n)$ <sup>2</sup>. La scelta della soglia dipenderà dall'ordine del modello e dall'ampiezza degli impulsi presenti: dovrà riflettere un compromesso tra i falsi allarmi ed i mancati rilevamenti effettuati. In questo senso è di fondamentale importanza l'esperienza e la competenza del tecnico restauratore.

In figura 1.23 b si può osservare un tipico esempio di segnale  $e_l(n)$ : va notata la grande amplificazione degli impulsi presente in  $|e_l(n)|$ , rispetto al segnale originale  $x(n)$  riportato, a titolo di confronto, in 1.23 a.

Questa metodologia, se efficacemente implementata, può funzionare in *real time* utilizzando appositi microprocessori di tipo DSP. È anche possibile l'applicazione iterativa di questo algoritmo sul segnale già restaurato al fine di assicurare una miglior stima dei parametri e una conseguente localizzazione dei click precedentemente trascurati.

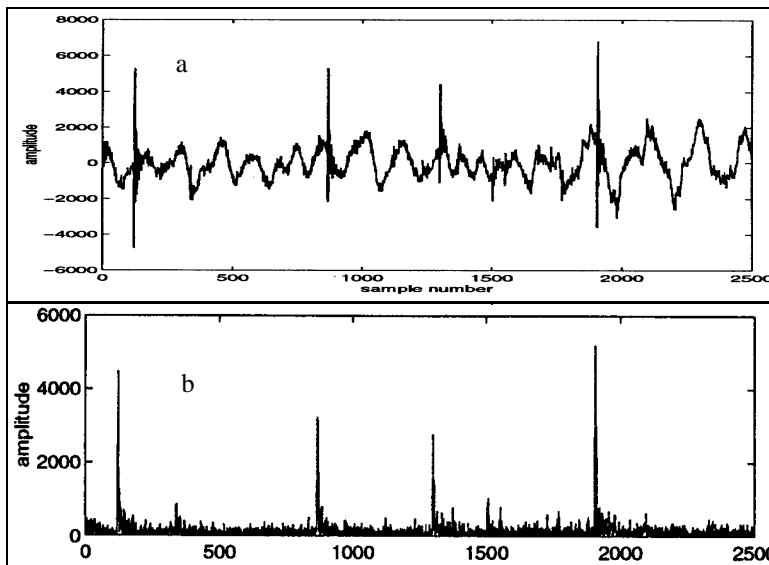


Fig. 1.23: (a)-Segnale originale  $x(n)$  affetto da click. (b)-Modulo del segnale di localizzazione  $e_l(n)$ : si noti la grande amplificazione del rapporto click/segnale presente in  $|e_l(n)|$ , rispetto a  $x(n)$ ; in questo modo viene notevolmente facilitata una rilevazione dei click tramite soglia.

#### 1.5.4 Disturbi locali: rimozione

Dopo aver eseguito una corretta rilevazione del click, è necessario utilizzare una strategia di sostituzione dei campioni deteriorati con valori dedotti dai dati non corrotti esistenti ai bordi del disturbo (processo di *interpolazione*). Nella pratica è possibile interpolare con buoni risultati sino a poche centinaia di campioni.

Il problema della sostituzione dei campioni degradati può essere così formalizzato. Si considerino  $N$  campioni del segnale audio che costituiscono un vettore  $\mathbf{s}$ . Sia  $\mathbf{x}$  il corrispondente vettore contenente il segnale degradato e  $\mathbf{i}$  il vettore contenente le variabili binarie  $i(n)$ . Il vettore  $\mathbf{s}$  può essere partizionato in due vettori, contenenti, rispettivamente, gli elementi il cui valore è conosciuto (cioè in cui si abbia  $i(n)=0$ ), denotato con  $\mathbf{s}_c$ , e gli elementi corrotti dai click e come tali sconosciuti ( $i(n)=1$ ), definito  $\mathbf{s}_s$ . In modo del tutto simile si possono suddividere i vettori  $\mathbf{x}$  ed  $\mathbf{i}$ . Il problema della sostituzione richiede allora la stima del vettore incognita  $\mathbf{s}_s$ , a partire dai dati osservati (corrotti)  $\mathbf{x}$ . Numerosi metodi sono stati sviluppati per l'interpolazione di dati corrotti o mancanti nel campo della trasmissione della voce e dei segnali audio in generale. L'approccio classico è l'utilizzo del filtro di media (v. appendice Matlab). I più efficaci sembrano comunque quelli basati sulla definizione di un modello, in quanto permettono di utilizzare l'informazione dedotta a priori dalle caratteristiche del segnale.

In particolare, verrà ora illustrata la classica metodologia Least Squares AR-based (LSAR) sviluppata da Vaseghi e Rayner [Vaseghi 1990] e originariamente utilizzata per la rimozione di tick digitali nei sistemi CD. In questo caso i dati corrotti sono considerati a tutti gli effetti *mancanti*, in quanto non si assume nessuna ipotesi sul valore che il segnale assume durante il click. Si consideri un blocco di lunghezza  $N$  di campioni  $\mathbf{s}$  dedotti da un processo (stazionario a breve termine) di tipo AR di parametri

a. I coefficienti del modello AR vengono determinati dai campioni disponibili prima e dopo il segnale danneggiato.

L'equazione (1) può allora venire riscritta in forma matriciale come:

$$\mathbf{e}=\mathbf{A}\mathbf{s} \quad (6)$$

dove  $\mathbf{A}$  è una matrice  $(N-P) \times N$ , in cui la  $(j-P)$ esima riga è costruita in modo da generare il residuo,  $e(j)=s(j)-\sum_{i=1}^P s(j-i)a_{j,i}$ . Il secondo membro di questa equazione

può essere quindi suddiviso, come descritto in precedenza, in sezioni di dati conosciuti e incogniti, con  $\mathbf{A}$  partizionata per colonne. La soluzione ai minimi quadrati si ottiene allora minimizzando la somma dei quadrati  $E=\mathbf{e}^T\mathbf{e}$ : esistono molti algoritmi scritti in diversi linguaggi (Matlab, ad esempio) che risolvono questo problema.

In figura 1.24 (a) e (b) sono mostrati due esempi di interpolazione basata sul modello AR. È facile rendersi conto come interpolatori *puri*, che non facciano cioè nessuna ipotesi sulle caratteristiche del segnale, non potrebbero presentare un andamento così valido nelle zone danneggiate. L'approccio LSAR è valido in molti casi. In click particolarmente estesi, comunque, si potrebbero incontrare distorsioni o una rimozione insoddisfacente del disturbo. Aumentare l'ordine del modello può contribuire, in questi casi, a migliorare il risultato. Un esempio grafico sulle effettive qualità dell'LSAR è illustrato nelle figure 1.25 e 1.26. In figura 1.25 è presentata una breve sezione di una registrazione vocale moderna (priva di click), confrontata col rispettivo residuo AR. La forma d'onda ha un carattere leggermente *rumoroso* e il residuo, come è lecito aspettarsi, è costituito, in larga parte, dal solo rumore. L'interpolazione eseguita con metodo LSAR è mostrata in fig. 1.26. In effetti, un'analisi del residuo LSAR mostra come l'interpolatore abbia svolto un buon lavoro nel minimizzare (il quadrato di) tale residuo: il segnale, però, ha perso la sua componente rumorosa. Questo potrebbe tradursi in un cambiamento di qualità nel punto d'inizio dell'interpolazione.

Altri metodi più sofisticati utilizzano un modello AR esteso, il quale tiene in considerazione la struttura pseudo-armonica del segnale a lungo termine, ipotesi realistica nel caso del parlato, del cantato e di alcuni tipi di musica elettroacustica. Metodi alternativi [McAuley 1986] operano interpolazioni nel dominio della frequenza, inserendo, al posto dei dati affetti da click, la DFT inversa dedotta da un'analisi di tipo STFT del segnale. Altri algoritmi molto recenti [Godsill 1998], fanno uso di un approccio statistico: un esempio di questa metodologia è implementata nel sistema di restauro audio CEDAR.

Alcuni sistemi di rimozione dei click inseriscono, al posto dei dati mancanti, delle curve approssimate con polinomi di grado adeguato. In questo caso, si può scegliere se pesare in modo diverso i campioni del segnale presenti prima o dopo il click. È evidente che l'interpolazione da sinistra verso destra (Left to Right, la quale tiene maggiormente conto dei campioni presenti prima del click) è adeguata nel caso il disturbo accada prima di un rapido transitorio del segnale (ad esempio, un attacco di una nota di pianoforte); al contrario, è opportuno utilizzare un'interpolazione da destra verso sinistra (R→L) se il click è presente immediatamente dopo un transitorio, al fine di evitare fastidiosi effetti di eco.

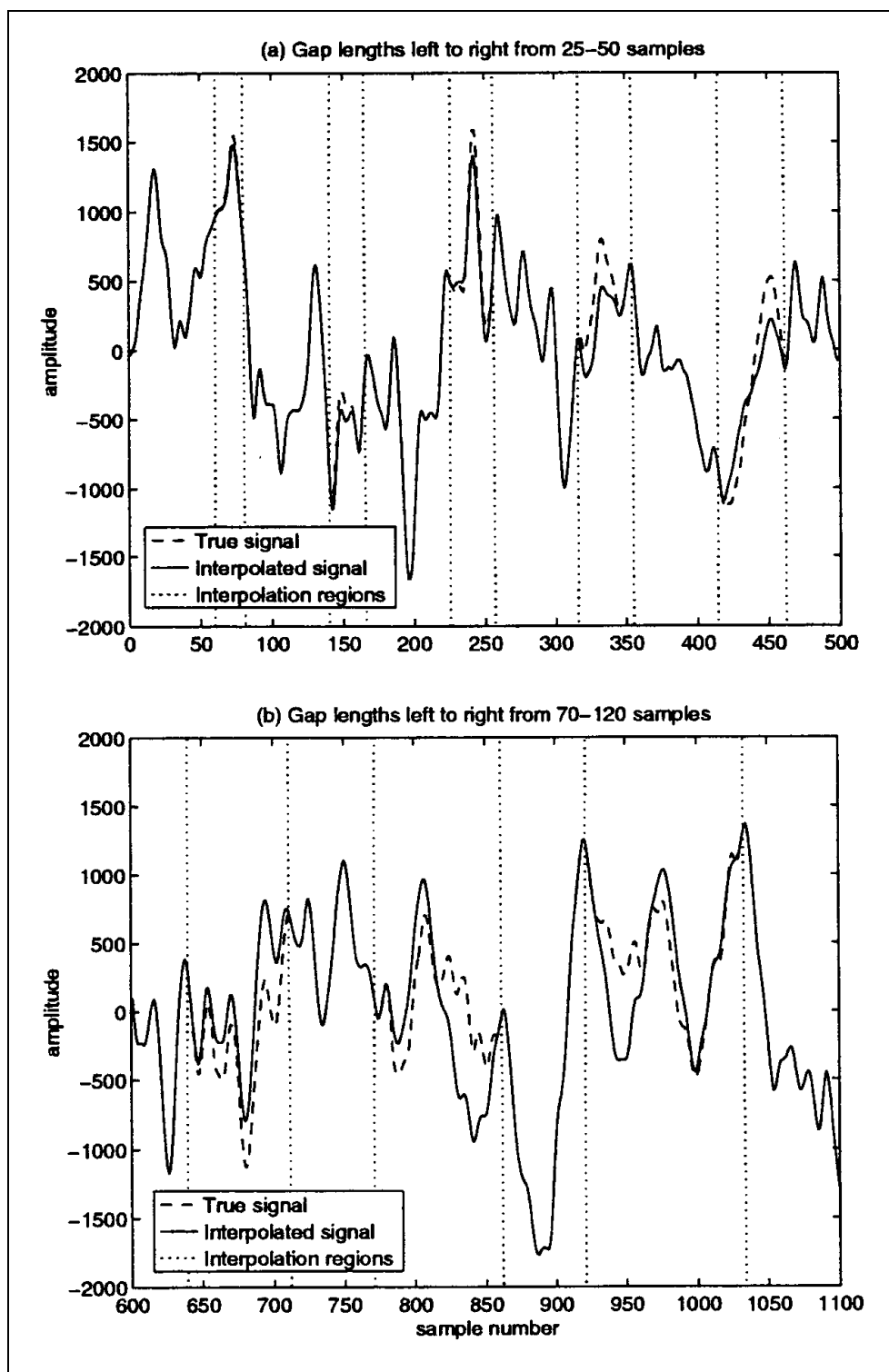


Fig. 1.24: Interpolazione di tipi LSAR.  $P=60$ , musica da camera. (a) brevi click (<50 campioni). (b) click prolungati (70÷120 campioni).

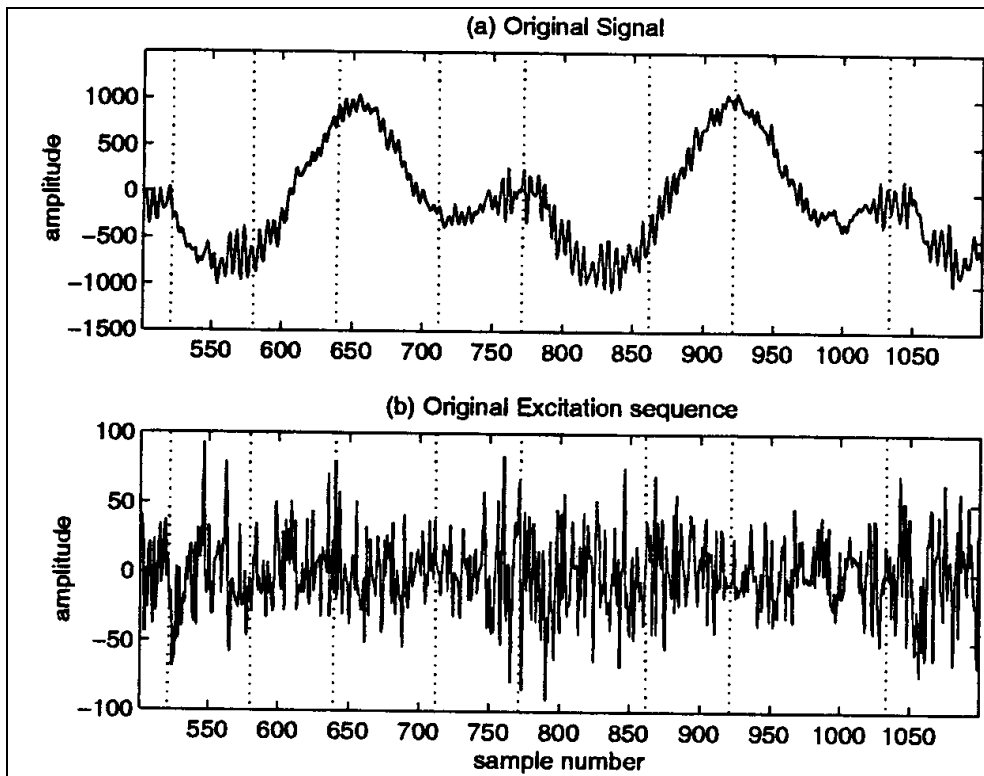


Fig. 1.25: Segnale originale e residuo AR ( $P=100$ ).

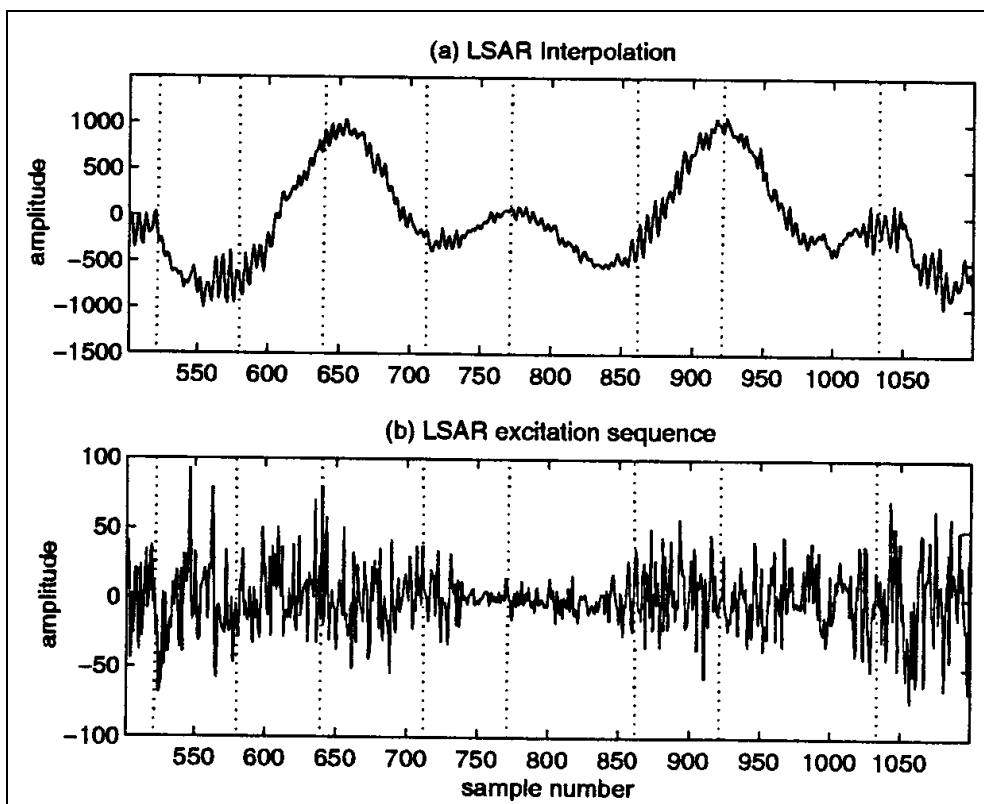


Fig. 1.26: Segnale interpolato (tra il 750° e l'850° campione) e residuo LSAR ( $P=100$ ).

### 1.5.5 Rimozione del Noise Pulse

Un problema comune in molte registrazioni, in particolare nei dischi, è costituito da una sorta di *pulsazione* (pulse) in bassa frequenza. Questa forma di degrado è tipicamente provocata da larghi graffi o da rotture presenti nella superficie del disco. La precisa forma di questo rumore dipende dalle caratteristiche meccaniche ed elettriche del dispositivo di lettura: un esempio abbastanza tipico è comunque riportato in figura 1.27. Si può osservare un'ampia discontinuità, seguita da un esteso transitorio in bassa frequenza. Spesso lo si può trovare sommato al segnale audio (fig. 1.28).

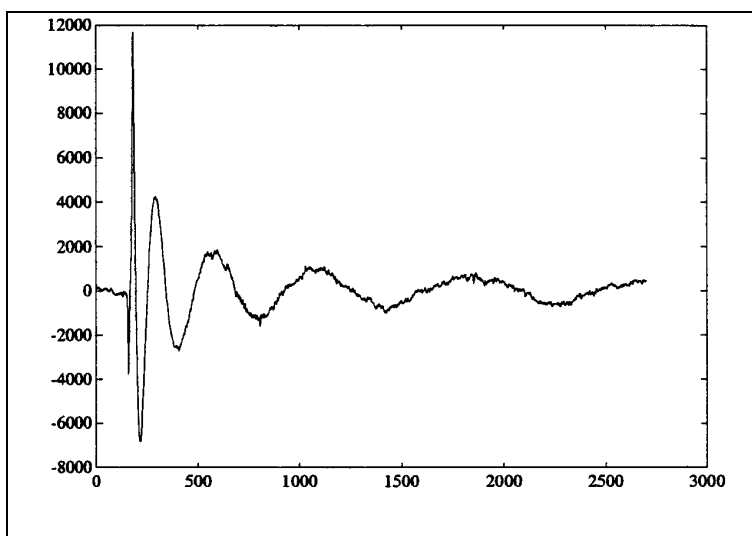


Fig. 1.27: *Noise Pulse* estratto da una sezione di *silenzio*.

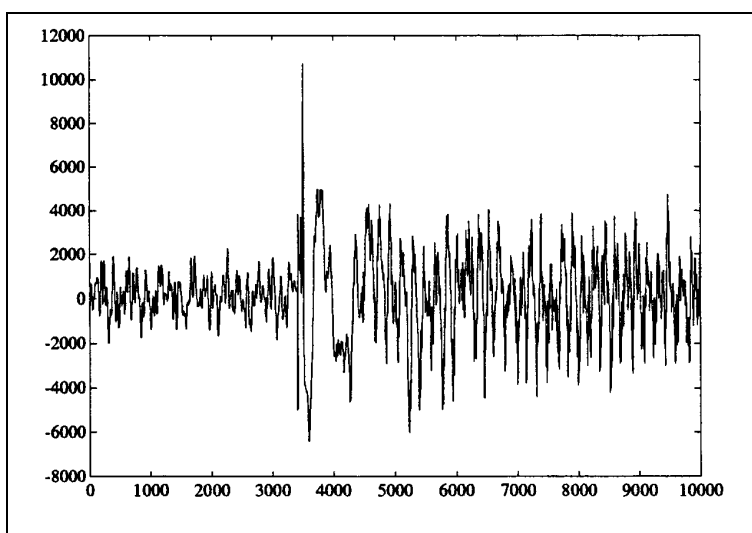


Fig. 1.28: Forma d'onda degradata da un *Noise Pulse*.

Il transitorio in bassa frequenza è causato dalla risposta del sistema di lettura allo stimolo impulsivo provocatogli dalla rottura nella superficie del disco. L'effetto udibile è simile ad un suono percussivo analogo ad un 'pop' o 'thumb'. Questa degradazione è

spesso il disturbo più grave presente negli archivi audio. È necessario quindi eliminarlo come primo passo nel processo di restauro.

Data l'elevata ampiezza temporale del disturbo, non è pensabile impiegare le metodologie di interpolazione sviluppate per i click. Poiché il maggior contenuto spettrale di un *Pulse* è nelle basse frequenze, si potrebbe pensare di utilizzare un filtraggio passa-alto: sfortunatamente, neppure questo sistema è adottabile, poiché la discontinuità presente all'inizio del disturbo ha un contenuto significativo in alta frequenza. Un semplice metodo prevede l'impiego, in cascata, di un filtraggio passa-alto e un'interpolazione per rimuoverne le discontinuità: comunque si è visto che, in questo modo, permangono gravi artefatti e, contemporaneamente, si operano inaccettabili danneggiamenti sul contenuto in bassa frequenza del segnale.

Il problema del *Pulse* può essere aggirato utilizzando un sistema di lettura di buona qualità: ad esempio, nel caso di dischi danneggiati da graffi, l'utilizzo di un lettore ottico eliminerebbe gli effetti provocati dalle risonanze meccaniche, riducendo il disturbo ad un semplice click eliminabile con le metodologie viste in precedenza. Naturalmente questo accorgimento è inutilizzabile quando il supporto originale è andato perduto in seguito ad un riversamento su di un altro supporto, eseguito usando sistemi di lettura standard.

Il miglior approccio al problema del *Pulse* è la tecnica basata sul rilevamento di una *maschera* del disturbo (*template-based*). L'ipotesi è che i vari *Pulse* presenti in una registrazione siano simili tra loro, eccetto per un fattore di scala. 'Fotografando' quindi un *Pulse* in una zona di 'silenzio' (la maschera  $t(n)$ ), è allora possibile sottrarre, dal segnale corrotto  $x$ , una versione opportunamente scalata della maschera del *Pulse*. Il segnale restaurato  $y$  si ottiene quindi come:

$$y(n) = x(n) - Gt(n-M), \quad M \leq n < M + N_t \quad (7)$$

dove  $G$  è il fattore di scala  $M$  è l'istante d'inizio del *Pulse* e  $N_t$  è la lunghezza della maschera. Se dovessero permanere alcuni campioni distorti all'inizio del *Pulse*, si possono rimuovere utilizzando interpolatori di tipo LSAR. Nel caso non comparissero disturbi in zone di 'silenzio', si può ottenere la maschera  $t(n)$  mediando molti *Pulse* tra loro.

Questa tecnica ha sempre raggiunto risultati soddisfacenti nel restauro di archivi composti da dischi. Anche in questo caso, comunque, non si può prescindere dalla competenza del tecnico adibito al restauro: un procedimento automatico sarebbe infatti destinato al fallimento, in quanto l'ipotesi della costanza sul lungo periodo della forma della maschera in molti casi non è verificata. Anche nel caso in cui il *Pulse* sia causato da un graffio radiale spesso la forma del disturbo cambia col ridursi della circonferenza dei solchi del disco. Più complesso è poi il caso di *Pulse* casualmente spazati, ove due *Pulse* particolarmente vicini possono influenzarsi reciprocamente formando maschere dalla forma insolita. Questi effetti sono parzialmente dovuti alla natura tempo-variante del sistema meccanico, quale può essere quello costituito dalla puntina che si muove verso il centro del disco, ed alla non-linearità del sistema di lettura.

### 1.5.6 Riduzione del rumore a larga banda

Il rumore additivo a larga banda è la più comune forma di degrado presente in tutti i sistemi analogici di misura, di archiviazione e di registrazione. Nel caso del segnale audio, il rumore, che viene usualmente percepito dall'ascoltatore come un 'hiss', è prodotto dal motore elettrico del sistema di registrazione, dall'ambiente di registrazione e dal deterioramento del supporto. L'effetto combinato di queste cause viene solitamente trattato in modo univoco dal processo di restauro: va comunque sottolineato che il rumore d'ambiente presente durante la registrazione non dovrebbe essere processato in alcun modo dal restauratore, in quanto facente parte dell'*esecuzione* originale.

Questo rumore, avendo componenti spettrali significative in tutte le frequenze audio (rumore *bianco*), non è in alcun modo eliminabile da procedure di equalizzazione ed è possibile ipotizzarlo stazionario. Nella pratica comune è sempre consigliabile correggere i disturbi di carattere impulsivo, prima di affrontare il *de-noise*, per evitare problemi di sovrastima del rumore.

Molte tecniche sono state sviluppate nel corso degli ultimi decenni per affrontare il problema della riduzione del rumore, spesso derivate dagli algoritmi di elaborazione del parlato. Esula comunque dagli scopi di questo lavoro coprire la storia di queste metodologie: è comunque necessario citare almeno il fondamentale lavoro di Wiener [Wiener 1949], il quale è ancora alla base di molte tecniche di *de-noise*, e l'utilizzo del Filtro di Kalman Esteso (EKF) per la rimozione congiunta dei click e del rumore dal segnale audio modellato come un processo AR. Altre tecniche emergenti [Canazza 1999] utilizzano un modello psicoacustico dell'orecchio umano al fine di sfruttare gli effetti di mascheramento, nel tempo e in frequenza, per rimuovere solamente le componenti di rumore udibili e lasciare così il più possibile inalterato il segnale audio. Si prevede che un aumento delle conoscenze del sistema uditorio renderanno sempre più appetibili questo genere di tecniche.

In questo ambito saranno trattate le tecniche standard basate sull'analisi di tipo Short Time del segnale audio; questi metodi si possono far derivare da un adattamento non-stazionario del filtro di Wiener nel dominio della frequenza e sono largamente i più utilizzati nel restauro audio.

#### 1.5.6.1 Rimozione del rumore utilizzando l'attenuazione spettrale a breve termine

L'insieme di tecniche che vanno sotto il nome di Attenuazione Spettrale a Breve Termine (Short Time Spectral Attenuation, STSA) possiedono la caratteristica di applicare un'attenuazione tempo-variante allo spettro a breve termine del segnale deteriorato e non richiedono la definizione di un modello del segnale;

**Ipotesi.** La figura 1.29 illustra graficamente le ipotesi comuni a tutte le tecniche di tipo STSA. Il segnale degradato  $x(n)$  è supposto essere formato da un segnale non rumoroso  $s(n)$  e da un rumore additivo  $v(n)$ , incorrelato con  $s(n)$ . La conoscenza riguardo il rumore è limitata al fatto di considerare stazionario il segnale  $v(n)$  e a ipotizzare stimabile la sua densità spettrale di potenza, o altro parametro equivalente ad esso. Non si fanno ipotesi sul segnale  $s(n)$ .



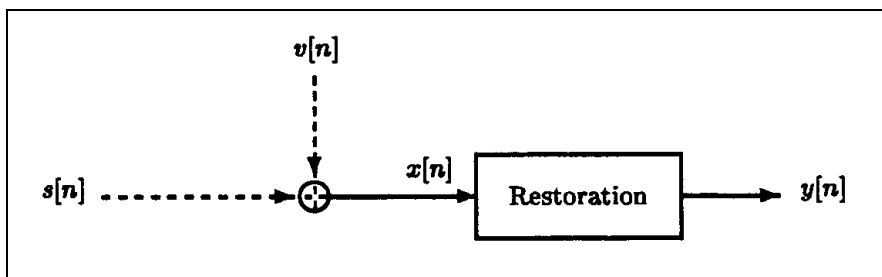


Fig. 1.29: Processo di restauro.

**Algoritmo.** La figura 1.30 mostra lo schema generale della tecnica STSA: il primo passo consiste in un'analisi di tipo Short Time del segnale (equivalente all'utilizzare un banco di filtri), ogni canale (l'uscita di ogni filtro) viene poi opportunamente attenuato con un guadagno positivo e minore di 1 (spectral attenuation) e quindi viene risintetizzato il segnale. Il guadagno tempo-variante applicato ad ogni canale viene determinato da una opportuna regola di soppressione del rumore (*noise suppression rule*), la quale si preoccupa di realizzare una stima, per ogni canale, della potenza di rumore (rappresentato in tratteggio in figura 1.30). È questa regola di soppressione a caratterizzare le diverse tecniche STSA. Generalmente l'analisi Short Time e la corrispondente sintesi del segnale viene eseguita tramite la STFT: in ogni caso le due interpretazioni (banco di filtri e STFT) si possono considerare assolutamente equivalenti.

Per quanto riguarda la frequenza di campionamento della STFT, è opportuno, al fine di evitare aliasing spettrale tra i canali (che potrebbero provocare effetti di distorsione nel segnale restaurato), utilizzare valori due o tre volte più alti della frequenza critica (ovvero con una sovrapposizione tra i successivi frame short-time frame del 50% o 66%).

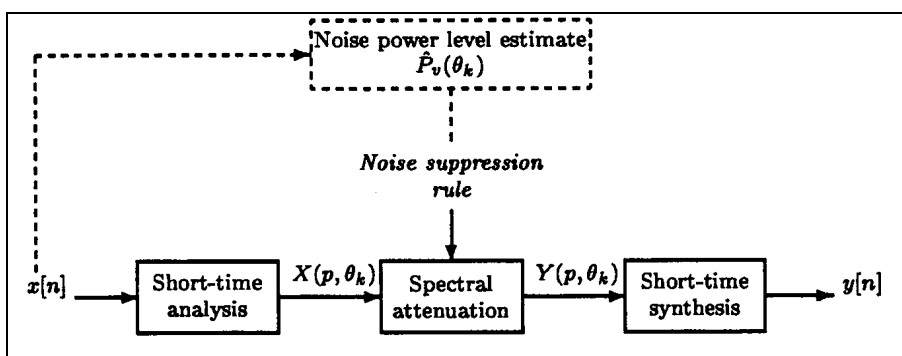


Fig. 1.30: Schema della riduzione del rumore tramite STSA.

**Considerazioni.** Storicamente, la metodologia STSA è stata sviluppata durante gli anni '70, al fine di rimuovere il rumore nel (nella trasmissione del) parlato. Le nuove tecniche STSA per il restauro audio sono un adattamento di queste prime elaborazioni. Tradizionalmente, l'interpretazione come STFT è appunto una nozione derivata dall'analisi del parlato.

Un problema aperto rimane quello della fase: nell'interpretazione STFT, l'attenuazione corrisponde ad una modifica del solo modulo dello spettro short time. È

opinione diffusa che la fase non abbia bisogno di essere processata, a causa delle proprietà psicoacustiche dell'orecchio umano. Invero, la 'insensibilità alla fase' dell'orecchio umano risulta provata solo nel caso di segnali audio stazionari e per la fase della trasformata di Fourier. Al contrario, nel caso della STFT, variazioni di fase tra i successivi frame short-time può provocare effetti udibili (come una modulazione in frequenza). Deve comunque risultare chiaro che nelle classiche tecniche STSA non esiste la possibilità di processare la fase, in quanto non si fa nessuna ipotesi sulle caratteristiche del segnale audio.

**Diffusione.** Le tecniche STSA sono alla base di quasi tutti gli algoritmi utilizzati nel campo del restauro audio. Una delle ragioni che ha contribuito alla diffusione di questo metodo è certamente dovuto all'approccio non-parametrico, che può essere applicato ad una vasta tipologia di segnali. Al contrario, le tecniche specificatamente ottimizzate per il parlato (basate quindi su modelli in grado di ben rappresentare le caratteristiche del parlato), non possono venire generalizzate al campo del restauro audio, data la varietà di sorgenti sonore (strumenti acustici, elettrofoni ed elettronici) esistenti.

Un'altra ragione per il successo di questa metodologia è la loro interpretazione intuitiva: STSA, in pratica, estende ad un grande numero di canali i ben noti sistemi analogici, tramite equalizzazione, per la rimozione del rumore.

**Regola di soppressione.** Sia  $X(p, \theta_k)$  la STFT del segnale rumoroso  $x(n)$ , dove  $p$  è l'indice temporale e  $\theta_k$  l'indice frequenziale (con  $k = 1, \dots, N$  e  $N$  rappresenta il numero di canali della STFT). Sembra opportuno sottolineare che  $p$  si riferisce ad una frequenza di campionamento più bassa di quella utilizzata per il segnale  $x$  (a cui si riferisce la variabile discreta  $n$ ): per quanto riguarda la STFT il fattore di decimazione (*down-sampling*) corrisponde al passo di avanzamento (*hop-size*) tra i successivi frame short-time. Il risultato dell'applicazione della regola di soppressione, può essere interpretata come l'applicazione di un guadagno  $G(p, \theta_k)$  ad ogni valore  $X(p, \theta_k)$  della STFT del segnale rumoroso: tale guadagno corrisponde ad una attenuazione del segnale e dovrà quindi essere limitato tra 0 e 1.

Nella maggior parte delle regole di soppressione,  $G(p, \theta_k)$  viene fatto dipendere solo dal livello della potenza del segnale rumoroso (misurata nel medesimo punto)  $|X(p, \theta_k)|^2$  e sulla *stima* della potenza del rumore alla frequenza  $\theta_k$ ,  $\hat{P}_v(\theta_k) = E\{V(p, \theta_k)^2\}$  (la quale non dipende dall'indice temporale  $p$ , a causa dell'ipotizzata stazionarietà del rumore). È possibile definire a questo punto un segnale relativo  $Q(p, \theta_k) = \frac{|X(p, \theta_k)|^2}{\hat{P}_v(\theta_k)}$ , il quale, dall'ipotesi che il rumore  $v(n)$  non sia correlato al segnale  $s(n)$ , si deduce essere sempre maggiore di 1:

$$E\{Q(p, \theta_k)\} = 1 + \frac{E\{S(p, \theta_k)^2\}}{\hat{P}_v(\theta_k)} \quad (8)$$

Una tipica regola di soppressione si basa sul filtro di Wiener [Wiener 1949] e si può così formalizzare:

$$G(p, \theta_k) = \frac{|X(p, \theta_k)|^2 - \hat{P}_v(\theta_k)}{|X(p, \theta_k)|^2} \quad (9)$$

Altre regole, come la sottrazione di potenza (power-substraction), sono illustrate in [Boll 1979, Oppenheim 1979]. In figura 1.31 sono confrontate le caratteristiche di due regole, in relazione al segnale relativo  $Q(p, \theta_k)$ .

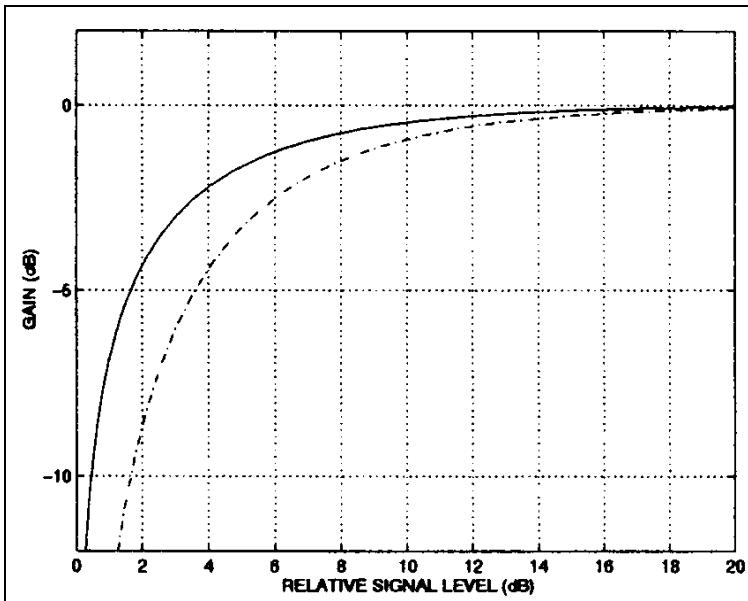


Fig. 1.31: Caratteristiche di due regole di soppressione del rumore. Guadagno  $G(p, \theta_k)$  (in dB) vs. segnale relativo  $Q(p, \theta_k)$  (in dB). Linea continua: sottrazione di potenza. Linea tratteggiata: filtro di Wiener.

Dalla figura 1.31 si può evincere che le regole di soppressione condividono lo stesso comportamento:

1.  $G(p, \theta_k) = 1$ , dove il segnale relativo è alto ( $Q(p, \theta_k) \gg 1$ )
2.  $\lim_{Q(p, \theta_k) \rightarrow 1} G(p, \theta_k) = 0$ . Ovvero il guadagno tende a 0 nel caso sia presente solo rumore (segnale relativo uguale a zero). In questo senso, in alcuni casi si utilizza una sovrastima della potenza di rumore stimata (moltiplicando  $\hat{P}_v(\theta_k)$  per un fattore  $\beta > 1$ ): in questo modo  $G(p, \theta_k)$  sarà nullo non appena si avrà  $Q(p, \theta_k) \leq \beta$ .

Alcune regole di soppressione, più elaborate, dipendono, oltre che dal segnale relativo, da una conoscenza *a priori* del segnale non corrotto (una descrizione statistica della presenza del parlato ovvero un rapporto segnale-disturbo calcolato *a priori* [Ephraim 1984, Canazza 1999]). Al contrario, le regole di soppressione che non richiedono nessuna stima del (della potenza di) rumore, spesso progettate per aumentare

l'intelligibilità del parlato durante una trasmissione, sono difficilmente generalizzabili al caso delle registrazioni musicali, in quanto tendono a generare una distorsione non lineare del segnale.

**Valutazione.** È molto complesso riuscire ad eseguire una valutazione scientifica della regola di soppressione adottata nel restauro di un'opera musicale; a tal fine è necessario utilizzare, come segnale di test, una semplice sinusoida, ovvero un segnale composto da alcune sinusoidi con frequenze lontane tra loro. Questa ipotesi è pertinente, in quanto molti suoni reali si possono descrivere, percettivamente e analiticamente, come somma di sinusoidi. La regola di soppressione deve, in questo caso, lasciare inalterate le bande di frequenza delle sinusoidi di cui è costituito il segnale, attenuando fortemente le altre frequenze. Si noti che se l'ampiezza delle sinusoidi è troppo basso rispetto al rumore, tutte le bande vengono attenuate, con la conseguente cancellazione totale del segnale. In figura 1.32 è mostrato un caso ideale di applicazione di STSA su un segnale composto da un'unica sinusoida.

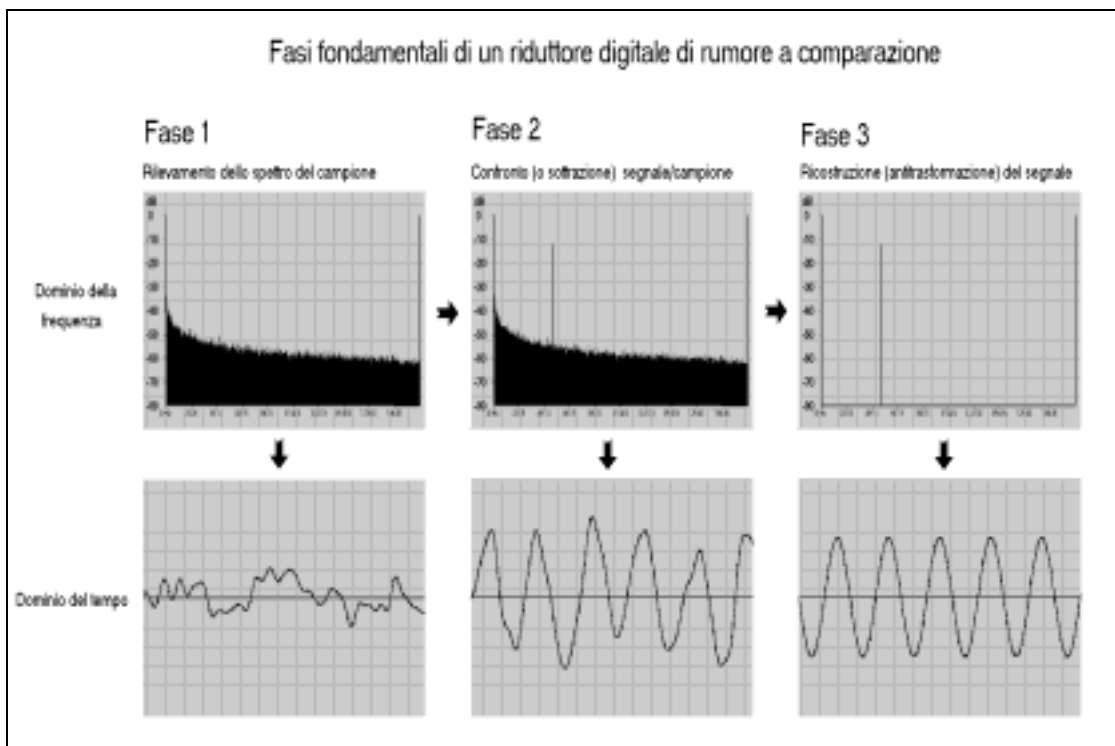


Fig. 1.32: Riduzione del rumore tramite STSA di un segnale composto da una sola sinusoida. Si distinguono le fasi di stima della potenza di rumore, di sottrazione spettrale e di risintesi (antitrasformazione) del segnale.

**Eliminazione di componenti del segnale.** Dalla equazione (8) è semplice ottenere, nel caso di un segnale sinusoidale di frequenza  $\theta$ :

$$E\{Q(p, \theta)\} = 1 + \frac{P_s}{V(\theta)W_\theta} \quad (10)$$

dove  $P_s$  è la potenza della sinusoidale (segnale non rumoroso),  $V(\theta)$  la densità spettrale di potenza del rumore alla frequenza  $\theta$ , e  $W_\theta$  è la larghezza di banda della finestra utilizzata, centrata attorno alla frequenza  $\theta$ . La conseguenza è che **il livello delle componenti di segnale che sono erroneamente cancellate dal processo di restauro aumentano in relazione alla larghezza di banda della finestra. Questa è inversamente proporzionale alla durata temporale della finestra.** Si dimostra [Cappé 1995] che **finestre inferiori ai 40 ms causano la soppressione di componenti udibili** (ovvero non mascherati dal rumore additivo) **del segnale.**

**Componenti di rumore non sopresse.** Il segnale processato può presentare del rumore filtrato localizzato attorno alle componenti del segnale  $s(n)$ : questo fenomeno provoca un grave deterioramento dell'audio, in quanto questo rumore è fortemente correlato al segnale, diversamente dal rumore originale, provocando così indesiderati effetti di modulazione. Esperimenti percettivi (eseguiti al fine di considerare gli effetti di mascheramento tra le diverse componenti) hanno dimostrato che anche in questo caso è opportuno stimare una lunghezza delle finestre della STFT non inferiore a 30÷40 ms.

**Natura casuale dell'attenuazione: il rumore musicale.** La più grave deficienza dei metodi STSA è dovuta al fatto che l'attenuazione applicata è una quantità casuale. Ciò è dovuto al fatto che questa è, in generale, funzione del segnale relativo: questo, a sua volta, è correlato allo spettro del rumore a larga banda, il quale è caratterizzato da una *varianza* (scostamento rispetto alla media) molto alta. Si nota quindi una forte mancanza di correlazione tra i valori di frequenza corrispondenti tra successivi frame (non sovrapposti nel dominio temporale) del segnale relativo (dalla curva a tratteggio di figura 1.33 si evince l'alta varianza dell'evoluzione temporale di  $Q$  ad una fissata frequenza). La conseguenza è che, anche in presenza, al tempo  $p$  ed alla frequenza  $\theta_k$ , di valori non trascurabili della stima di  $Q$  (es.  $E[Q]=8\text{dB}$ ) il valore reale potrebbe essere vicino allo 0 dB (ovvero presenza di solo rumore). Al contrario, anche nel caso di valori attesi di  $Q$  intorno allo 0 dB, potrebbero esistere componenti di segnale non trascurabili. **Non è quindi possibile separare il rumore dalle componenti di segnale di ampiezza modesta.**

Tutte le componenti di rumore che assumono il valore effettivamente stimato (valore atteso), vengono allora correttamente attenuate secondo la regola di soppressione, mentre restano componenti con valore uguale allo scostamento locale dalla media, che assumono la fisionomia spettrale di righe isolate (sinusoidi di frequenza casuale e di durata temporale breve). Questo fenomeno si manifesta percettivamente come brevi fischi o scampanellii a diverse frequenze: per questa sua caratteristica natura è chiamato rumore *musicale* e risulta percettivamente molto fastidioso in quanto, essendo estremamente innaturale, richiama l'attenzione molto più dell'originale rumore a larga banda.

Se si utilizzano regole di soppressione *standard*, l'unico mezzo per eliminare questo fenomeno è effettuare una pesante sovrastima del livello di rumore, provocando, con questo, anche una conseguente cancellazione di componenti di segnale utile. È stato sperimentato che la sovrastima necessaria per ridurre le componenti del rumore musicale a livelli impercettibili (sotto lo 0.1%) può superare i 9 dB.

Un approccio alternativo consiste nel *mascherare* il rumore musicale tramite la presenza di un sufficiente livello di rumore a larga banda. A tal fine, è sufficiente assumere che il rumore da eliminare sia minore di quello effettivamente presente, ovvero attribuendo al guadagno  $G(p, \theta_k)$  solamente valori superiori ad una soglia prefissata (chiamata *noise floor*).

**Regola di soppressione di Ephraim e Malah.** Un interessante sviluppo delle tecniche STSA, progettato al fine di eliminare l'artefatto noto come rumore musicale, è illustrata in [Ephraim 1984, Canazza 1999]. Consiste nel considerare il guadagno  $G(p, \theta_k)$  dipendente da due diverse stime di  $Q$ . La prima, chiamata *SNR a posteriori*, corrispondente alla consueta stima di  $Q$ , la seconda, *SNR a priori*, calcolata su più frame temporali. Quest'ultima consiste in una versione *smussata* (di minore varianza) di  $Q$  e viene utilizzata per il calcolo del guadagno in presenza di sole componenti di rumore. In presenza di segnale ( $Q \gg 0$  dB) viene utilizzata la consueta *SNR a posteriori*. La figura 1.33 illustra la diversa evoluzione temporale di queste due funzioni, in presenza di solo rumore e di segnale.

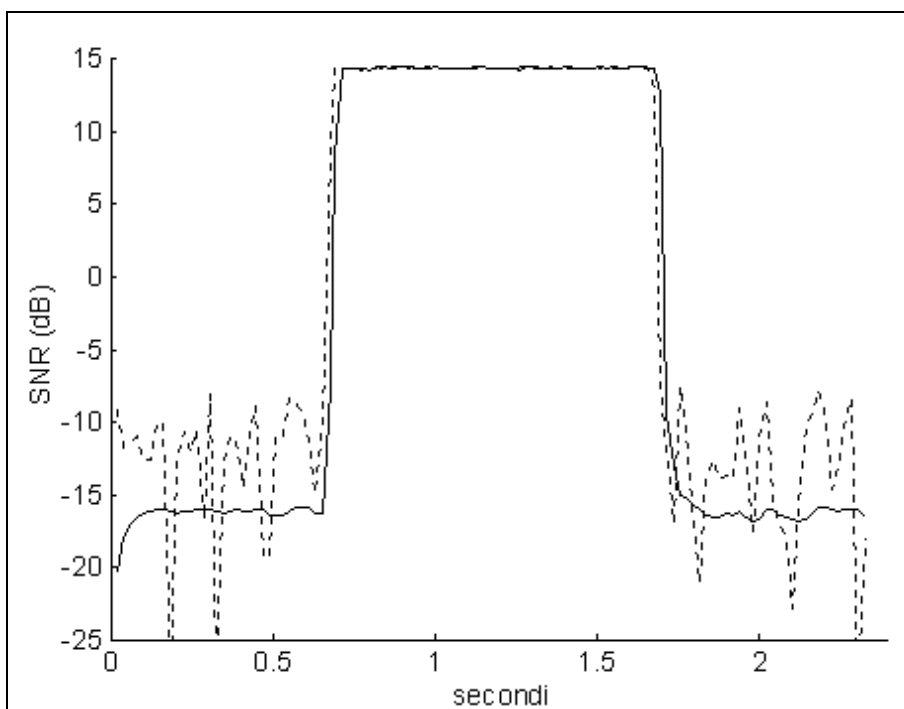


Fig. 1.33: Evoluzione temporale del *SNR a priori* (curva continua) e del *SNR a posteriori* (curva a tratteggio) per una fissata frequenza. Si noti il comportamento *smussato* (*smoothed*) della prima. Utilizzando questo tipo di funzione, si evita l'insorgere del rumore musicale.

### 1.5.7 Correzione del pitch

Una forma di degrado comunemente presente nei dischi e nei nastri è una variazione di pitch (definito come la frequenza della fondamentale) non presente nella esecuzione

originale. In questo contesto vengono utilizzati i termini *wow* e *flutter*: *wow* si riferisce a variazioni di pitch a lungo termine, *flutter* a veloci variazioni analoghe ad un effetto di tremolo. Effetti di *wow*, in particolare, si riscontrano spesso nei riversamenti eseguiti da vecchi dischi analogici, dovuti a variazioni di velocità di rotazione del dispositivo di lettura, ovvero ad una eccentricità del supporto (disco o cilindro), generata, ad esempio, da una posizione del foro leggermente fuori centro. Nei casi in cui non è possibile eseguire una correzione del supporto fisico (in quanto si possiede solo un riversamento e non il supporto originale) è necessario ricorrere a tecniche numeriche di elaborazione del segnale.

Il meccanismo con cui si genera un effetto di *wow* e *flutter* è equivalente ad una contrazione non uniforme (*warping*) dell'asse temporale. Se  $s(t)$  è il segnale non deteriorato e  $f_w(t)$  la funzione di warping, allora il segnale distorto si può scrivere come:

$$x(t) = s(f_w(t)) \quad (11)$$

supposta nota la funzione di warping  $f_w()$ , è allora possibile rigenerare il segnale  $s(t)$  come:

$$s(t) = x(f_w^{-1}(t)) \quad (11)$$

È chiaro quindi che il problema si riduce alla stima della funzione di warping. Se sono conosciuti i processi fisici che determinano le fluttuazioni di pitch è possibile ottenere una descrizione *esatta* di  $f_w()$ , altrimenti è necessario stimarla dai dati degradati  $x(t)$ . Si veda [Godsill 1998] per ulteriori dettagli.

### 1.5.8 Riduzione delle distorsioni non-lineari

Esistono molti esempi di registrazioni audio affette da distorsioni non-lineari di ampiezza. Queste possono essere causate da:

- Non linearità nell'amplificazione
- Distorsioni di cross-over negli amplificatori in classe B
- Saturazioni del nastro dovute a sovra-incisioni: l'utilizzo di un livello troppo elevato di registrazione provocherebbe invece un effetto di *clipping* nel segnale
- Nei dischi analogici, una differenza tra il percorso tracciato dalla puntina di incisione e quello seguito dalla puntina del sistema di lettura
- Deformazione dei solchi presenti nella superficie dei dischi; l'azione della puntina di lettura, può provocare deformazioni elastiche o permanenti dei solchi.

In questo caso, il problema del restauro riguarda la definizione di un modello non-lineare e l'applicazione del suo inverso al segnale degradato, al fine di ottenere il segnale non distorto. Nel caso si abbia a disposizione il sistema che ha causato la distorsione, si può dedurre la funzione non-lineare di trasferimento applicando un segnale noto al sistema ed analizzando il segnale di uscita. Se, come accade spesso, si dispone solo del segnale distorto, è necessario ipotizzare un modello che approssimi il processo di distorsione. A tal fine è possibile utilizzare Serie di Volterra o modelli di tipo Non-linear AutoRegressive Moving Average (NARMA) [Godsill 1998]. Si sottolinea, comunque, che appare assolutamente non banale sia la stima dei parametri del modello quanto l'aspetto computazionale.

## 1.6 Conclusioni

È stato definito restauro audio come la compensazione delle alterazioni non intenzionali subite dal segnale audio a causa delle imperfezioni dei sistemi di registrazione, del frequente uso del supporto o del deterioramento chimico-fisico di questo.

Poiché le diverse tipologie di deterioramento sono correlabili alla natura del supporto e alle diverse tecnologie di registrazione, sono state brevemente riassunte le differenze tra il processo di registrazione di un disco analogico, di un compact disc e di un nastro, e i possibili deterioramenti di questi supporti. Si sono quindi passate in rassegna le tecniche più utilizzate per la rimozione dei disturbi più diffusi.

Si desidera sottolineare di nuovo alcune problematiche a carattere filologico legate al processo di restauro. Nella produzione di una registrazione audio, soprattutto nel campo della musica elettroacustica, si utilizzano spesso suoni con caratteristiche fisiche analoghe al rumore (particolari suoni di sintesi o rumori campionati); inoltre possono esistere delle imperfezioni realizzative che sono comunque state approvate dall'autore (ad esempio, l'inserimento di rumori durante la sintesi di suoni, a causa di inadeguatezze dei sistemi di filtraggio utilizzati). Tutto ciò rende impraticabile un restauro *automatico* di un'opera musicale: è quindi **necessario** che il restauratore intraprenda una esaustiva ricerca musicologica dei processi realizzativi della composizione musicale in questione e, contemporaneamente, sia a conoscenza delle metodologie scientifiche necessarie alla rimozione dei diversi disturbi, al fine di sapere, quantomeno, guidare il tecnico durante il processo di restauro.



## Bibliografia

- Boll S.F. 1979. "Suppression of acoustic noise in speech using spectral subtraction." *IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Processing*, 27(2): 113-120.
- Box G.E.P., Jenkins G.M. 1970. *Time series analysis, forecasting and control*. Holden Day.
- Camras M. 1988. *Magnetic Recording Handbook*. New York:Van Nostrand Reinhold Company.
- Canazza S., De Poli G., Maesano S., Mian G.A. 1999. "On the performance of a noise reduction technique, based on a psychoacoustic model for restoration of old audio recordings." *Proc. of 2nd international congress on: Science and technology for the safeguard of cultural heritage in the mediterranean basin*. Parigi.
- Cappé O., Laroche J. 1995. "Evaluation of Short Time Spectral Attenuation techniques for the restoration of musical recordings." *IEEE Trans. on Speech and Audio Processing*, 3(1): 84-93.
- Ephraim Y., Malah D. 1984. "Speech enhancement using a minimum mean-square error short time spectral amplitude estimator." *Trans. Acoustic., Speech, Signal Processing*, 32(6): 1109-1121.
- Gerbrands J.J. 1981. "On the relationship between the SVD, KLT and PCA". *Pattern Recognition*, 14(1): 375-381.
- Godsill S.J., Rayner P.J.W., Godsill S.H. 1998. *Digital Audio restoration: a statistical model based approach*. Springer Verlag.
- Haddad R.A., Akansu A.N. 1992. *Multiresolution signal decomposition*. Academic Press.
- Huber P.J. 1981. *Robust statistics*. Wiley and Sons.
- McAuley R.J., Quatieri T.F. 1986. "Speech analysis/synthesis based on a sinusoidal representation." *IEEE Trans. Acoustic, Speech, Signal Processing*, ASSP-34(4): 744-754.
- Oppenheim A.V., Lim J.S. 1979. "Enhancement and bandwidth compression of noisy speech". *Proc. IEEE*, 67(12): 1586-1604.
- Schuller D. 1991. "The ethics of preservation, restoration and re-issues of historical sound recordings.", *J. Audio Engineering Society*, 39(12): 1014-1016.
- Vaseghi S.V., Rayner P.J.W. 1990. "Detection and suppression of impulsive noise in speech communications systems." *IEEE Proc. Part I*, 137(1): 38-46.
- Vidolin A. 1992. "La conservazione e il restauro dei beni musicali elettronici.", *Le fonti musicali in Italia: studi e ricerche*, pp. 151-168.
- Wiener N. 1949. *Extrapolation, interpolation and smoothing of stationary time series with engineering applications*. MIT Press.