

CAPITOLO 1

PROPRIETÀ FISICHE DELL'ACUSTICA GENERALE

1.1 Introduzione

Qualunque misura acustica, per quanto complessa, è sostanzialmente riconducibile alla valutazione quantitativa di una sola grandezza fisica, la pressione sonora o acustica, cioè di quella infinitesima perturbazione dinamica che la propagazione dell'onda apporta alla pressione statica a riposo nel mezzo.

La velocità di propagazione dell'onda acustica, nei solidi, dipende dal modulo di elasticità del materiale, modulo di Young, E , e dalla sua densità, ρ , secondo la relazione

$$c = k \sqrt{E/\rho} \quad [\text{m/s}] \quad [1.1a]$$

da cui si ricava che la propagazione delle onde è molto più rapida in mezzi con un elevato modulo elastico e bassa densità.

La velocità di propagazione dell'onda acustica, per i gas perfetti, dipende dall'indice adiabatico K , dalla pressione P e dalla densità del gas, ρ , secondo la relazione

$$c = \sqrt{\frac{k \cdot P}{\rho}} \quad [\text{m/s}] \quad [1.1b]$$

Per l'aria vale la seguente relazione empirica in cui compare la temperatura in quanto da essa dipende la velocità:

$$c = 331.4 + 0.6 T \text{ } ^\circ(\text{C } ^\circ) \quad [\text{m/s}] \quad [1.2]$$

Nelle seguenti tabelle riportiamo la velocità del suono in vari mezzi.

Gas		
Mezzo	Temperatura C°	Velocità m/sec
Aria 1 Atm	0	331
Aria 100 Atm	0	351
Aria 1 Atm	100	386
Aria 1 Atm	1000	700
CO ₂	0	258
H ₂ O vapore	100	405

Tabella 1- 1

Liquidi		
Mezzo	Temperatura C°	Velocità m/sec
H ₂ O	9	1435
H ₂ O salato	15	1550
Alcol 95%	13	1241

Tabella 1- 2

Solidi		
Mezzo	Temperatura C°	Velocità m/sec
Cu	20	3560
Fe	20	5130
Zn	20	2500
Granito	420	5000

Tabella 1- 3

Si può caratterizzare la pressione sonora considerandone il valore efficace

$$p_{\text{RMS}} = \frac{1}{T} \sqrt{\int p^2 dt} \quad [1.3]$$

dove T è il tempo di integrazione

Quando si deve analizzare un segnale complesso come un rumore è necessario analizzarne il contenuto in frequenza, per poterne ricavare informazioni utili sull'origine dell'emissione.

La frequenza, f, è la misura fisica del numero di oscillazioni nell'unità di tempo, misurata in Hertz [Hz] ovvero in cicli per secondo.

Il periodo, T, inverso della frequenza, si misura in secondi e rappresenta il tempo necessario affinché le particelle compiano localmente un'oscillazione completa.

La lunghezza d'onda λ è la distanza percorsa da un'onda durante un'oscillazione completa.

Nel mezzo di propagazione si hanno variazioni di densità e di pressione p, funzioni del tempo e dello spazio :

$$\Delta\rho = \Delta\rho (x, t)$$

$$\Delta p = \Delta p (x, t)$$

A seguito della perturbazione sonora la variazione di pressione produce un valore della pressione pari a :

$$P(x, y, z, t) = p_0 + p(x, y, z, t) \quad [1.4]$$

dove p_0 è il valore della pressione in condizione indisturbata, mentre p rappresenta la variazione dovuta al fenomeno acustico.

Generalmente risulta $p \ll p_0$ e quindi si possono trascurare i termini di ordine superiore al 1°.

Le trasformazioni subite dall'aria possono considerarsi adiabatiche, perché le variazioni prodotte dalla pressione sonora producono nell'aria effetti così rapidi da non causare scambio di calore.

La rappresentazione più comune dei fenomeni acustici avviene come evoluzione della pressione sonora in funzione del tempo, ossia nel dominio del tempo.

Nella diagnostica relativa allo studio dell'integrità degli organi meccanici, è importante ricorrere anche all'analisi spettrale, ovvero all'analisi nel dominio delle frequenze, in quanto, tale tipo di analisi, permette di confrontare le frequenze caratteristiche dei possibili difetti che si possono generare, con le frequenze che effettivamente vengono rilevate.

Il diverso tipo di fenomeno fisico che sta alla base dell'analisi acustica, richiede l'utilizzo di sensori diversi: i microfoni per l'analisi del rumore ed i sensori acustici per l'analisi delle onde elastiche.

1.2 AE: MICROFONI

1.2.1 Introduzione

L'utilizzo dei microfoni, in diagnostica, risente dei fenomeni di riflessione e di riverberazione e del rumore prodotto da altre sorgenti acustiche, che sporcano il segnale acquisito dal microfono.

Tali problemi possono venir risolti eseguendo le misure in ambienti particolari, come camere con riverbero o camere anecoiche, ma ciò comporta un aumento notevole di costi e complessità ed inoltre le rilevazioni eseguite non sono riproducibili in un impianto industriale reale.

La pressione sonora rilevata dal microfono nell'ambiente test è il risultato della somma di alcune componenti che vanno a formare il suono totale: il suono diretto (suono prodotto dalla sorgente sonora), il suono riflesso (suono dipendente dalla presenza di pareti) e la componente di suono derivante dalla riverberazione del suono nell'ambiente test.

Il problema del microfono è, dunque, la ricezione di un gran numero di informazioni, oltretutto molto confuse come illustrato nella figura 1.1 dove il microfono riceve il rumore prodotto da tutti i pannelli della scatola motore (gearbox).

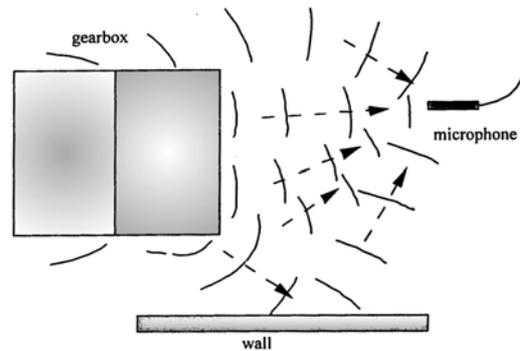


Figura 1- 1(DA [22])

La velocità del suono nell'aria, relativamente bassa, se comparata con la velocità del suono nell'acciaio (300 m/s rispetto ai 5000 m/s), può creare interferenza tra le onde stesse.

Quando due onde sonore si incontrano, esse si sovrappongono in maniera tale che l'onda sonora risultante è la somma delle due onde. Questo fenomeno si chiama **interferenza**.

Se le onde hanno la stessa frequenza e sono in fase, l'ampiezza dell'onda risultante è la somma delle ampiezze, dando luogo all' **interferenza costruttiva**.

Quando invece le due onde sono sfasate di mezzo periodo, le ampiezze si sottraggono; abbiamo così l' **interferenza distruttiva**.

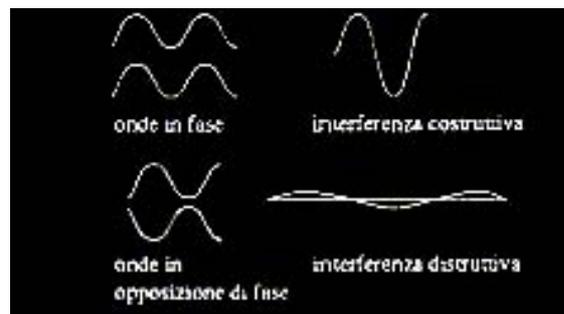


Figura 1- 2

A tale problematica può aggiungersi il fatto che le riflessioni prodotte dalle superfici di altre macchine o di pareti troppo vicine confonderebbero ancor di più le misurazioni.

In effetti le onde prodotte da una sorgente sonora, fisicamente, si espandono in tutte le direzioni, e quando incontrano una parete, la loro direzione cambia, ovvero le onde vengono riflesse(fig.1.3).

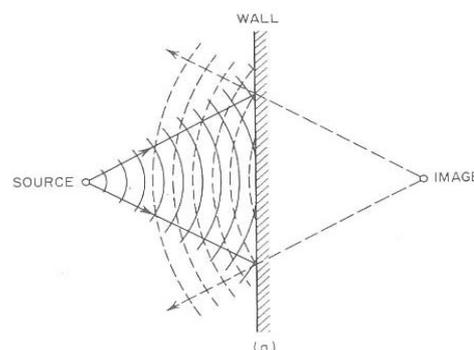


Figura 1- 3 (DA [4])

L'effetto è tale che è come se un'altra sorgente producesse onde sonore in un punto opposto, rispetto alla parete, alla vera sorgente.

Se la superficie del muro fosse perfettamente rigida e non porosa, allora la riflessione non produrrebbe alcuna perdita di energia acustica, con la conseguenza che le onde riflesse produrrebbero lo stesso livello di pressione sonora.

In realtà ciò non accade mai, se non in particolari ambienti, e l'angolo di riflessione, inoltre, dipende dalla dimensione caratteristica della parete (fig.1-4). Se infatti la lunghezza d'onda dell'onda sonora incidente non è comparabile con tale dimensione, l'angolo di riflessione non è uguale all'angolo di incidenza.

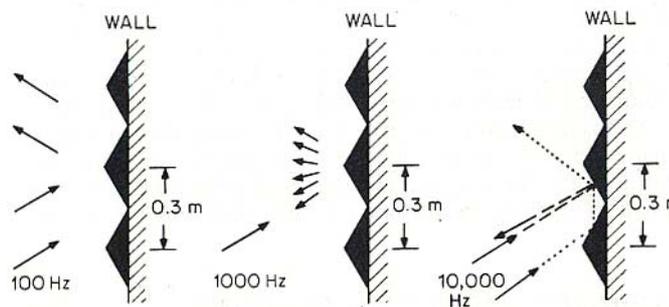


Figura 1- 4(DA [4])

Al fenomeno della riflessione occorre aggiungere quello della riverberazione, in quanto anche un'analisi molto semplificata delle onde riflesse in una stanza rettangolare, mostra come la stanza presenti una infinità di sorgenti virtuali che continuano ad emettere energia sonora, anche quando la sorgente è stata fermata, ovvero l'energia sonora non si esaurisce quando viene fermata la sorgente, in quanto entra in gioco il fenomeno fisico della riverberazione, che produce un prolungamento nel tempo del suono.

Per quantificare in un qualche modo tali fenomeni si definiscono alcuni coefficienti.

Il coefficiente di assorbimento del suono è la frazione di energia acustica assorbita quando l'onda sonora colpisce una superficie e dipende dal materiale e dalle frequenze del suono che colpiscono il materiale stesso.

L'assorbimento totale del suono, A_{ss} in una stanza viene definito come la somma dell'assorbimento dovuto alle varie superfici presenti nella stanza, A_{ss_sup} , dell'assorbimento dell'aria, A_{ss_aria} e dell'assorbimento delle attrezzature, A_{ss_attr} presenti:

$$A_{ss} = A_{ss_superf.} + A_{ss_aria} + A_{ss_attrezz.} \quad [1.4]$$

L'unità di misura dell'assorbimento è il sabin; nel sistema SI 1 metro sabin corrisponde ad 1 m² di una perfetta superficie assorbente (una superficie S di 10 m² che ha un coefficiente di assorbimento di 0.65 ha un assorbimento totale di 6.5 metri sabin).

L'assorbimento dovuto alle superfici viene dato dalla somma delle singole superfici moltiplicate per il rispettivo coefficiente di assorbimento:

$$A_{ss_superf.} = \alpha_1 S_1 + \alpha_2 S_2 + \dots + \alpha_n S_n \quad [1.5]$$

L'assorbimento dovuto all'aria è dato da :

$$A_{ss_aria} = 4 M_{att} \cdot V \quad [1.6]$$

dove M_{att} è il coefficiente di attenuazione dell'aria che dipende dall'umidità, dalla temperatura della stessa aria, e dalla frequenza in esame e V è il volume della stanza in m³.

La riverberazione contribuisce al livello sonoro in una stanza. A tale scopo si definisce il tempo di riverberazione il tempo necessario affinché il livello sonoro medio di una stanza decresca di 60 dB dopo che la sorgente è stata arrestata:

$$T_{60} = 0.161 \frac{V}{A} \text{ [sec]} \quad [1.7]$$

con V ed A che indicano rispettivamente il volume e l'area, in m², della stanza.

1.2.2 Livello di pressione sonora del suono diretto

Il livello di pressione sonora del suono diretto, cioè del solo suono prodotto dalla sorgente, è dato da:

$$SLP_d = SLP_w - 20 \cdot \log_{10} r - 10.9 \text{ [dB]} \quad [1.8]$$

dove r è la distanza dalla sorgente in metri, mentre SLP_w è il livello della pressione sonora della sorgente in re 1 pW (re è una indicazione tipica in campo acustico, ed indica il valore di riferimento con cui si forniscono ad esempio le carte di calibrazione, mentre pW indica 10⁻¹² Watt).

A seconda della posizione della sorgente rispetto alle superfici della stanza occorre introdurre un fattore aggiuntivo. In particolare non si adotta alcuna correzione se la sorgente dista più di

1 m da qualsiasi superficie, una correzione di 3 dB se la sorgente è prossima ad una superficie fino ai 9 dB per una sorgente posta in un angolo della stanza vicino al pavimento.

1.2.3 Livello di pressione sonora del suono riflesso

Il livello di pressione sonora del suono riflesso, ossia del suono non prodotto dalla sorgente, è dato da:

$$SLP_r = SLP_w - 10 \cdot \log_{10} A_{ss} + 6 \quad [dB] \quad [1.9]$$

dove si è ipotizzato un campo sonoro perfettamente diffuso, un campo in cui la probabilità che le onde siano riflesse in tutte le direzioni è la stessa.

Consideriamo una sorgente posta in una stanza a condizioni diffuse con $SLP_w = 100$ dB di con un $A_{ss} = 20$ metri sabin, allora il valore medio del livello di pressione sonora riflessa sarà pari a $SLP_r = 100 - 10 \cdot \log_{10} 20 + 6 = 93$ [dB]

1.2.4 Livello di pressione sonora del suono totale (diretto + riflesso)

Misurati i valori di SLP_r e SLP_d , tramite l'abaco di fig.1-5 si ottiene il valore del parametro K in dB da aggiungere al valore di SLP_r o al valore di SLP_d , a seconda di quale tra i due livelli di pressione sia maggiore, per ottenere il valore del livello di pressione sonora risultante SLP_p :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{se } SLP_r > SLP_d \quad SLP_p = SLP_r + K \\ \text{se } SLP_d > SLP_r \quad SLP_p = SLP_d + K \end{array} \right. \quad [dB]$$

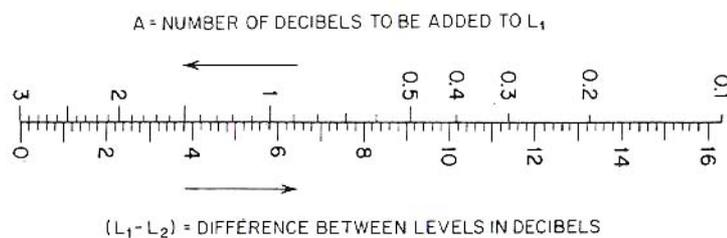


Figura 1- 5 (DA [4])

Se valutiamo $SLP_w - SLP_p$ in funzione della distanza r dalla sorgente(fig.1-6), in condizioni diffuse, si nota come l'importanza del suono diretto diminuisca allontanandosi dalla sorgente.

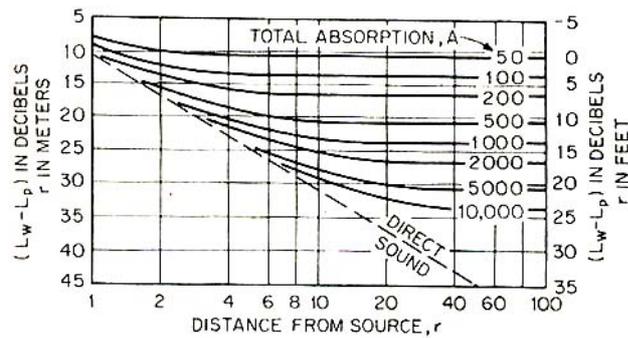


Figura 1- 6 (DA [4])

1.3 STRUMENTAZIONE MICROFONICA

1.3.1 PRINCIPI DI FUNZIONAMENTO DEI MICROFONI

Il trasduttore che permette di misurare la pressione acustica convertendola in tensione viene denominato microfono.

Il microfono è costituito da una parte meccanica, la membrana, che viene posta in movimento dalle variazioni di pressione caratteristiche di una perturbazione acustica, suono e rumore, e da un sistema che trasforma tale movimento in variazioni di una determinata grandezza elettrica.

I microfoni da misura sono in genere del tipo a condensatore, ovvero strumenti che realizzano la trasformazione della grandezza acustica in una grandezza elettrica corrispondente per mezzo della variazione di capacità.

Tale tipo di microfono è costituito da una membrana metallica sottile e da una placca posteriore rigida: essi insieme costituiscono un vero e proprio condensatore in cui il dielettrico è l'aria.

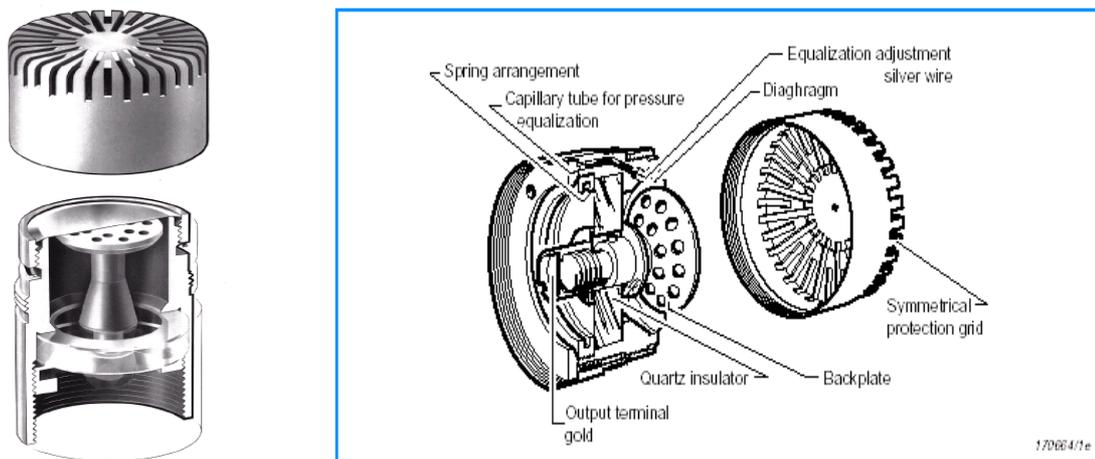


Figura 1- 7(da [59])

Sono generalmente del tipo a polarizzazione separata, cioè il campo elettrico viene creato da una differenza di potenziale fornita dall'esterno.

Applicando agli elettrodi tale differenza di tensione e sottoponendo il microfono ad un campo acustico, le vibrazioni di pressione sonora agenti sulla membrana causeranno una variazione della distanza tra la membrana stessa e l'elettrodo posteriore, determinando una variazione di capacità che a sua volta causa la variazione elettrica.

Le principali caratteristiche che definiscono le prestazioni di un microfono sono:

1. Sensibilità: valore del fattore di traduzione espresso in millivolt generati per Pa di pressione acustica incidente; tanto più è alta la sensibilità tanto più è piccolo il valore minimo di pressione che lo strumento misuratore riesce a percepire sotto forma di tensione elettrica;

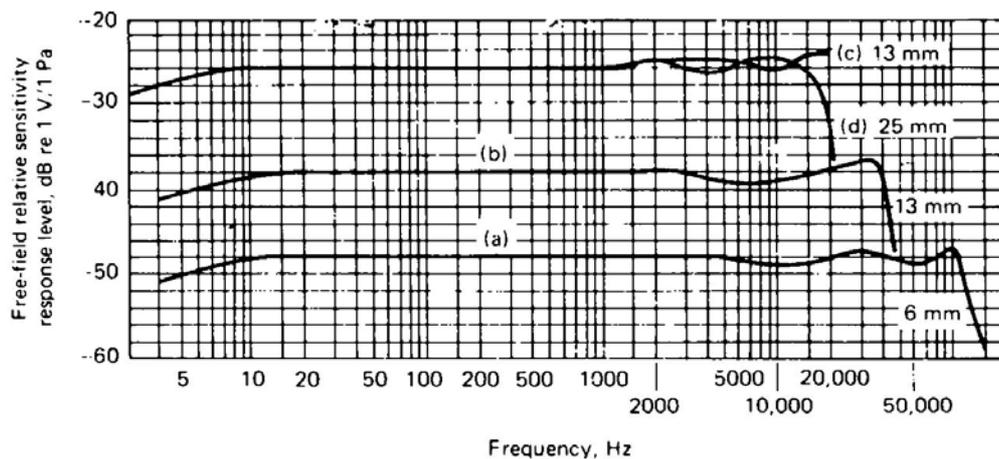


Figura 1- 8(da [4])

2. Rumore di fondo: rumore generato in assenza di pressione acustica, espresso in millivolt equivalenti o in dB di livello di pressione sonora equivalente. Parametro caratteristico del microfono e dello stadio di preamplificazione;
3. Risposta in frequenza: variazione della sensibilità con la frequenza, ovvero si determina la gamma di frequenza in cui la conversione del segnale acustico in segnale elettrico avviene senza che i rapporti di ampiezza pressione/tensione vengano alterati;

4. Caratteristica di direttività: variazione della sensibilità con l'angolo di incidenza del fronte d'onda;

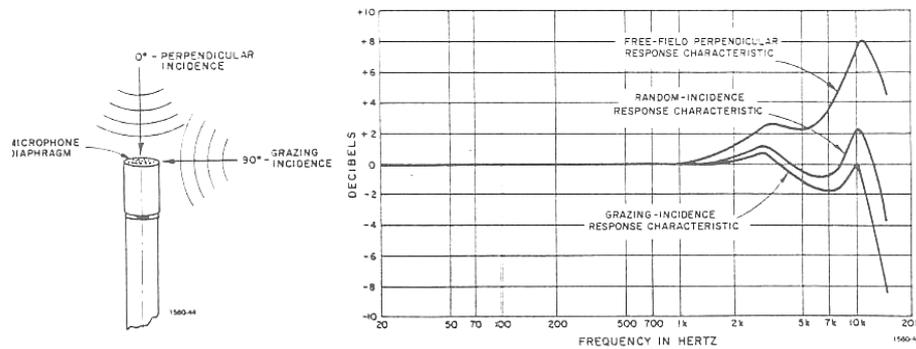


Figura 1-9 (da [3])

5. Massimo livello di pressione sonora misurabile: valore oltre il quale si ha l'insorgere di distorsione o danni irreversibili al microfono;
6. Campo dinamico: è costituito dalla differenza tra il massimo livello di pressione sonora misurabile ed il livello equivalente del rumore di fondo.

I microfoni di misura sono progettati per presentare una risposta lineare con la frequenza, cioè con una sensibilità costante al variare della frequenza, in una delle tre condizioni di utilizzazione:

- a) Campo libero con fronte d'onda piano;
- b) Campo diffuso;
- c) In pressione.

La differenza tra le ultime due risposte è molto piccola, mentre con la risposta in campo libero la differenza si rileva già a partire da frequenze dell'ordine di 1 kHz per i microfoni da 1" e dell'ordine di 2 kHz per microfoni da 1/2".

I microfoni progettati per il campo libero presentano un diverso comportamento tra un campo ad onde piane che incidono parallelamente alla membrana e un campo acustico diffuso principalmente a causa dell'effetto di diffrazione del suono intorno al corpo stesso del microfono, perché il microfono perturba il campo in cui è posto.

A partire dalla frequenza per cui la lunghezza d'onda, $\lambda = c/f = cT$, è comparabile con le sue dimensioni, la pressione acustica sulla membrana non è più uniforme e produce l'alterazione della risposta in frequenza.

I microfoni vengono forniti con la carta di calibrazione in cui si riporta la risposta in frequenza del microfono ed i dati caratteristici relativi alla sensibilità, al fattore correttivo k, alla capacità del microfono, unitamente alle condizioni di calibrazione.

Generalmente tali dati sono forniti in [dB] riportando il valore di riferimento, indicato con P_{re} , ed in particolare la risposta di un microfono viene valutata all'interno di range di ± 2 dB e ± 5 dB, facendo riferimento a $P_{re} = 20 \mu Pa$, in quanto un Pascal corrisponde a 94 dB di SPL.

$$SPL = 20 \cdot \log_{10} \frac{P_{misurata}}{P_{re}} = 20 \cdot \log_{10} \frac{1}{20 \cdot 10^{-6}} = 94 \text{ [dB]} \quad \text{con } P_{re} = 20 \mu Pa. \quad [1.10]$$

Quindi per conoscere il valore della pressione misurata dal microfono, espressa in Pascal, è sufficiente eseguire l'operazione inversa:

$$\text{Pressione [Pa]} = 10^{\frac{SPL}{20}} \cdot 20 \cdot 10^{-6} \quad [1.11]$$

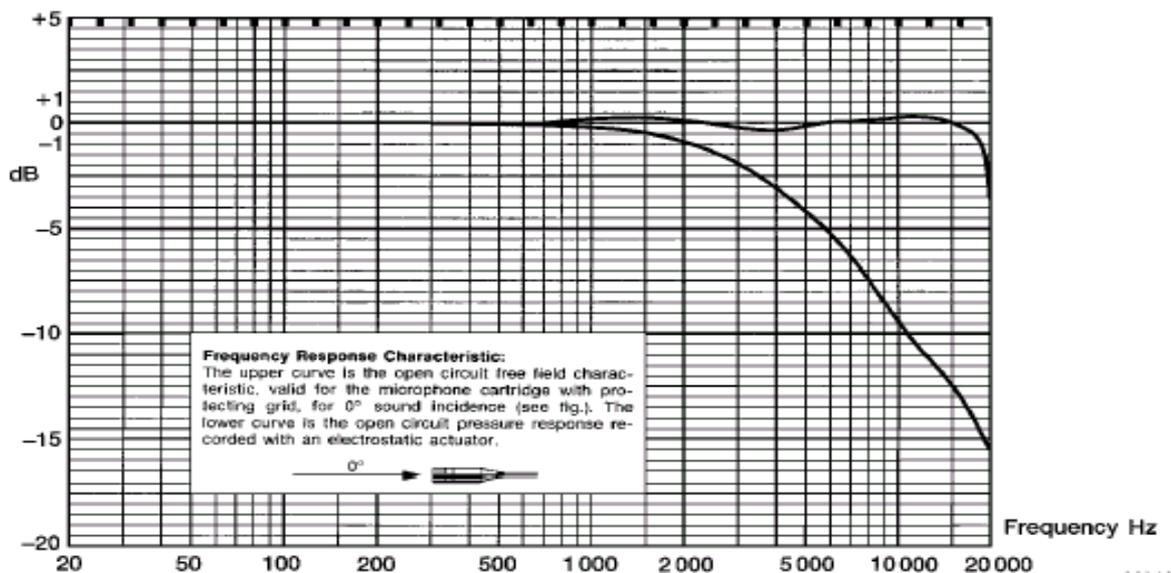


Figura 1- 10 Esempio di Carta di Calibrazione microfono B&K tipo 4133(da [59])

La diffrazione inoltre produce la variazione della sensibilità del microfono con l'angolo di incidenza dell'onda di pressione acustica, effetto fortemente dipendente con la frequenza e particolarmente sensibile a partire dalle frequenze la cui lunghezza d'onda è dell'ordine delle dimensioni del microfono.

Esempio

Diametro microfono $d = 12.5 \text{ mm } (\frac{1}{2}'')$

Lunghezza d'onda $\lambda = c/f = 330000 \text{ mm/sec} / 12500 \text{ Hz} = 26.4 \text{ mm}$

Quindi per $f = 12.5 \text{ kHz}$ si hanno i primi problemi legati alla diffrazione.

I principali accorgimenti che si possono adottare per adattare il microfono alle differenti condizioni di misura vanno dalla variazione della tensione della membrana, in modo da spostare la frequenza di risonanza, alla forma della griglia di protezione .

È importante sostituire un griglia eventualmente danneggiata perché la risposta in frequenza del microfono senza griglia di protezione ha una notevole diminuzione alle alte frequenze.

Il limite invalicabile è rappresentato dalle dimensioni del microfono, fatto che ha portato alla sostituzione dei microfoni da 1" con i microfoni da ½" che forniscono una risposta più estesa in frequenza, ma che sono meno sensibili in quanto intercettano minor energia sonora.

Quindi occorre valutare le esigenze, ovvero optare per microfoni da ½" quando si debbano misurare pressioni sonore molto elevate sfruttando la linearità in ampiezza, cioè la non distorsione del segnale, che raggiunge con i microfoni da ¼" i 170 dB oppure optare per microfoni da 1" se occorre misurare livelli molto bassi ed è essenziale un'elevata sensibilità.

Per recuperare parte della sensibilità, nei microfoni da ½" è possibile diminuire il peso e la tensione della membrana, ma ciò ha come controindicazione una minor stabilità del microfono nel tempo.

La sensibilità del microfono comunque diminuisce nel tempo e risente delle sollecitazioni ambientali e meccaniche, richiedendo un'operazione di taratura periodica, svolta con l'ausilio di dispositivi detti calibratori acustici o pistonofoni, i quali emettono un livello stabile e noto di pressione acustica.

È importante considerare l'influenza del microfono sull'acquisizione dei dati, dell'eventuale presenza dell'operatore. Tale influenza viene mostrata nella figura successiva :

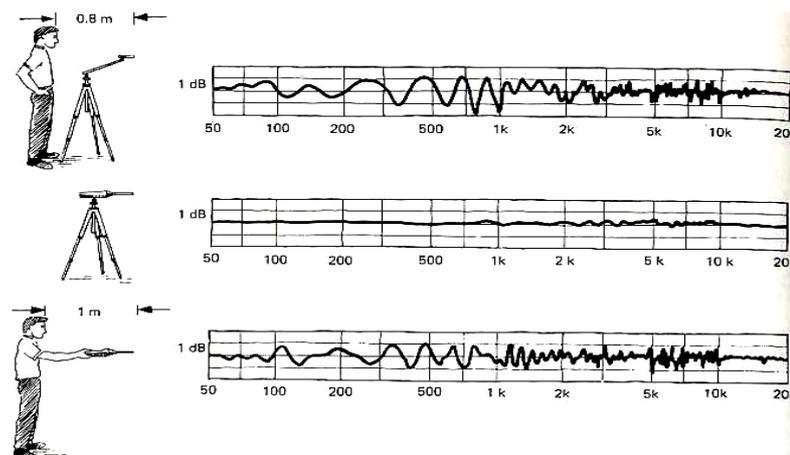


Figura 1- 11 Influenza operatore(da [4])

Come possiamo osservare sia lo strumento che l'osservatore disturbano il campo sonoro, è quindi buona norma montare il microfono su un tripode, con l'operatore ad una sufficiente distanza.



Figura 1- 12 (da [66])

I cavi di connessione che collegano il microfono alla strumentazione devono essere corti, ben schermati e di bassa capacità altrimenti il potenziale generato dal microfono stesso ne risente.

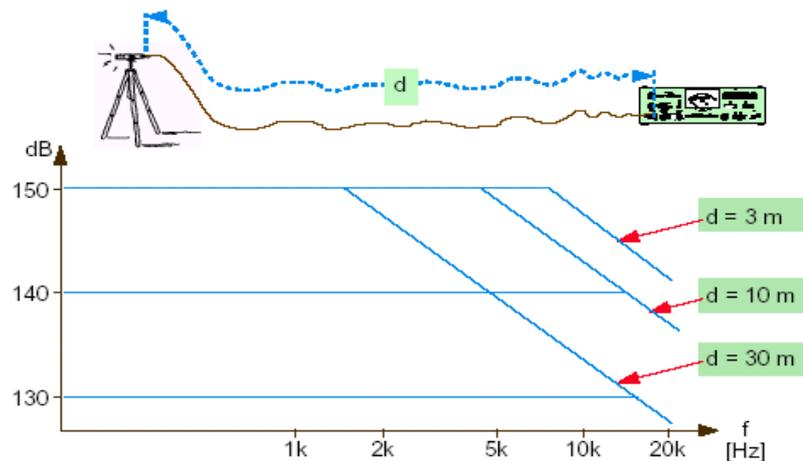


Figura 1- 13 (da [66])

Normalmente viene usato con il microfono un piccolo amplificatore elettronico, il preamplificatore, per amplificare l'uscita del microfono e per trasmetterla al cavo, minimizzando in questo modo l'effetto del cavo nell'introdurre un errore di misurazione.

La figura 1-14 mostra la diversa influenza sulle caratteristiche direzionali del microfono e del fonometro, tipico misuratore di livello sonoro utilizzato in rilevazioni acustiche ambientali.

Il corpo del fonometro influenza la direzionalità del suo microfono alle alte frequenze e soprattutto per suoni provenienti dai 180°.

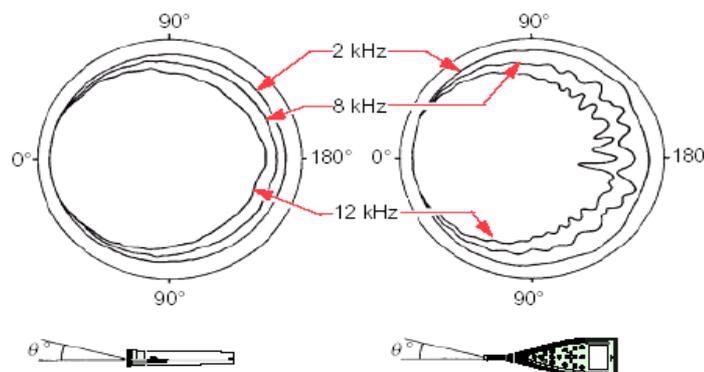


Figura 1- 14 (da [66])

Sul mercato esistono oggi, microfoni di misura di limitati ingombri (diametri dell'ordine di 10 mm), con range di frequenze dai 10 Hz ai 100 KHz, ed in grado di effettuare misure attendibili fino ad una pressione sonora dell'ordine dei 200 dB.

1.4 Analisi Acustica del rumore acquisito da microfono

Dall'analisi della fig.1-6, nasce l'idea di valutare il segnale raccolto dal microfono posizionandolo in una zona molto prossima alla sorgente, dove il suono diretto dovrebbe prevalere, ed è quanto è stato fatto nel lavoro di Baydar e Ball (2003).

I primi lavori, Badi (1994), svolti con i microfoni utilizzavano attrezzature di test molto semplici, limitando gli eventuali effetti di riflessione.

Fornivano, comunque, risultati piuttosto interessanti nella valutazione dei difetti degli ingranaggi, se paragonati a tecniche classiche come l'analisi vibrazionale, adottando tecniche di analisi spettrale

(Cepstrum, cross-spectrum e analisi fft),

Non si procedeva ad uno studio preliminare sul posizionamento del microfono, e veniva riportata solo una schematica disposizione rispetto alla sorgente acustica interessata dallo studio(fig.1-15).

Tale figura mostra che gli accelerometri e il sensore acustico vengono montati sulla scatola del cuscinetto più vicino alla trasmissione.

L'articolo [36] riporta i risultati di un esperimento svolto su un modello di gearbox molto semplice in cui vengono confrontati i risultati di due accelerometri, uno disposto in modo da ricevere i dati relativi ad accelerazioni orizzontali, l'altro quelli verticali, di un microfono omnidirezionale, disposto davanti alla scatola contenente le due ruote dentate, e di un sensore di emissione acustico.

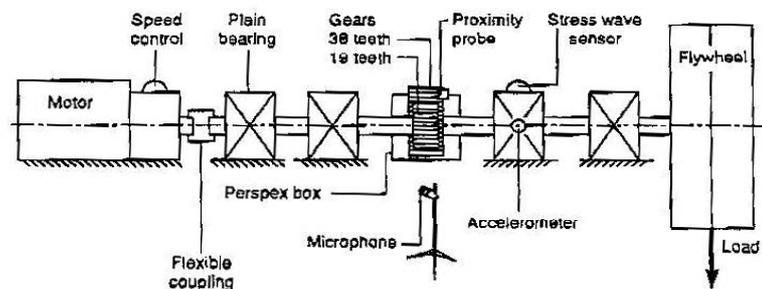


Figura 1- 15 (DA [36])

Si produceva artificialmente un difetto (welded blip) sulla ruota condotta e si procedeva all'analisi sui quattro segnali acquisiti con le diverse tecniche.

Dall'analisi spettrale dei quattro trasduttori utilizzati, in cui si confrontano gli spettri della ruota sana con quelli della ruota difettosa, si evidenzia, in figura 1.16, in modo molto chiaro, la frequenza di ingranamento (freccia blu) con diverse armoniche (freccie rosse).

La differenza tra l'ingranaggio sano (G) e quello difettoso (F), è sostanzialmente rappresentato da una maggiore attività spettrale, per il segnale microfonico e per il sensore acustico, mentre i segnali degli accelerometri sono sostanzialmente segnati da una certa attività sidebands, ovvero l'intorno della frequenza di ingranamento è caratterizzato da una serie di picchi, distanti, in genere, tra loro della frequenza di rotazione dell'albero.

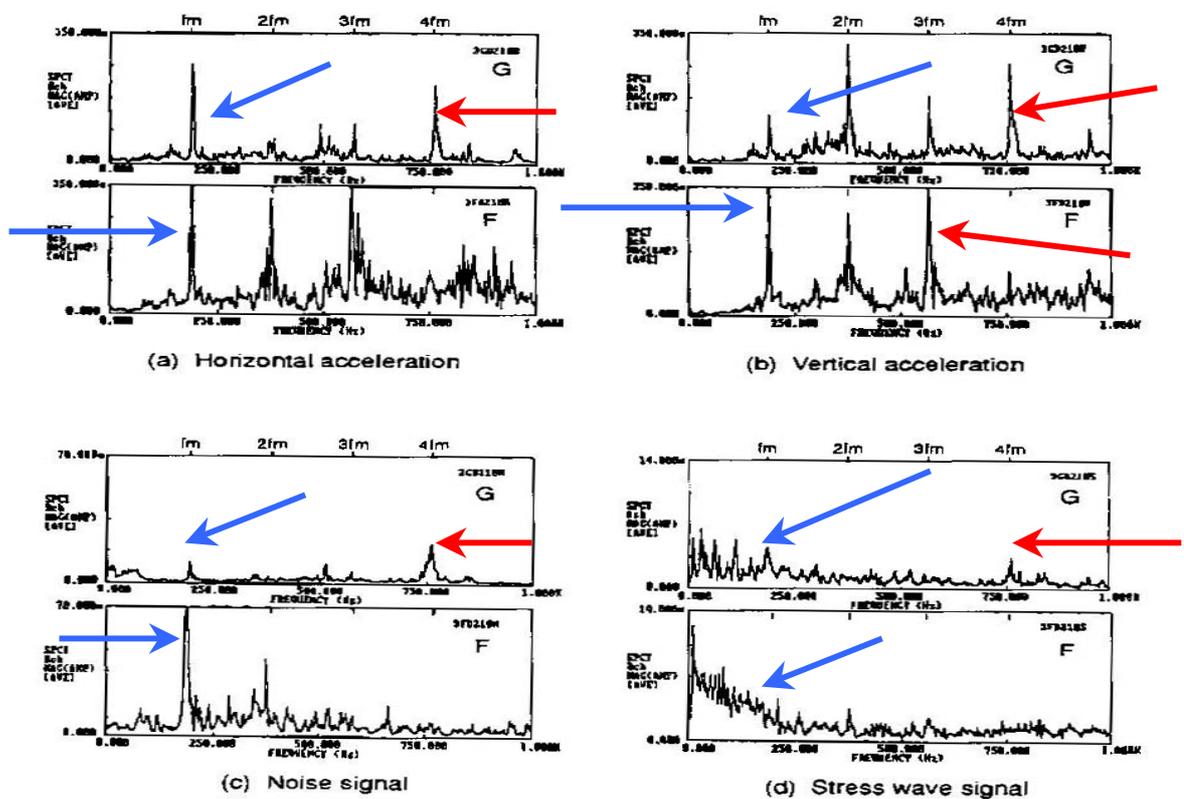


Figura 1- 16 analisi spettrale (G:good; F:fault) (da[36])

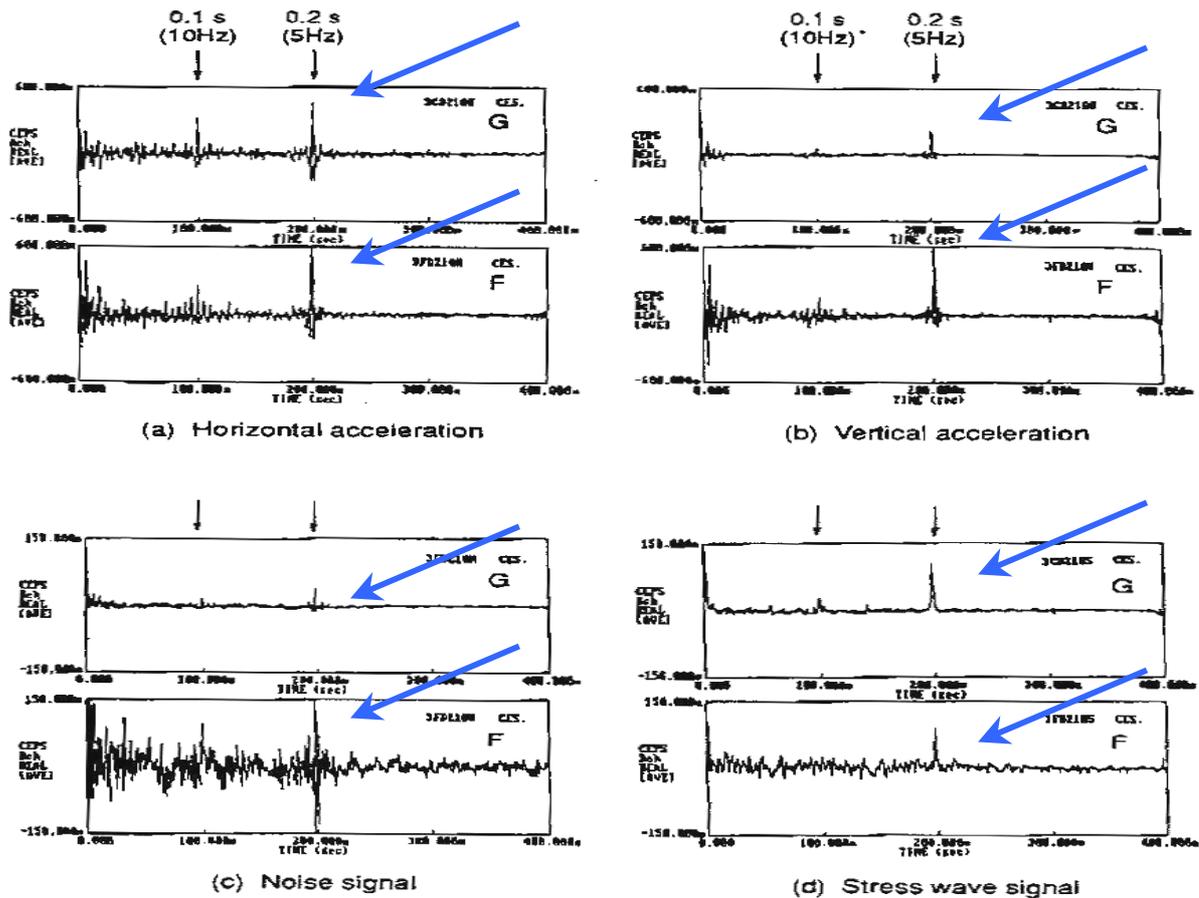


Figura 1-17 analisi Cepstrum (G:good; F:fault) (da[36])

Gli stessi segnali valutati con l'analisi Cepstrum, danno luogo a rappresentazioni nel dominio del tempo in cui si notano i notevoli risultati di individuazione del difetto raggiunti con il microfono ed il sensore acustico, in particolare risulta evidenziato un picco a 0.2 secondi corrispondente ai 5 Hz della frequenza di rotazione della ruota condotta (ruota in cui si era provocato il difetto).

L'analisi Cepstrum (anagramma di frequency) è per definizione la trasformata inversa di Fourier dello spettro di potenza logaritmico ossia l'antitrasformata di Fourier del logaritmo della trasformata di Fourier della funzione, presenta in ascisse il "quefrequency", che ha le stesse dimensioni del tempo.

Il lavoro [41], basato sul confronto tra i risultati ottenuti con la classica analisi vibrazionale e l'analisi del segnale acustico raccolto da un microfono, valuta l'influenza dell'ambiente circostante, ed in particolare gli autori hanno osservato che i dati raccolti da un microfono di misura di tipo omnidirezionale ad una distanza dalla sorgente di 2-10 cm sono i soli dati riferiti al rumore prodotto dall'organo in esame, mentre all'aumentare della distanza, già per 40-50 cm, entrano in gioco gli effetti di riverberazione e di riflessione della stanza dove si eseguono i test, ed il rumore prodotto dagli altri organi in azione durante il test.

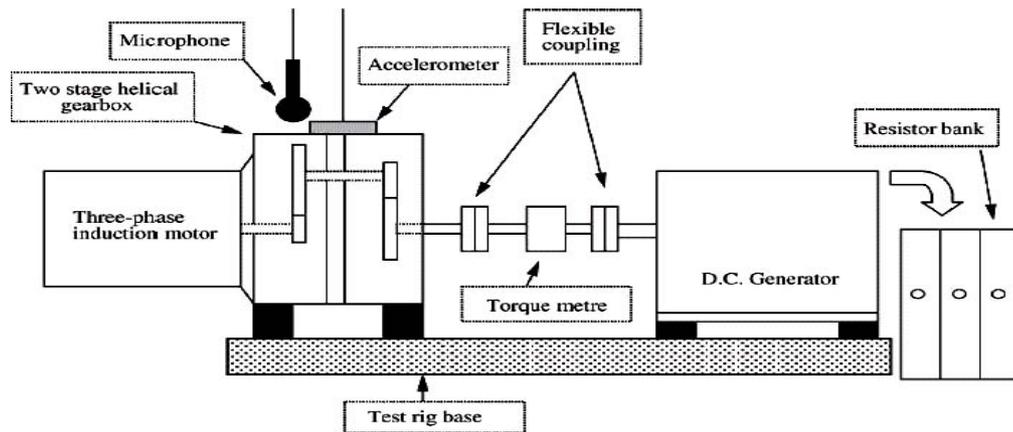


Figura 1- 18 (DA [41])

Il risultato indica la possibilità di valutare le condizioni della macchina con l'uso di semplici microfoni, senza dover ricorrere all'uso di particolari attrezzature che impediscano di "sporcare" il rumore dell'ingranaggio, se si posiziona il microfono sufficientemente vicino all'ingranaggio, con l'unica avvertenza di puntare il microfono nella direzione dell'organo in esame.

Quest'ultimo aspetto rappresenta un notevole vantaggio derivante dall'analisi acustica realizzata con i microfoni rispetto alla classica analisi vibrazionale, in quanto viene a mancare tutta la parte iniziale di collaudo e valutazione della esatta collocazione degli accelerometri sulla carcassa della macchina e non occorre procedere all'analisi della sensibilità del dato raccolto da un sensore radiale o da un sensore assiale.

Superato il problema di una corretta localizzazione dell'accelerometro, l'analisi vibrazionale, allo stato attuale fornisce risultati migliori nell'individuazione anticipata del difetto, sia esso la rottura di uno dei denti o la formazione di crack, rispetto all'analisi acustica.

Riferendoci al lavoro di Bell e Baydar, la differenza non è però molto rilevante, infatti, si va dall'individuazione del difetto al 20% della rottura del dente con gli accelerometri al 30% del microfono, da 1 mm di profondità del crack a 2 mm.

I diagrammi successivi riportano i risultati dell'analisi wavelet relativa al segnale raccolto dagli accelerometri e dal microfono:

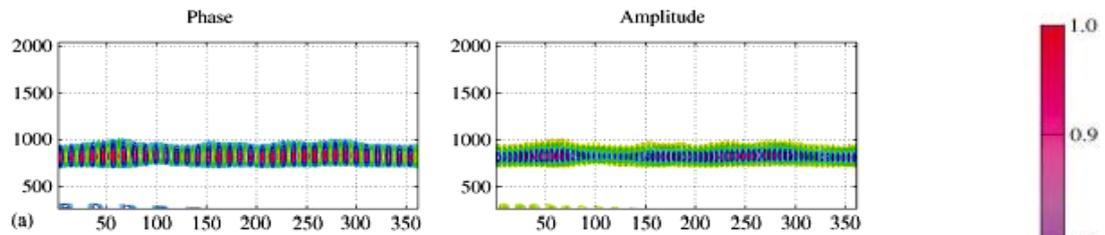


Figura 1- 19 analisi wavelet a dente sano con microfono

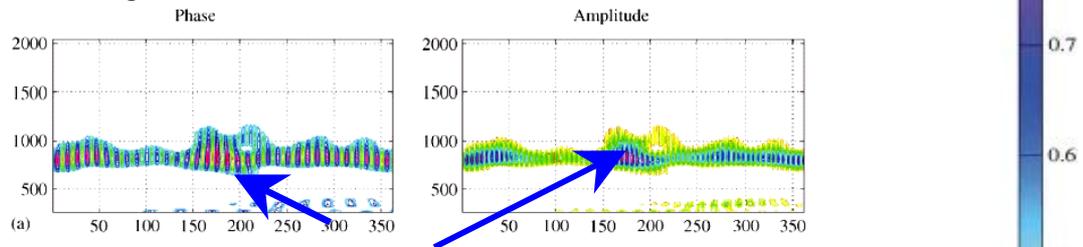


Figura 1- 20 analisi wavelet a dente rotto al 30% con microfono

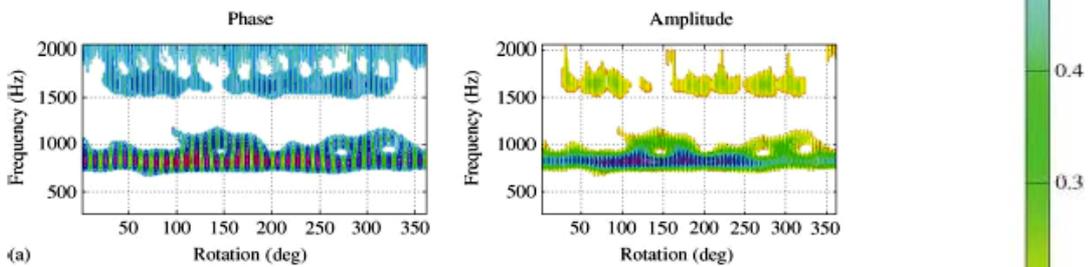


Figura 1- 21 analisi wavelet a dente sano con accelerometri

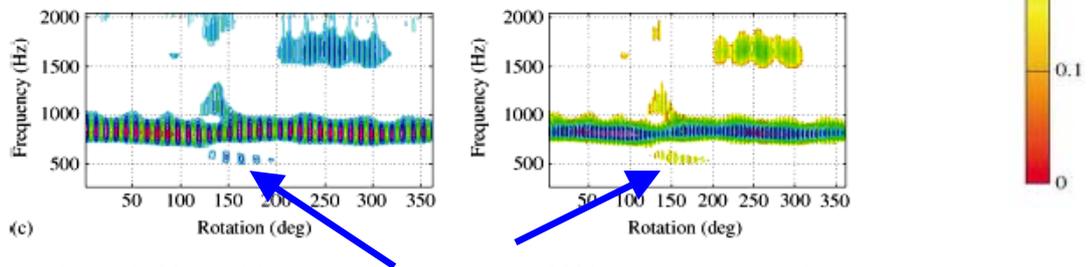


Figura 1- 22 analisi wavelet a dente rotto al 20% con accelerometri

L'analisi Wavelet trasforma il segnale nel tempo nel dominio delle frequenze utilizzando funzioni diverse rispetto alla funzione seno della tradizionale trasformata di Fourier, scelte a seconda delle esigenze con le quali si ottengono risultati migliori.

Nelle figure 1-20 e 1-22 vengono evidenziate dalle frecce i primi sintomi della generazione di difetti, rappresentati da una attività a bassa frequenza, non presente a dente sano.

Inoltre tale articolo, riferendosi ad una serie di test svolti su ruote dentate a denti elicoidali che per loro stessa natura presentano un minor impatto all'atto di ingranamento rispetto alle ruote dentate a denti diritti, permette di ipotizzare che un'eventuale analisi acustica con microfono, svolta su ingranaggi a ruote a denti diritti fornisca risultati molto simili a quelli dell'analisi vibrazionale.

1.5 AE: SENSORI ACUSTICI

1.5.1 Introduzione

L'analisi AE, nata in campo nucleare per il controllo dei recipienti in pressione, utilizza segnali provenienti da sensori che operano in un campo di frequenza compreso tra 0.1 e 1 MHz.

Se un elemento meccanico ha variazioni di tensioni elastiche localizzate, come conseguenza rilascerà spontaneamente onde elastiche definite "emissioni acustiche" con frequenza variabile dai 20 Hz ad 1 MHz.

La formazione e la propagazione di una cricca, il fretting e la deformazione plastica sono fenomeni che provocano emissioni acustiche, ed inoltre è possibile rilevare il danneggiamento superficiale, pitting, e il suo progredire analizzando l'andamento ad esempio del RMS nel tempo.

Le onde elastiche emesse, nella propagazione di una cricca, vengono rilevate dalla membrana, formata da un cristallo piezoelettrico del sensore acustico, fissato sulla superficie della struttura, il quale trasforma l'onda elastica in un segnale elettrico.

Si tratta di sensori che operano ad altissime frequenze, consentendo di analizzare segnali in zone praticamente prive di altre componenti, rendendo maggiormente visibile l'eventuale aumento dell'attività, collegabile al progredire di fenomeni di danneggiamento.

Tale segnale ad alta frequenza viene modulato in ampiezza dai fenomeni vibratorii legati alla presenza difetti e attraverso operazioni di demodulazione è possibile ottenere un segnale analogo a quello che si ottiene con i normali accelerometri e come quello può essere analizzato.

Presenta inoltre il grande vantaggio di fornire un favorevole rapporto segnale-rumore.

L'analisi con l'utilizzo dei sensori acustici è sicuramente efficace nella rivelazione delle onde elastiche, ma richiede la stessa procedura di posizionamento del sensore richiesta all'accelerometro. In effetti l'analisi corretta dei segnali in EA comporta un'attenta fase iniziale di calibrazione e filtraggio dei segnali, così da non essere influenzati da segnali "parassiti" provenienti dall'ambiente. Solo un'accurata fase preliminare consente un corretto svolgimento delle prove, e l'acquisizione delle componenti significative dei segnali.

Questa tipologia di tecnica AE differisce da altri metodi non distruttivi per due principali ragioni:

- 1) i segnali captati sono emessi dall'interno del materiale stesso, e non generati dal metodo non distruttivo, come nel caso degli ultrasuoni o dei raggi X;
- 2) la tecnica dell'emissione acustica è in grado di captare e seguire i fenomeni dinamici associati al degrado dell'integrità strutturale.

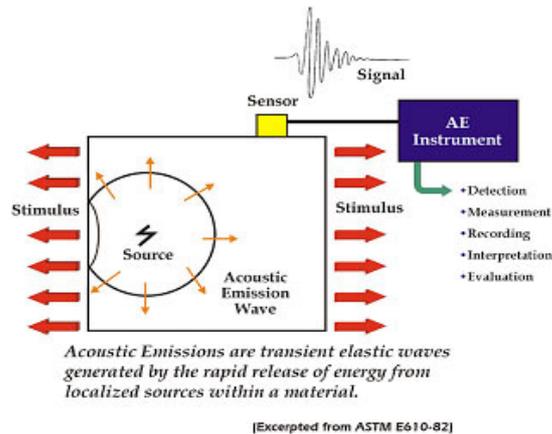


Figura 1- 23 Schema di propagazione delle onde acustiche

Evoluzione di quadri fessurativi e deformazioni plastiche sono fra le cause principali di emissione acustica, così come discontinuità e difetti “natural” che variano di dimensione ed orientazione.

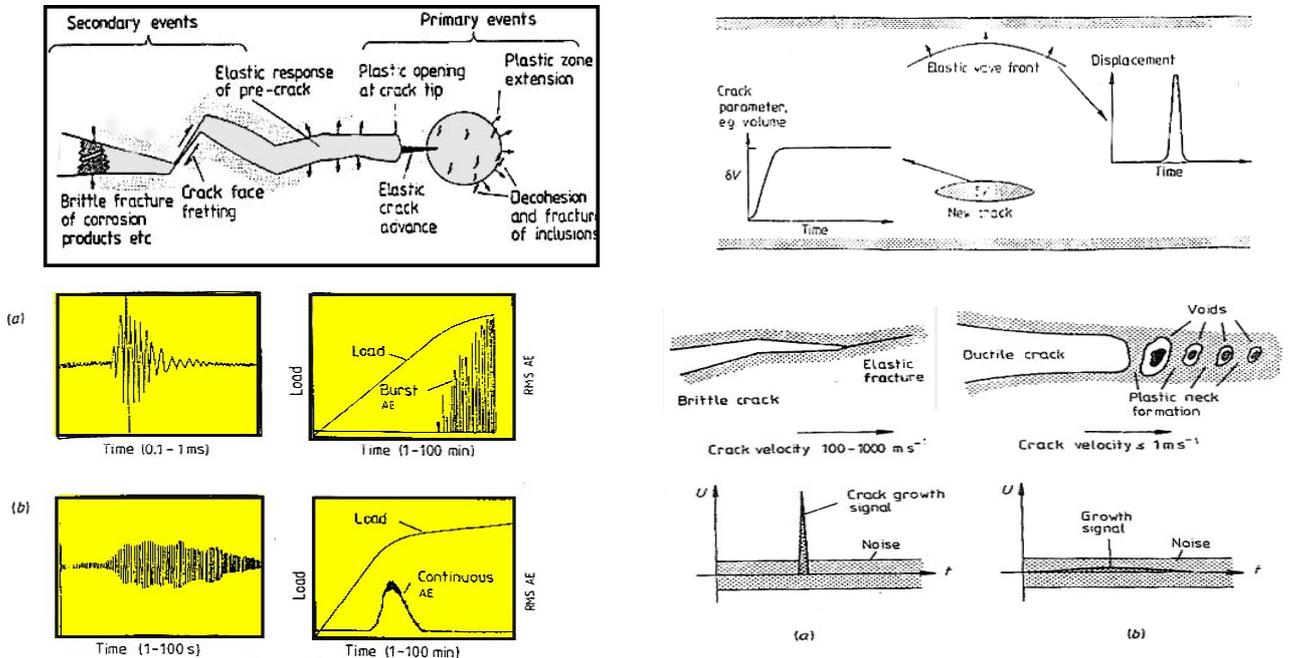


Figura 1- 24 (da [17])

L'analisi in EA non è direzionale: in generale, le sorgenti di EA appaiono come punti che irradiano onde di tipo sferico; in linea teorica, quindi, un sensore comunque disposto sull'elemento monitorato è in grado di captare l'onda emessa. Ciò contrasta con gli altri metodi di controllo non distruttivo, la cui applicazione dipende fortemente dalla preventiva

conoscenza delle probabili posizione ed orientazione delle discontinuità, così da dirigere in maniera adeguata un fascio di onde tali da intercettare l'area ritenuta interessante.

I sensori acustici dipendono dalla posizione in quanto captano, oltre ai segnali emessi dalle sorgenti emmissive interne, anche una serie di segnali derivanti dall'ambiente circostante e dalle apparecchiature utilizzate per l'effettuazione dei test.

Tali segnali "parassiti" debbono essere individuati e filtrati adottando un'opportuna soglia di trigger del segnale ed un adeguato filtro sulle frequenze, in modo tale da esaltare le frequenze significative dei segnali emessi, in generale nel range 50÷350 kHz, e da eliminare il rumore di fondo.

L'interpretazione dei segnali di EA si basa sulla determinazione di alcuni semplici parametri, per come illustrato in fig. 1-25:

- 1) evento;
- 2) durata dell'evento;
- 3) energia dell'evento;
- 4) tempo di risalita;
- 5) ampiezza massima dell'evento;
- 6) colpi.

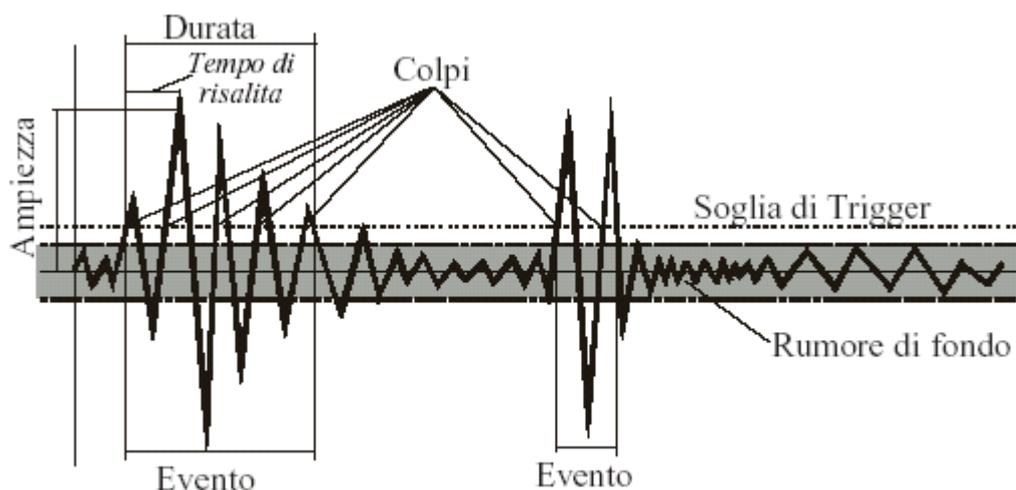


Figura 1- 25(da [9])

La tecnica AE, associata all'uso dei sensori acustici, permette di sviluppare metodi di valutazione dell'integrità del componente in esame molto semplici.

Attraverso l'osservazione di eventuali variazioni di parametri come il numero di colpi e/o il numero di eventi, facilmente realizzabili in on-line, è possibile tener sotto osservazione la generazione e il susseguente sviluppo dei difetti.

L'articolo di Tandon [67], relativo a cuscinetti volventi, mostra alcuni aspetti interessanti:

- il numero di colpi, al variare della dimensione caratteristica del cuscinetto, ovvero il suo diametro, e al variare del carico, si mantiene costante nelle due configurazioni previste: cuscinetti difettosi (sia difetto sulla pista interna sia elemento volvente difettoso) e cuscinetti sani.
- il numero di colpi, al variare della velocità, aumenta linearmente nelle due configurazioni previste: cuscinetti difettosi (sia difetto sulla pista interna sia elemento volvente difettoso) e cuscinetti sani
- Il numero di colpi tra cuscinetto sano e difettoso differisce di 4 ordini di grandezza in tutte le condizioni esaminate.

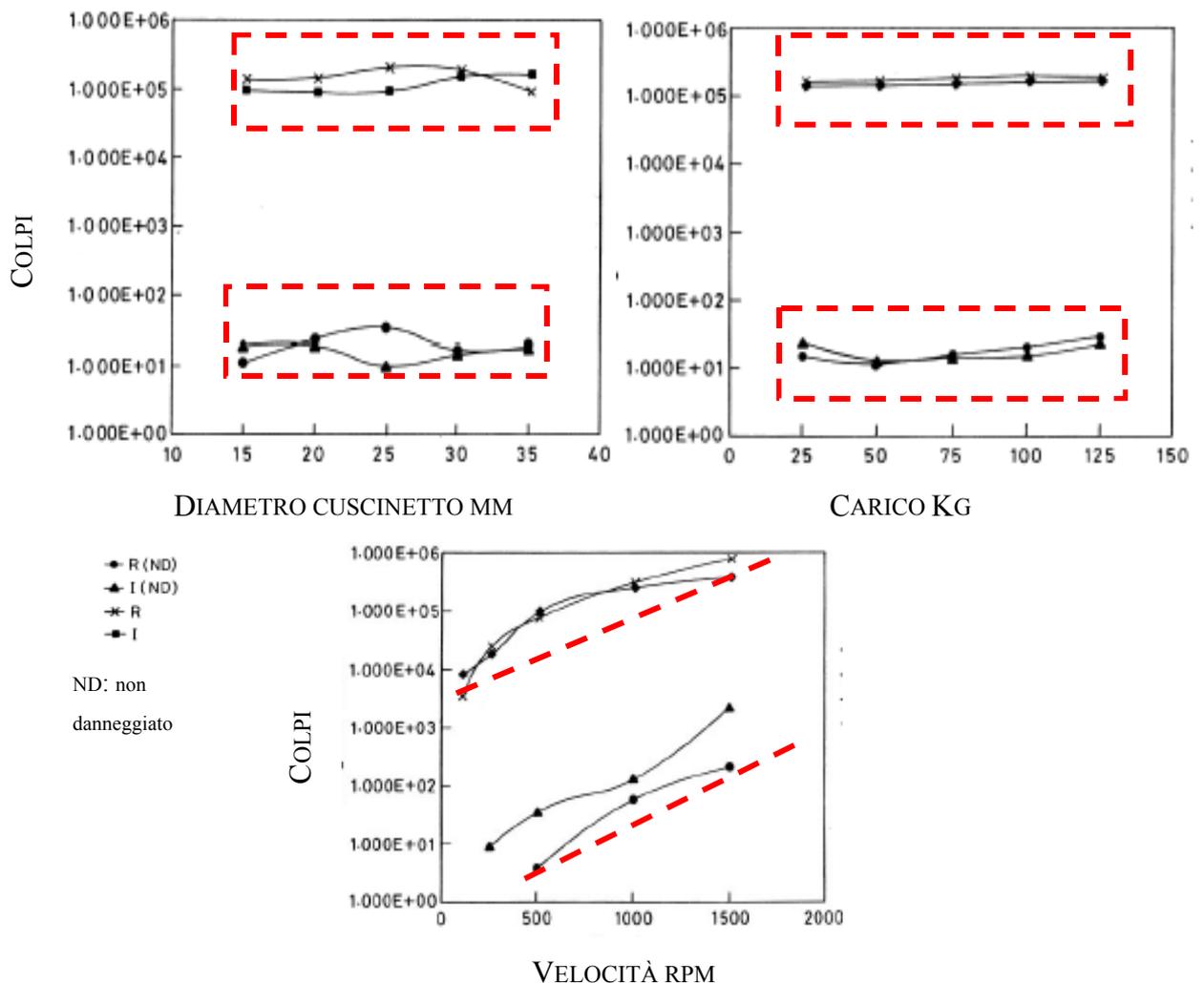


Figura 1- 26 N°colpi al variare di diametro cuscinetto, carico e velocità (da[67])

Inoltre per un dato cuscinetto, a carico e velocità note, è possibile vedere, fig.1-27, come varia la distribuzione degli eventi, al variare delle dimensioni del difetto, (si passa da cuscinetto sano ad ampiezze del difetto da 0.15 mm a 1 mm), in funzione dell'ampiezza del picco e dei colpi.

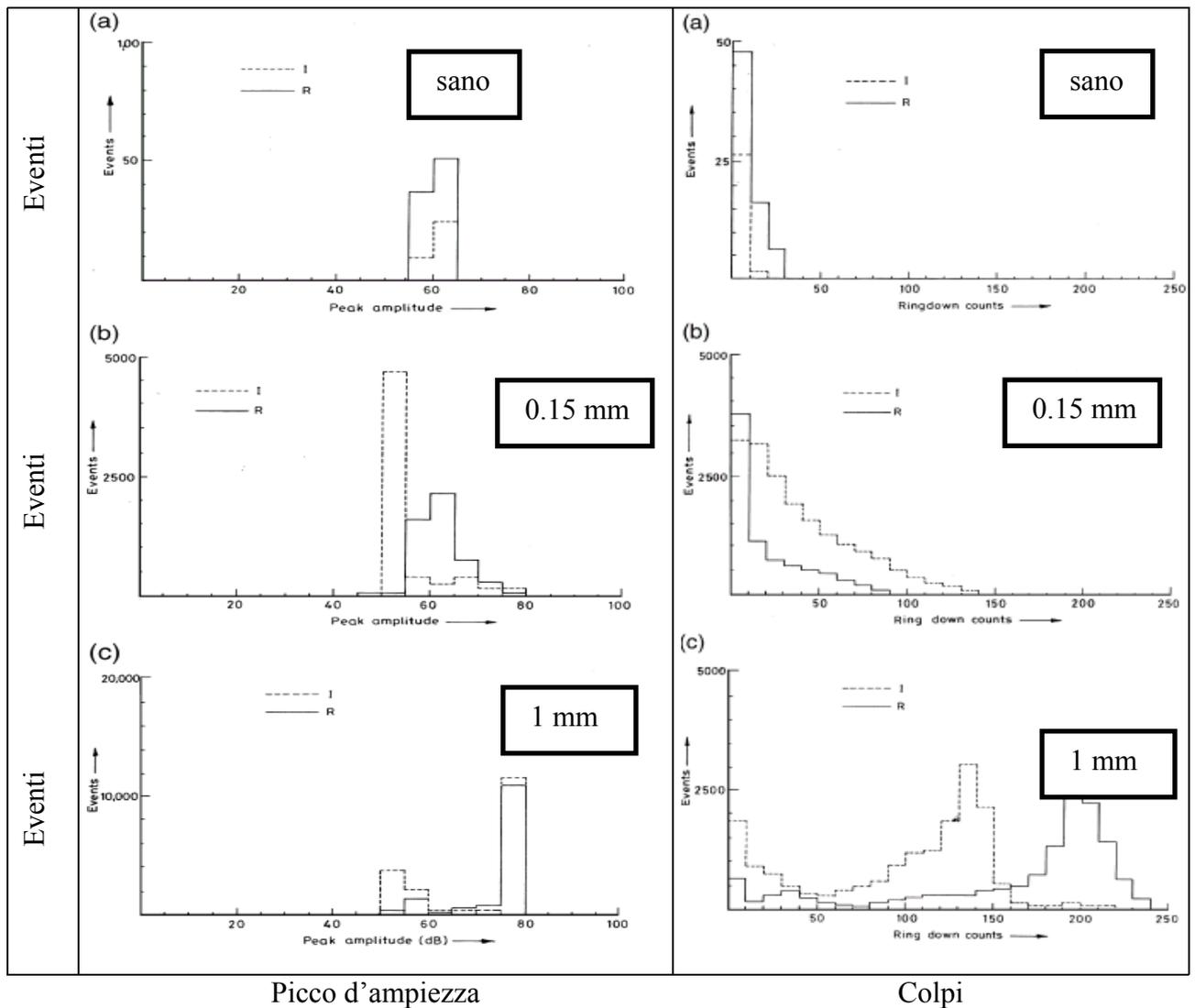


Figura 1- 27 N°Eventi al variare dellei dimensioni del difetto(da [67])

Come si può osservare il passaggio dal cuscinetto sano a quello difettoso è caratterizzato dall'aumento (4 ordini di grandezza) del numero degli eventi, mentre l'aumento delle dimensioni del difetto fa crescere il range del picco in ampiezza e del numero di colpi con il maggior numero di eventi.

Si tratta, quindi, di una tecnica che ha trovato riscontri nello studio dei cuscinetti, ed è auspicabile che sia estendibile anche alla valutazione degli ingranaggi, proprio per la sua intrinseca semplicità.

Oltretutto i dati sperimentali rilevati presso il Department of Mechanical Engineering of Ohio state University [16], dove un sensore piezoelettrico viene fissato sulla sede dei cuscinetti della ruota test, mostrano, con la semplice visione del segnale grezzo, l'individuazione della successiva rottura di un dente con un anticipo notevole rispetto al classico segnale raw degli accelerometri.

Il segnale dal sensore AE passa ad un preamplificatore (40-60 db) e quindi viene inviato ad un analizzatore AE e ad un oscilloscopio per essere poi memorizzato sul computer.

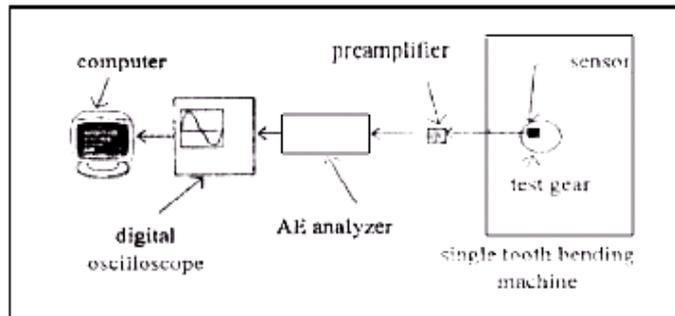


Figura 1- 28 Schema dell'impianto per il rilevamento AE(da [16])

Il rilascio delle onde elastiche avviene dopo molti cicli con la seguente modalità:

- quando si applica il carico per la prima volta (con materiale non precaricato) si hanno movimenti a livello microscopico che generano rilasci di onde AE. Fenomeno di breve durata;
- successivamente la strumentazione rileva solo l'impatto dente – dente.

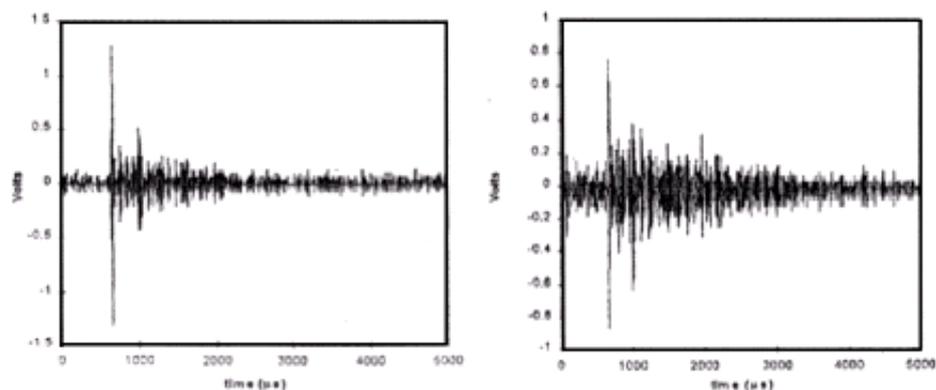


Figura 1- 29 Segnale AE a 10000 e 30000 cicli rispettivamente (da [16])

-dopo numerosi cicli, all'inizio del cracking si rileva un'interessante attività di onde (con picchi di 6 V). Sulla superficie del dente non sono ancora presenti segni visivi.

L'emissione delle onde si mantiene intensa fino alla completa rottura.

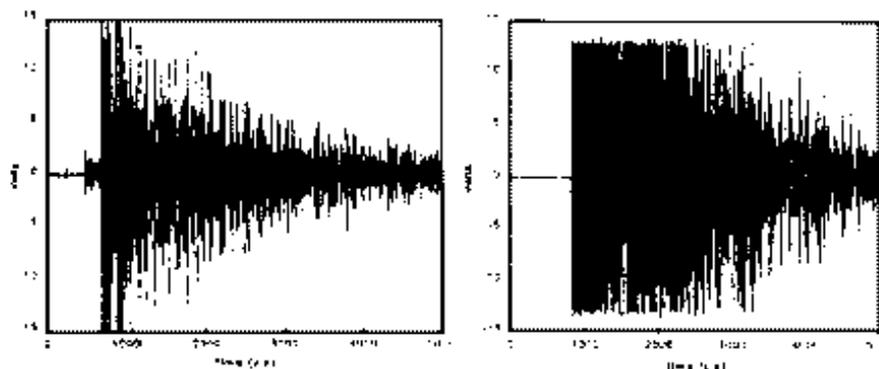


Figura 1- 30 Segnale AE a 84000 cicli e alla rottura (86210 cicli) (da [16])

Tale articolo presenta poi uno studio accurato in cui si determina l'attenuazione del segnale allontanandosi dalle ruote in esame.

L'articolo [34] riporta i risultati conseguiti da altri autori, i quali vanno dalla conferma che l'analisi AE scopre il difetto a dimensioni inferiori rispetto alla classica analisi vibrazionale, con il risultato che analizzando i valori dei parametri AE, come ampiezza massima ed energia, relativi ad ingranaggi non difettosi, si determina, ad alti valori del n° N di cicli, un aumento del valore di tali parametri, aumento che indica la progressione del fenomeno pitting.

Nello stesso lavoro viene introdotta la differenza che i trattamenti termici introducono sull'individuazione dei difetti.

In particolare le ruote che hanno subito un trattamento di tempra, rispetto a quelle che hanno subito una normalizzazione, mostrano l'incipiente rottura del dente attraverso un incremento significativo del numero degli eventi (treni d'onda distinti emessi dall'ingranaggio, composti da uno o più counts) e del numero delle volte in cui il segnale AE ha superato una soglia prefissata antecedente alla rottura stessa.

Viene infine mostrato l'effetto del rumore di fondo in assenza di difetto e del disallineamento al variare delle condizioni operative relativamente a due sensori, montati rispettivamente:

1. sulla ruota condotta, e trasmette i dati acquisiti per mezzo di un collettore ad anello;
2. sulla scatola di uno dei cuscinetti di tale ruota.

Il 1° sensore viene vincolato alla ruota tramite viti, ed il dato raccolto viene inviato al collettore per mezzo di un cavo che passa attraverso un foro praticato nell'albero che porta in rotazione la ruota. Tale prova, data la disposizione di quest'ultimo sensore, è stata eseguita a "secco" per impedire che il lubrificante andasse a compromettere l'integrità del sensore.



Figura 1- 31 sensore sulla ruota con relativo collettore [34]

Il rumore di fondo produce, al variare delle condizioni operative, un incremento molto marcato del valore efficace RMS e della energia, che tendono poi a diminuire verso un valore di riferimento per quella data condizione.

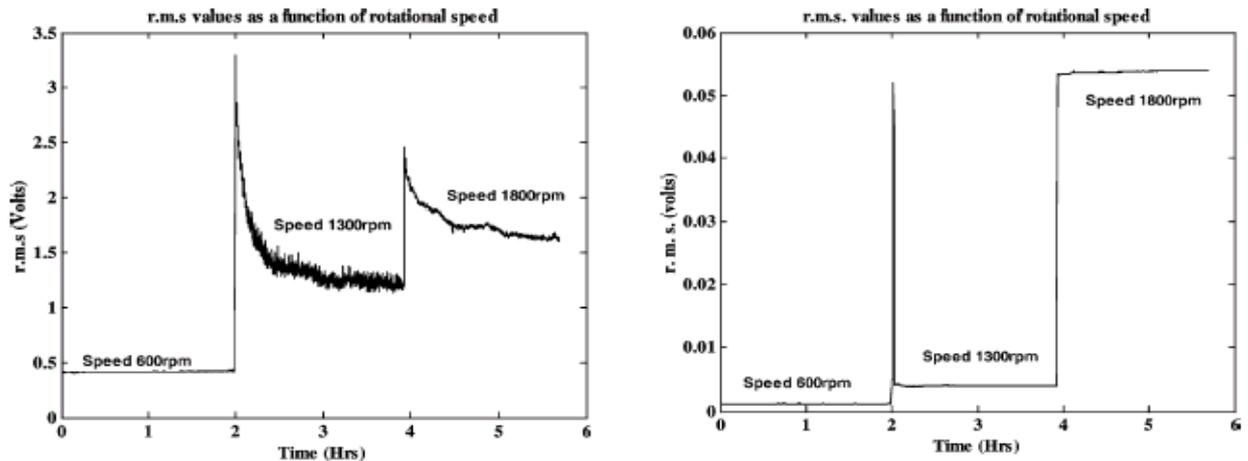


Figura 1- 32 Andamento del RMS per il sensore sulla ruota e per quello sulla scatola del cuscinetto nello studio del rumore di fondo [34]

Tale andamento viene riprodotto, seppur con valori molto più bassi dal sensore del cuscinetto, sensore che invece non permette, nello studio del disallineamento, di osservare il particolare andamento nel tempo dei valori del RMS e della energia.

Il sensore montato sulla ruota mostra al variare della condizione operativa un andamento simile a quello registrato nello studio del rumore di fondo, con l'eccezione che, dopo l'abbassamento del valore dei parametri in esame, a seguito dell'assestamento, si assiste ad un successivo aumento di tali valori, che una successiva ispezione visiva conferma essere dovuta alla progressione del fenomeno del pitting e dello scuffing.

Addirittura, dopo la pausa necessaria per procedere alla ispezione, l'andamento, dopo una prima fase iniziale, riprende a crescere come se non ci fosse mai stata la pausa.

Come osservabile dalla figura successiva, il sensore montato sul cuscinetto non è in grado di evidenziare tale andamento crescente.

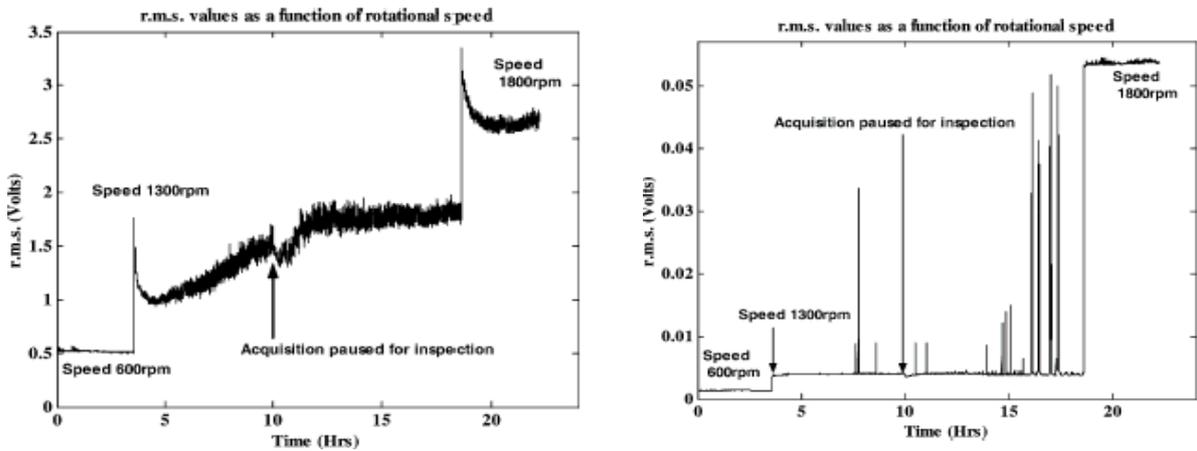


Figura 1- 33 Andamento del RMS per il sensore sulla ruota e per quello sulla scatola del cuscinetto nello studio del disallineamento [34]

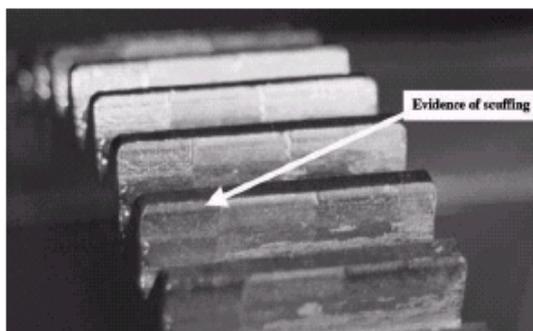


Fig. 10. Observations of early stages of micro and macro pitting, and scuffing.

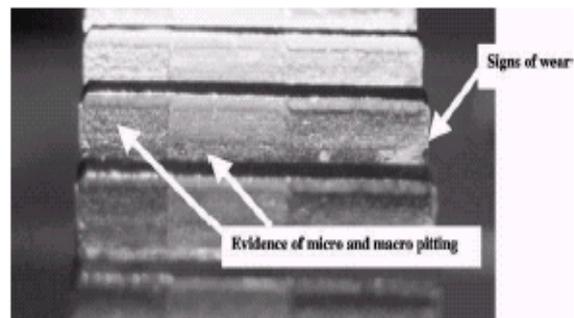


Fig. 11. Evidence of micro and macro pitting, and wear.

Figura 1- 34 Risultati della ispezione visiva [34]

I risultati fin qui riportati mostrano le enormi potenzialità dell'analisi con questo tipo di sensore nel prevenire rotture catastrofiche e nella valutazione dello stato dell'ingranaggio durante le prove, mentre la diversa capacità di acquisire il segnale mostra l'importanza della fase di posizionamento del sensore per acquisire le informazioni d'interesse.

1.6 Strumentazione sensori di emissione acustica

La tipica strumentazione necessaria per un'analisi AE basata su sensori acustici richiede :

- un sensore che converte il suono, o meglio, l'onda elastica prodotta in un segnale elettrico;
- un preamplificatore che amplifichi il segnale ad un valore utilizzabile;
- un opportuno cavo che trasporti il segnale alla strumentazione di acquisizione;
- la scheda di acquisizione;
- il software per l'analisi del segnale.

In generale, un sistema di misura in EA viene configurato con il seguente schema:

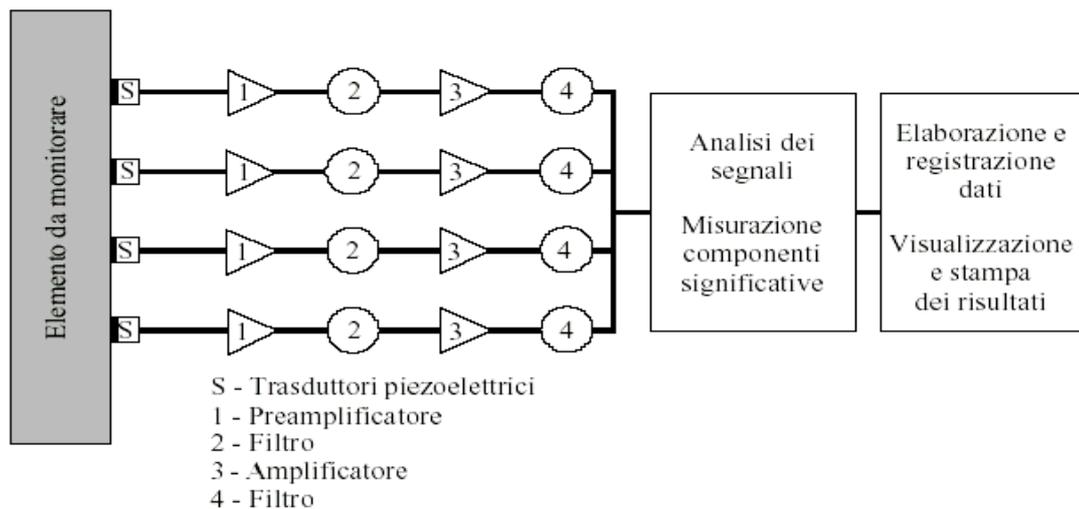


Figura 1- 35 Schema del sistema di misura AE [9]

Il più importante fattore nei test AE è la selezione del sensore AE, il quale deve possedere un elevato rapporto tra un alta sensibilità e un basso livello di rumore insito in qualsiasi sensore.



Figura 1- 36 Esempi di sensori acustici PAC®

I sensori PAC® possono essere del tipo single-ended oppure differenziali.

Il sensore single-ended utilizza un singolo cristallo per fornire un alta sensibilità ed una risposta omni-direzionale, a dispetto della orientazione dell'eccitazione AE.

Il sensore differenziale permette di eliminare i segnali di disturbo in una zona ad alta interferenza elettromagnetica. Presenta un'uscita che viene elaborata da un amplificatore differenziale, il quale ha una soglia di 24 dB.

Tali sensori sentono la rottura di un singolo grano in un metallo, la frattura di una singola fibra in un materiale composito.

Individuando sorgenti tanto piccole come queste, o tanto larghe come il progresso di fessure fragili, la tecnologia AE avverte del pericolo, informa sulla integrità della struttura.

La vera problematica nell'uso di tale tecnologia sta nell'alto costo del sistema di acquisizione ed elaborazione, in quanto la principale produttrice di questo tipo di sensore, la PAC, opera, in pratica, in regime di monopolio mondiale, fornendo al cliente tutta la strumentazione, sensori e software, senza però fornire la documentazione tecnica completa, stabilendo, in base alle necessità del cliente, il tipo di sensore e di scheda di acquisizione ed elaborazione da fornire.