

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI ROMA "LA SAPIENZA"  
FACOLTÀ DI SCIENZE MM.FF.NN.  
DIPARTIMENTO DI SCIENZE DELLA TERRA

TESI DI DOTTORATO

**EMISSIONI ELETTROMAGNETICHE NATURALI  
IN BANDA ACUSTICA  
COME PRECURSORI DI FENOMENI SISMICI**

**Adriano Nardi**

DOTTORATO DI RICERCA XVIII CICLO

Roma, 2005

## SOMMARIO

<b>0.0 RIASSUNTO.....</b>	<b>5</b>
<b>1.0 INTRODUZIONE .....</b>	<b>7</b>
1.1 IL PROBLEMA DEI PRECURSORI SISMICI .....	7
1.2 I PRECURSORI ELETTROMAGNETICI .....	10
1.3 LA BANDA RADIOACUSTICA E IL RADIOGEOFONO .....	13
1.4 OBIETTIVI E STRUTTURA DELLA RICERCA .....	16
<b>2.0 IL LAVORO SPERIMENTALE .....</b>	<b>19</b>
2.1 PREPARAZIONE DEI CAMPIONI .....	19
2.2 NOTE SULL'ACQUISIZIONE DIGITALE .....	25
2.3 LE STAZIONI AUTOMATICHE .....	30
2.4 LE SIMULAZIONI IN LABORATORIO.....	35
2.4.1 La pressa.....	35
2.4.2 La vasca di saturazione .....	35
2.4.5 La strumentazione di monitoraggio .....	37
2.4.4 Il problema dell'estensimetro .....	39
2.4.3 La registrazione digitale .....	44
2.5 ALTRI ESPERIMENTI .....	48
<b>3.0 ANALISI DEI RISULTATI .....</b>	<b>51</b>
3.1 INTERPRETAZIONE DEGLI SPETTROGRAMMI.....	51
3.2 RISULTATI DEGLI ESPERIMENTI IN LABORATORIO .....	55
3.2.1 Tipi di rottura.....	55
3.2.2 Tipi di segnale EM.....	58
3.2.3 Stili di deformazione e stili di emissione.....	68
3.2.4 Propagazione del segnale nei vari mezzi .....	69
3.2.5 Reazione alla saturazione del campione.....	69
3.2.6 Stima dell'ampiezza del segnale alla sorgente .....	75
3.3 RISULTATI DEL MONITORAGGIO IN ATMOSFERA .....	78
3.3.1 Esempi di fenomeni VLF non sismici.....	81
3.3.2 Segnali radioacustici associabili a fenomeni sismici.....	84
3.3.3 Confronto tra il segnale atmosferico e alcuni modelli noti.....	88
<b>4.0 INTERPRETAZIONE GLOBALE DEL FENOMENO .....</b>	<b>95</b>
4.1 IPOTESI SULLA SORGENTE DELL'EMISSIONE.....	95
4.2 IL PROCESSO DI ROTTURA .....	97
4.3 DINAMICA DELL'EMISSIONE IN LABORATORIO.....	100
4.4 IPOTESI SULL'EMISSIONE SISMICA .....	105
<b>5.0 APPENDICE.....</b>	<b>111</b>
5.1 LINEE GUIDA PER L'APPROFONDIMENTO DI QUESTO FILONE DI RICERCA .....	111
5.2 RIFLESSIONI SULLE IMPLICAZIONI ETICHE E SOCIOLOGICHE DELLA POSSIBILITÀ DI PREVEDERE UN SISMA .....	112
5.3 IPOTESI DI TRASDUZIONE NATURALE DELLA RADIAZIONE MECCANICA IN ELETTROMAGNETICA (MEEM) .....	117
5.4 ALCUNI ESEMPI DI PROVINI ROTTI PER COMPRESSIONE UNIASSIALE.....	118
5.5 BANDE RADIO: SUDDIVISIONE DELLO SPETTRO .....	119
5.6 RIEPILOGO DEI PARAMETRI DI ANALISI DEI SEGNALI .....	120
5.7 GLOSSARIO DEI TERMINI TECNICI E DELLE ABBREVIAZIONI .....	120
<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>121</b>
<b>RINGRAZIAMENTI.....</b>	<b>125</b>



## 0.0 Riassunto

Lo studio prende in esame principalmente una porzione continua di spettro EM che si estende da 20 Hz a 20 kHz attraversando le bande radio ELF e VLF. La scelta di questa banda ha consentito un'accurata discriminazione dei fenomeni attraverso l'analisi spettrale del segnale EM, resa possibile dall'adozione di tecnologie già disponibili nel campo dei segnali acustici.

Il fenomeno di emissione EM associata alla sollecitazione meccanica della roccia si presenta sotto forma di segnali impulsivi. In laboratorio si sono potute distinguere due categorie di segnale impulsivo, ciascuna caratterizzata da un proprio stile riconoscibile nell'analisi comparata della distribuzione spettrale, degli eventi e delle intensità. La sorgente dell'emissione può essere attribuita alla microfratturazione attraverso il modello della frattura in un dielettrico. Il potenziale generato su ogni singola frattura sembra essere dell'ordine delle centinaia di Volt e potrebbe raggiungere il migliaio.

Il primo tipo di emissione (SIO), ad alta frequenza, è associabile meccanicamente alla formazione dei crack e indipendentemente dalla scala si può suddividere in insiemi di unità: *impulsi*, *treni* di impulsi ed *episodi* di emissione dei treni. Il secondo e più intenso tipo di sequenza (SID) è invece a bassa frequenza e associabile all'apertura delle fratture. In questo caso nella distribuzione temporale degli eventi si possono riconoscere degli episodi legati alla rottura da una relazione di proporzionalità. La fenomenologia nel suo complesso è stata osservata in ogni tipo di litologia esaminata con differenze non dipendenti direttamente dalla mineralogia ma piuttosto riconducibili all'omogeneità strutturale e allo stile deformativo del materiale. Malgrado questa variabilità abbia influenzato anche l'intensità dell'emissione, la sequenza SID, almeno nella fase *parossistica*, è osservabile in ogni prova e quindi la sua occorrenza appare sistematica.

Nell'ambiente naturale in tre occasioni è stato riconosciuto un segnale riconducibile alla SIO, in tutti i casi associabile ad un sisma di magnitudo  $\geq 4.5$  succeduto nell'arco di 3~4 giorni. Rispetto all'emissione osservata in laboratorio mostra la stessa distribuzione spettrale e una distribuzione temporale analoga su scala maggiore. L'eventuale presenza dell'emissione SID potrebbe non essere stata risolta dal dispositivo di rilevamento.

In generale sono ipotizzabili l'esistenza di una soglia di magnitudo legata all'occorrenza del precursore EM e la sistematicità della successione di un sisma all'emissione EM. E' ipotizzabile inoltre la presenza di elementi utili alla previsione temporale dell'evento catastrofico nella caratterizzazione della variabilità del fenomeno stesso e la possibilità di risalire alla posizione della sorgente del segnale indipendentemente dalla direttività del sensore. Sebbene si tratti solo di ipotesi, le caratteristiche di questo tipo di precursore sarebbero tali da giustificare l'avanzamento di nuovi studi per la loro verifica.



## 1.0 Introduzione

Questa ricerca propone lo studio della radiazione elettromagnetica di frequenza acustica (banda 20 Hz - 20 kHz, che chiamiamo "radioacustica") emessa dalle rocce in condizioni di stress meccanico in prossimità della rottura. Nella mia tesi di laurea erano già state evidenziate emissioni radioacustiche in campioni di roccia portati alla rottura per compressione uniassiale e in masse litoidi fratturate in situ con l'abbattimento di fronti di cava. In quest'ultimo caso era stato possibile riconoscere delle sequenze caratteristiche tali da poter descrivere e distinguere le varie fasi del processo di rottura, crollo, rilassamento e assestamento della massa lapidea.

Sulla base di questa esperienza, l'obiettivo della ricerca di dottorato è quello di valutare l'effettiva possibilità di utilizzare questi segnali EM come precursori sismici. Per prima cosa è necessario verificare l'esistenza in natura di emissioni radioacustiche in associazione a fenomeni sismici. A tal scopo è stato necessario uno studio più approfondito dei fenomeni riproducibili in laboratorio e il monitoraggio continuo dello spettro E-VLF "in aria", per verificare se dal primo è possibile trarre le chiavi interpretative necessarie per individuare nel secondo dei potenziali precursori sismici. Si è cercato inoltre di ottenere delle informazioni utili ad individuare la vera natura del meccanismo di emissione tra alcuni modelli teorici disponibili.

La sperimentazione di laboratorio è tesa dunque ad individuare la natura fisica della sorgente e la relazione tra evoluzione dell'emissione ed evoluzione dello stato tensionale del materiale lapideo. Da queste conoscenze si tenterà di trarre delle chiavi interpretative utili alla stima dell'anticipo dei segnali sul collasso del materiale lapideo.

### 1.1 Il problema dei precursori sismici

Sono già noti molti tipi di fenomeni che occasionalmente possono rappresentare dei premonitori per un sisma imminente. Molti di questi hanno carattere soggettivo e/o rara incidenza, al punto da essere talvolta considerati leggendari. Tra di essi ricordiamo il comportamento anomalo degli animali, la perdita di forza nei magneti, fenomeni luminosi, rombi e boati nell'aria.

Altri fenomeni invece sono più frequenti e consentono rigorose misurazioni quantitative rappresentando quindi un valido indizio, soprattutto se si manifestano in associazione. Tra questi ricordiamo in particolare:

- Variazioni del livello di falda;
- Variazione della concentrazione di gas Radon nelle falde acquifere;
- Variazione dell'attenuazione anelastica delle onde sismiche;
- Fenomeni elettrici (variazioni della resistività del suolo, correnti telluriche, variazioni del campo elettrico);
- Fenomeni magnetici (variazioni del campo magnetico);
- Deformazioni statiche;
- Fenomeni sismoacustici ("pianto della roccia").

Il precursore "ideale" però è un fenomeno che deve rispondere a tre requisiti fondamentali: deve essere oggettivo, deve manifestarsi sistematicamente prima del

sisma e deve necessariamente essere succeduto da un sisma. Purtroppo i precursori studiati fino ad oggi non possiedono mai tutti questi requisiti e la loro attendibilità deve essere quindi avvalorata da un'associazione di fenomenologie diverse e il più possibile numerosa.

Ammesso che un unico fenomeno, o comunque un definito complesso di fenomenologie, possa un giorno rispondere a questi requisiti, il precursore ideale dovrebbe però non limitarsi a palesare l'imminenza di un sisma. L'ideale sarebbe infatti che le sue caratteristiche potessero in qualche modo fornire elementi per descrivere il sisma associato. Dovrebbe cioè suggerire un "dove", un "quando" e un "quanto forte".

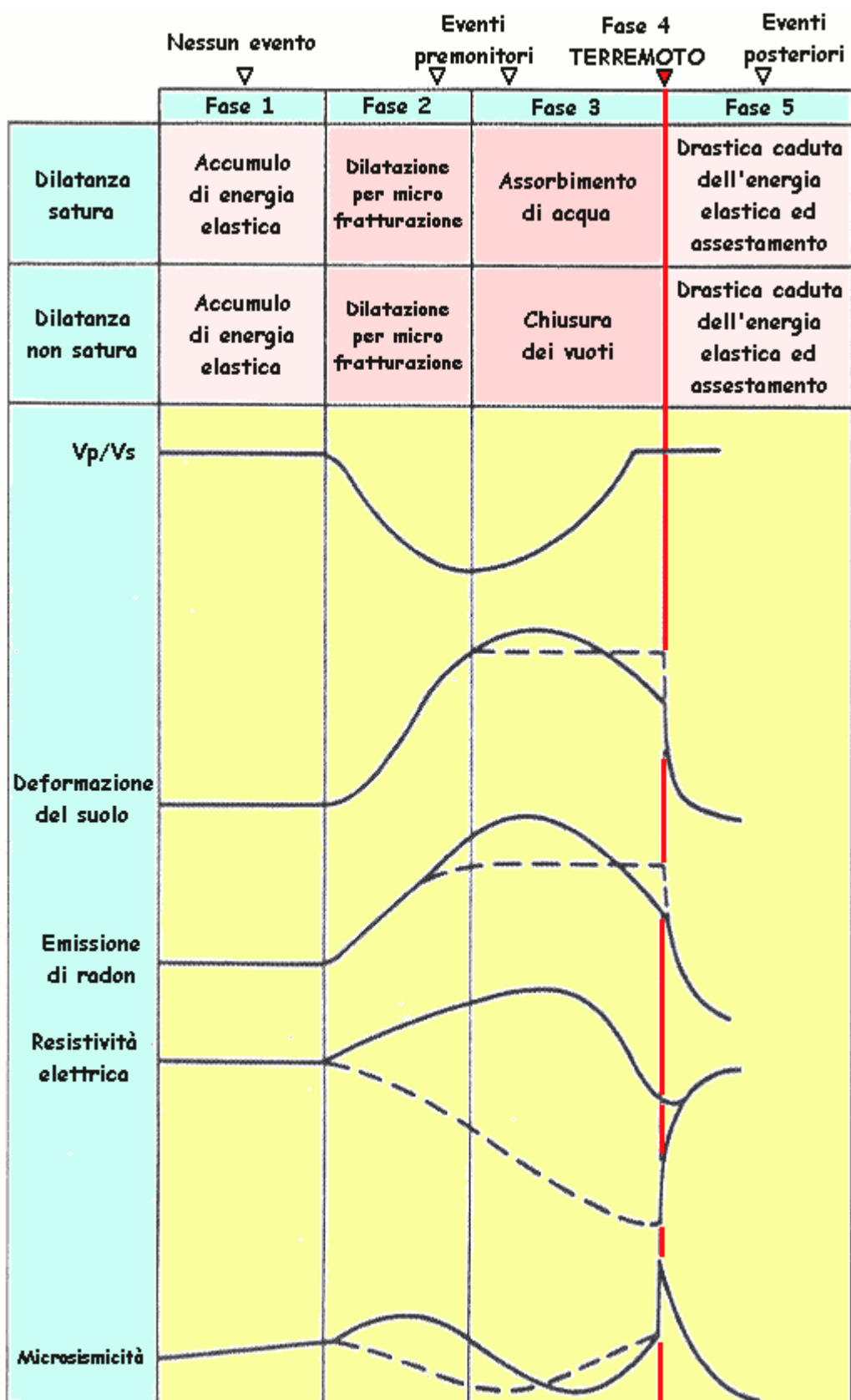
Per poter rispondere a tutte queste caratteristiche, il precursore ideale dovrebbe essere un fenomeno direttamente legato alla tettonica piuttosto che estraneo e indotto in superficie dalle condizioni preparatorie del sisma. Dovrebbe essere una manifestazione diretta e inevitabile del medesimo meccanismo genetico del sisma (*sistematicità*), possibilmente espressione di uno stato avanzato e irreversibile del processo (*necessità*) che nella sua variabilità descriva direttamente l'evoluzione dello stesso processo sismogenetico (il "quando" e il "quanto"). Deve quindi potersi palesare in superficie esso stesso attraverso un mezzo di trasmissione diretta (l'*oggettività* e il "dove") il più rapido possibile (*precorrenza* del sisma).

Si potrebbero riconoscere queste caratteristiche nel fenomeno noto come "pianto della roccia" e nella sua stretta relazione con la *teoria della dilatanza*. Altri precursori, come ad esempio l'aumento di concentrazione di gas Radon, sono fenomeni secondari, conseguenza della dilatanza ma generati da processi subordinati e condizionati da fattori ambientali come la presenza di acqua.

La *dilatanza* è un fenomeno accertato sperimentalmente osservando in laboratorio che un blocco di roccia sottoposto ad uno sforzo di taglio, in prossimità della rottura aumenta il suo volume a causa della formazione di microfratture al suo interno. L'orientamento delle fratture (Rikitake 1986, p.210) è parallelo all'asse di massima compressione ed esse si aprono nella direzione di minima compressione. L'inizio del processo dovrebbe avvenire ad una tensione pari circa ad  $\frac{1}{2}$  della tensione di rottura. Se il blocco è in condizioni sature (Caputo p. 80; Rikitake p. 213) il liquido permea la roccia riempiendo i vuoti. A questo punto è possibile che si verifichino delle alterazioni fisico-chimiche nel materiale, ma soprattutto, la pressione esercitata dall'acqua aumenta l'indebolimento del materiale fino alla formazione della macrofrattura che determina la rottura definitiva del campione.

Questo modello è abbastanza realistico in quanto riproducibile in laboratorio e riferibile a tutti i premonitori precedentemente elencati, per i quali è possibile reperire in letteratura la formulazione di un legame genetico con la dilatanza (Nardi, 2001) in una delle sue due versioni: *satura* e non. Come esempio generale si richiama la figura 1. Questo legame è ciò che rende il fenomeno un *precursore sismico* pur essendo di natura spesso totalmente estranea al fenomeno reologico in sé. Questa "estraneità" e il legame remoto, induttivo e condizionato con il processo della dilatanza è invece ciò che rende i precursori poco attendibili ai fini di una previsione operativa. Tuttavia ciò non vale per l'ultima categoria dell'elenco sopraccitato, quella dei fenomeni sismoacustici.





**Fig.1** – Precursori sismici: variazioni di alcuni parametri legati alla dilatanza secondo il modello americano (linea continua) e il modello russo (linea tratteggiata) nell'ambito delle varie fasi. Modificato da Casati fig. 6.19, pag. 98.

Quando un campione di materiale lapideo viene sottoposto ad uno sforzo meccanico, prima della rottura si verifica un'emissione di onde acustiche nota come il "pianto della roccia". Questo fenomeno, che è stato osservato in molti materiali, fu inizialmente scoperto nello studio dei metalli e descritto come "pianto dello stagno" (Caputo 1987, p. 94).

E' stato sperimentato che l'emissione si genera dapprima in modo diffuso, per poi concentrarsi nella zona dove avverrà la frattura. Il fenomeno è attribuito alla formazione di microfratture e/o ad alterazioni del reticolo cristallino. E' dunque associabile ancora una volta alla dilatanza (Rikitake p. 209; Caputo p. 95).

Si tratta di frequenze acustiche e ultrasoniche che possono raggiungere i 50 kHz ma purtroppo, proprio per questo motivo, sono fortemente attenuate dalla propagazione nel materiale lapideo e raramente raggiungono la superficie. Il terreno, come è noto, si comporta da filtro passabasso per la radiazione meccanica, lasciando raggiungere grandi distanze alle basse frequenze sismiche e attenuando sempre più rapidamente le alte frequenze acustiche o ultrasoniche. In alcuni casi, tuttavia, segnali sismoacustici sono stati osservati come precursori sismici, mentre nelle miniere il loro monitoraggio è un mezzo efficace per la previsione del cedimento delle volte (Caputo, pp. 95 e 87).

Il pianto della roccia, in quanto radiazione meccanica generata direttamente dall'apertura delle microfratture della dilatanza, potrebbe promettere tutti i requisiti del precursore ideale tranne uno: la possibilità pratica di essere rilevato in superficie. Da questo punto di vista il suo problema è analogo a quello delle telecomunicazioni. Esiste un messaggio acustico da trasmettere a distanza ed esiste anche uno strumento "telefonico", il geofono, per captarlo e trasportarlo a distanze "umane". Per superare le barriere geologiche però, come per quelle geografiche, occorrerebbe una soluzione "radiotecnica", ma in che modo? Se la roccia stessa si comportasse da trasduttore radioacustico o emettesse segnale radio dalla sua stessa fratturazione, allora si potrebbe essere vicini - almeno per ipotesi - ad un precursore ideale.

In tempi recentissimi anche i fenomeni di natura elettromagnetica sono entrati a far parte della lista dei precursori sismici e alcuni modelli teorici sul meccanismo di emissione sono già stati ipotizzati. Ciò che occorre è verificare la conformità del fenomeno con le caratteristiche del precursore ideale attraverso l'esperienza sperimentale. Questo è uno degli obiettivi della tesi di dottorato.

## 1.2 I precursori elettromagnetici

L'associazione di qualcosa di "astratto" come le onde radio a qualcosa di "concreto" come un terremoto non è immediata e ipotizzabile a priori. L'idea che un sisma possa essere anticipato da un segnale radio è storicamente da attribuire ad una pura associazione empirica di causa ed effetto derivata dall'esperienza diretta dei radioamatori: gli unici<sup>1</sup> "osservatori abituali" dello spettro radio.

Le innumerevoli testimonianze provenienti da tutto il mondo riguardano "crepitii" che anticipano di alcuni giorni i grandi terremoti e interferenze sulla ricezione delle stazioni radio. Queste "voci allarmanti" hanno ormai suscitato interesse anche nella

---

<sup>1</sup> Gli unici alla luce del sole, perché soprattutto nelle bande ULF-ELF-VLF ci sono importanti applicazioni militari nel campo delle comunicazioni sottomarine che derivano da studi avviati da almeno un cinquantennio di cui non si hanno notizie dettagliate per ovvi motivi strategici di permanente attualità.

comunità scientifica, per lungo tempo tendenzialmente scettica probabilmente proprio a causa della difficile individuazione teorica di una sorgente elettromagnetica associabile a fenomeni presismici.

Si osserva spesso nell'atteggiamento dei sismologi un certo scetticismo generalizzato nei confronti di qualsiasi cosa venga proposta come possibile precursore di terremoti, assumendo che tutti cercano precursori in tutto con troppa leggerezza. Nel caso di questa strana associazione radioonde-terremoto però si dovrebbe almeno considerare che i radioamatori non sono "ossessionati" dal concetto di terremoto come i sismologi che lo studiano ma anzi questo pensiero è probabilmente l'ultimo che può sfiorare la mente del radioamatore nell'ambito della sua attività. Il fatto stesso che un personaggio indifferente come un radioamatore possa concepire una tale associazione di idee dovrebbe piuttosto far riflettere sull'evidenza con cui potrebbe essersi manifestata nella storia del radiantismo questa coincidenza tra "radiodisturbo di natura sconosciuta" e "terremoto di intensità tale da far notizia", tanto più che questo fenomeno non è breve e immediatamente precedente come nel caso del leggendario nervosismo degli animali.

La storia scientifica delle emissioni radio associate ai terremoti non parte tuttavia da questo importante spunto ma si potrebbe far risalire, dal punto di vista epistemologico, agli studi sugli "esoelettroni" rilevati in esperimenti di rottura su metalli e materiali lapidei. Si tratta semplicemente di particelle cariche che vengono liberate dai reticoli cristallini durante la fratturazione (Rabinowicz, 1977).

A questo tipo di esperienze dobbiamo affiancarne altre di carattere più meccanico che si riveleranno inerenti in vista di una possibile sorgente di emissione radio. Si tratta della già citata "teoria della dilatanza" (Scholz, 1973) e dei relativi esperimenti in cui è stato osservato, nel materiale lapideo sottoposto a compressione, un aumento di volume prima della rottura dovuto alla microfratturazione che precede e da luogo alla frattura di collasso (per tutti: Mogi, 1962). Esperienze analoghe sulla fratturazione di campioni lapidei hanno evidenziato anche il fenomeno del "pianto della roccia": una vibrazione meccanica ad alta frequenza (dell'ordine dei kHz) inizialmente individuata nei metalli come "pianto dello stagno" (Caputo, 1987). Questo fenomeno sembra causato proprio dall'apertura delle microfratture. Infine esperimenti di rottura eseguiti su campioni isolati dalla pressa e collegati ad elettrodi (Stavrakas et. al., 2002) hanno rivelato la presenza di correnti elettriche variabili precursori e concomitanti alla rottura, generate presumibilmente dalla piezoelettricità dei minerali.

A questo punto è accertata, prima della rottura, la presenza di particelle cariche e di correnti variabili, la formazione di microfratture e di una vibrazione meccanica ad esse associata. E' possibile, quindi, ipotizzare l'emissione di segnali radio stimolata dalla microfratturazione in diversi modi: dalla formazione di correnti alle scintille, dall'effetto piezoelettrico all'induzione sismomagnetica. Parte della sperimentazione di laboratorio prevista in questa tesi di dottorato consiste appunto in test inibitori che avranno lo scopo di verificare quale tipo di meccanismo contribuisce realmente all'emissione radio.

La ricerca vera e propria sui segnali radio naturali come precursori sismici vede una crescente consapevolezza dell'importanza di questo tipo di precursore da parte della comunità scientifica attraverso una serie di esperienze dapprima casuali (variazione dei campi statici) e poi sempre più mirate, fino a ricalcare tutte le testimonianze dei radioamatori. Il primo contatto ufficiale si potrebbe far risalire al

1980 quando, in relazione al forte terremoto di Sugadaira, i giapponesi Kamogawa e Ohtsuki rilevano emissioni radio dalla banda<sup>2</sup> ELF fino alle HF. A questo episodio si susseguiranno numerose testimonianze scientifiche, sempre meno occasionali e sempre più convincenti:

<b>anno</b>	<b>banda</b>	<b>evento associato</b>	<b>bibliografia</b>
1988	ULF	Spitak, Armenia, 12.07.88, M=6.9	Molchanov et al., 1992
1989	ULF	Loma Prieta, California, 17.10.89, M=7,1	Fraser-Smith et al., 1990
1993	ULF	Guam, Giappone, 08.08.93, M=8,0	Smirnova et al., 2001
1995	ULF-VHF	Kobe, Giappone, 17.01.95, M=7,2	Nagao et. al., 2001
1995	VLF, VHF	Kozani, Grecia, 13.05.95, M=6,6	Eftaxias et. al., 2002
1998	ULF	S.J. Bautista, California, 12.08.98, M=5,1	Karakelian et. al., (- -)
1999	VLF	Atene, Grecia, 07.08.99, M=5,9	Eftaxias et. al., 2002
1999	ULF-ELF	Chi-Chi, Taiwan, 21.09.99, M=7,6	Ohta et. al., 2001 Akinaga et al., 2001
1999	ULF	Hector Mine, California, 16.10.99, M=7,1	Karakelian et. al., 2000
2000	ULF	Izu, Giappone, 27.06.2000, M=6.4	Ismaguilov, 2002

Nel 2000 in Kamchatka, oltre ai soliti precursori ULF, vengono osservate anomalie presismiche nei segnali dei radiofari di navigazione in VLF (Molchanov, 2002; Gladyshev, 2001) mentre a Tokyo, l'Università di Chofu, studia le anomalie sulla ricezione di radio Sendai (banda comunemente nota come "FM") constatando anticipi di alcuni giorni sui fenomeni sismici (Fukumoto, 2001). Se prima qualcuno riteneva che i radioamatori si atteggiavano a scienziati, adesso però sono gli scienziati a diventare radioamatori.

Ma le esperienze più rappresentative di questo strano trend vengono proprio dalla terra di Marconi dove le prime testimonianze risalgono a tempi insospettabili. L'aspetto più appariscente dei precursori EM infatti è quello delle "luci sismiche" di cui in Italia si ha notizia documentata<sup>3</sup> almeno fin dal 1570.

Il primo elenco sistematico di fenomeni elettromagnetici associati a terremoti fu redatto da Galli nel 1910, che riportò 148 fenomeni luminosi accaduti in Italia, 52 prima e 37 durante o dopo il terremoto associato. I più frequenti tra i fenomeni osservati sono bagliori apparsi durante il terremoto. Nubi luminescenti e luci diffuse compaiono invece prima durante e dopo il terremoto.

<sup>2</sup> Per la legenda delle sigle è allegata in appendice una tavola della suddivisione in bande dello spettro radio.

<sup>3</sup> La prima documentazione scritta di un possibile fenomeno elettrico associato al terremoto potrebbe essere il manoscritto di un autore ignoto citato nella cronaca di Solerti (1889) che descrive un fenomeno luminoso accaduto durante e dopo i terremoti del 17 novembre e 18 dicembre 1570 e successivamente il 23 e il 30 novembre 1571" (Caputo, 1987).

Nel 1993, sei anni di misure condotte in una grotta dell'Appennino centrale evidenziarono anomalie presismiche nei segnali elettrici, magnetici e sismoacustici. Però in quella stessa grotta, per quanto strano possa sembrare, c'era anche una radio appositamente sintonizzata sulle Onde Lunghe (LF) che alcuni giorni prima del terremoto del 4/6/93 ha consentito di misurare un'attenuazione di 20 dB nella trasmissione di R. Montecarlo sui 216 kHz (Bella et al., 1993 e 1998). Seguirono quindi studi più approfonditi sulle variazioni di intensità dei segnali radio delle stazioni in onde lunghe di R. Montecarlo, Rai 2 (Caltanissetta) e Repubblica Ceca (Biagi, 2001).

Nel 1997 il prof. Mognaschi dell'Università di Pavia (fisico, ma anche radioamatore) esamina l'evoluzione dei "rumori anomali" rilevati da un radioamatore umbro prima del terremoto del 12.05.97 nell'Italia centrale<sup>4</sup>, evidenziando che la dinamica del fenomeno è caratterizzata da una deriva ascendente che interessa un'ampia gamma di frequenze (Mognaschi, 1998). Da ciò è seguito uno studio sperimentale in cui un radiorecettore sulla banda delle Onde Medie ha registrato impulsi EM in corrispondenza e talvolta in anticipo rispetto alla rottura per compressione uniassiale di campioni di *gneiss* (Mognaschi et Zezza, 2000). Da queste esperienze derivano ipotesi sull'origine e la propagazione della radiazione elettromagnetica presismica (Mognaschi, 2002) tra cui proprio quel modello di "apertura di vuoti in un dielettrico" che si intende mettere alla prova con gli esperimenti previsti in questa tesi di dottorato.

Infine si potrebbero citare anche gli studi dello scrivente che, sebbene abbiano preso spunto da una sperimentazione amatoriale scaturita dalla passione per la radio e l'astronomia<sup>5</sup>, nel 2001 si concretizzarono nella tesi di laurea in Scienze Geologiche. Va sottolineato che gli esperimenti e le osservazioni presentati nella tesi (Nardi, 2001) risultano coerenti, se non analoghi, a quelli ottenuti nel 2003 in Grecia dal gruppo di Eftaxias (Eftaxias et al. 2003), con la differenza che loro hanno potuto avvalersi di qualche riscontro su veri fenomeni sismici, mentre il riscontro "in situ" della mia tesi riguardava emissioni prodotte dal crollo di fronti di cava. Era dunque opportuno impiegare almeno la tecnica e la tecnologia già sviluppate per monitorare dal vivo dei segnali naturali, e verificare l'analogia con i fenomeni simulati in laboratorio. Questo è appunto il tema principale della tesi di dottorato.

### 1.3 La banda radioacustica e il radiogeofono

In questa tesi è stata studiata quella particolare regione dello spettro radio che ha la caratteristica di corrispondere (come periodo delle oscillazioni) all'intero spettro dei suoni acustici, estendendosi dai 20 Hz a 20 kHz. Questa gamma di frequenze attraversa le bande radio ULF, ELF e VLF, che si trovano al di sotto di quelle normalmente utilizzate per le comunicazioni radiofoniche. La scelta di questa banda non convenzionale, che chiameremo *radioacustica*, è la chiave del particolare tipo di soluzioni tecniche impiegate in questa ricerca. La corrispondenza nel periodo di oscillazione tra onde radio e onde acustiche ci consente di registrare e analizzare la radiazione EM attraverso tutta una serie di tecnologie a basso costo perché già

---

<sup>4</sup> Costui aveva perfino avvisato i carabinieri 2 giorni prima del sisma.

<sup>5</sup> Il radiogeofono nel suo primo progetto era destinato ad essere un radiotelescopio amatoriale.

disponibili sul mercato per le applicazioni HiFi. Non bisogna con ciò pensare ad una tecnologia di seconda classe ma solo alla disponibilità di alta tecnologia a bassi costi. Come si vedrà è stato possibile effettuare acquisizioni digitali e analisi numeriche molto elaborate. Piuttosto questa soluzione tecnica ha segnato la differenza tra ciò che si è fatto e ciò che non si poteva fare, considerando quali sono le risorse disponibili per un dottorato di ricerca.

Un particolare tipo di ricevitore radio, che è stato chiamato *radiogeofono*, è l'unico strumento non convenzionale utilizzato nell'elaborazione del segnale. Prima di descrivere il ricevitore però è opportuno inquadrare lo "scenario elettromagnetico" in cui lavora.

La tabella 5.5 in appendice mostra la suddivisione ufficiale delle bande radio mentre la fig. 1 schematizza la sola porzione inferiore dello spettro radio, dove è situata la banda "radioacustica". La gran parte delle stazioni radio di diffusione internazionale è notoriamente concentrata nelle Onde Corte (HF). Le Onde Medie (MF) sono normalmente utilizzate per le stazioni di diffusione nazionale (In Italia Radiouno RAI). La più bassa banda utilizzata per le trasmissioni in fonia è quella delle Onde Lunghe (LF). La banda delle Onde Ultra Lunghe (VLF) è in assoluto la più bassa utilizzata per le radiocomunicazioni. Qui le onde radio hanno frequenza acustica e non è più possibile modulare l'onda portante con la voce umana anche perché la larghezza di banda della voce umana è ampia più di questa banda radio. Vi si trovano quindi esclusivamente comunicazioni digitali (trasmissione acustica codificata), per lo più stazioni di radiolocalizzazione (rete Loran), stazioni "campione di Tempo e Frequenza" e trasmissione di telefoto o MeteoFAX.

Al di sotto dei 12 kHz non esistono ufficialmente trasmissioni prodotte dall'uomo, anche se è noto che il Norad statunitense, e certamente analoghe strutture di altri paesi, effettuano sulle basse frequenze le comunicazioni unilaterali terra-nave con i sottomarini in immersione. Queste bande infatti offrono la massima penetrazione nei solidi e la migliore propagazione nell'acqua salata e per i sottomarini nucleari rappresentano l'unico modo possibile per ricevere ordini negli abissi oceanici senza dover emergere e rischiare l'individuazione da parte dei satelliti spia.

La banda radioacustica dunque è interessata da pochissime trasmissioni digitali, alcune delle quali non ufficialmente esistenti. Per il resto vi si manifestano soltanto fenomeni naturali ed emissioni di origine industriale, comunemente note come *elettrosmog*. I segnali naturali sono per lo più di origine atmosferica e legati a fenomeni altamente energetici. I segnali artificiali hanno incidenza in funzione della distanza della stazione ricevente dai centri urbani. Sono principalmente la riga spettrale dei 50 Hz e le relative armoniche superiori emesse dalla rete di distribuzione della corrente elettrica e in secondo luogo, in ambiente urbano, una serie di apparecchiature di uso comune quali lampade al neon, motori elettrici, ecc. Naturalmente la conoscenza di tutti questi segnali è essenziale nell'interpretazione del monitoraggio E-VLF.

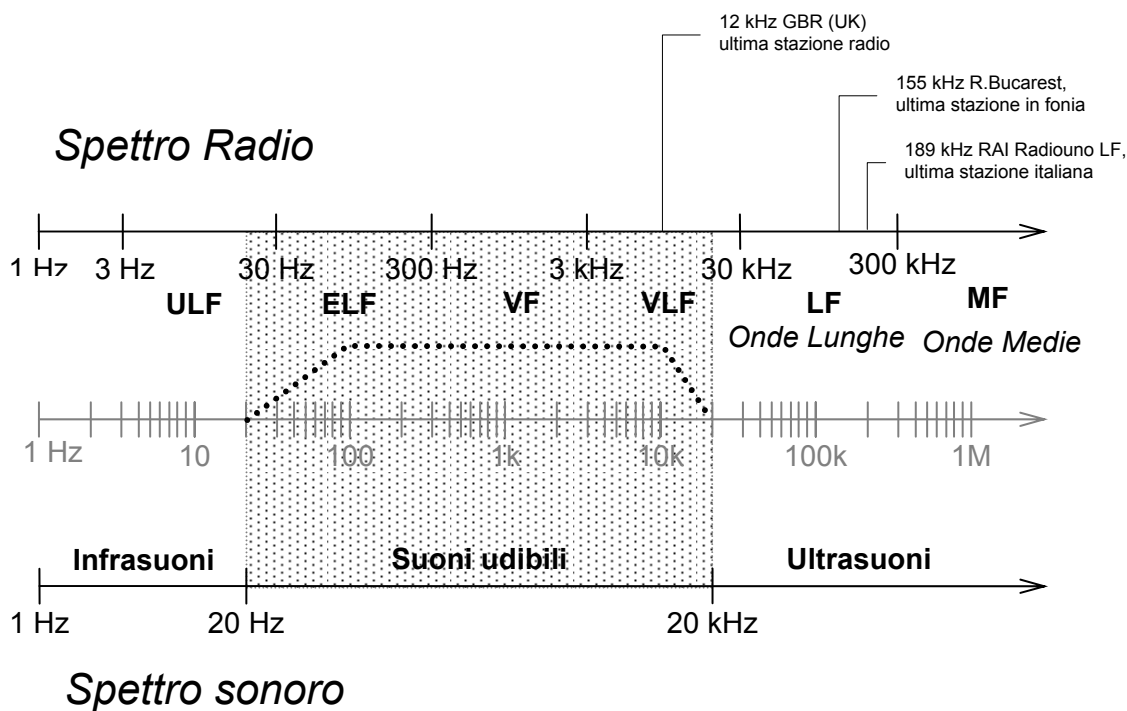


Fig.1 – Corrispondenza tra lo spettro sonoro e la regione più bassa dello spettro radio. La regione dello spettro EM che chiamiamo “banda radioacustica” è quella corrispondente allo spettro dei suoni udibili indicata nell’area puntinata. La scala logaritmica centrale indica la progressione delle frequenze, che sono la caratteristica comune tra i due tipi di radiazione. Su di essa è indicata la curva di risposta del “radiogeofono”.

Lo strumento utilizzato per monitorare questi segnali radio è un ricevitore di campo ELF-VLF. Si comporta come un trasduttore a larga banda che trasforma la radiazione EM, sondata nella sua componente *campo elettrico*, in segnale elettrico di analoghe caratteristiche spettrali. La curva di risposta dello strumento, con una dinamica di circa 60 dB, è indicata nella fig.1 sulla scala centrale. Il segnale in uscita è un suono di livello compatibile con l’ingresso *Line* di una scheda sonora. Il fatto di lavorare su frequenze sonore, anziché sismiche, lo accomuna in un certo senso al classico geofono, che tuttavia sonda la radiazione meccanica nel terreno. Per questo motivo è stato scelto il nome di *radiogeofono*. Il modello “Gaia-T”, utilizzato in questa ricerca, è l’ultimo di una serie derivata da una lunga esperienza sperimentale iniziata con lo studio di un radiotelescopio amatoriale, che avrebbe dovuto operare su una banda “pulita” dalle trasmissioni umane. Come i precedenti è di costruzione artigianale e basato su un progetto originale che, pur simile ad altri schemi utilizzati dai radioamatori, è stato sviluppato per rispondere in modo scientificamente appropriato a questo specifico scopo. In quest’ultima versione in particolare sono stati risolti alcuni problemi che ne limitavano l’applicazione nelle stazioni ad acquisizione automatica. Gaia-T si presenta come un tubo di plastica lungo 125 cm che contiene un impianto integrato antenna-ricevitore. Il tubo Gaia può essere esposto agli agenti atmosferici ed operare quindi all’aperto per il monitoraggio continuo dei segnali naturali in atmosfera. Attraverso un unico cavo a bassa dispersione si collega ad un PC posto al coperto, dal quale riceve l’alimentazione e al

quale fornisce i dati attraverso una comune scheda sonora. La durata dell'autonomia di questa stazione dipende esclusivamente dal PC. Gli unici problemi riscontrati fin ora sono dovuti alle temperature ambientali superiori ai 50°C o inferiori ai -20°C.

## 1.4 Obiettivi e struttura della ricerca

La ricerca è impostata su due fronti paralleli: la simulazione in laboratorio e il monitoraggio in atmosfera.

In laboratorio sono state eseguite prove di compressione uniassiale fino alla rottura su campioni di roccia di grandi dimensioni (relativamente agli standard sperimentali). Il processo di compressione, microfratturazione e rottura del campione simula l'analogo processo che in natura è la causa materiale del terremoto, anche se le condizioni del provino non corrispondono allo stato della roccia in situ per la mancanza della pressione di confinamento.

Il monitoraggio della radiazione EM in atmosfera si avvale di tre stazioni ad acquisizione automatica che in tre siti del centro Italia sondano i segnali E-VLF naturali alla ricerca di emissioni associabili a fenomeni sismici reali.

In entrambi i casi i dati raccolti in modalità digitale e sottoposti ad analisi numerica forniscono degli spettrogrammi, ovvero dei diagrammi che esprimono la variabilità nel tempo delle ampiezze misurate sulle componenti "cromatiche" del segnale sorgente. Questo tipo di analisi a tre variabili (ampiezza, frequenza e tempo) fornisce una sorta di "impronta spettrale" del segnale, utile a discriminare fenomeni di diversa natura.

Le simulazioni in laboratorio, eseguite su campioni di diversa litologia e in diverse condizioni di saturazione, hanno avuto principalmente le seguenti finalità:

- determinare un modello di impronta spettrale dell'emissione EM;
- verificare il legame tra l'evoluzione dell'emissione e la dinamica del processo meccanico della rottura;
- ricercare nella tipologia dell'emissione eventuali caratteristiche utili alla previsione della rottura;
- stimare l'ampiezza del segnale alla sorgente;
- indagare la natura del meccanismo di emissione.

Le prove di rottura in saturazione d'acqua hanno lo scopo di riprodurre particolari condizioni reali (acqua dolce) ed interferire con il meccanismo di emissione (acqua salata) nel tentativo di attenuare il fenomeno. In questo modo è possibile valutare i limiti della propagazione del segnale naturale ed ottenere indizi sulla validità dei modelli teorici circa il meccanismo di emissione. Ulteriori test effettuati con una sorgente artificiale hanno fatto luce sulla propagazione del segnale in roccia, aria, acqua dolce e salata. Sempre con la sorgente artificiale si è potuto inoltre valutare l'ampiezza del segnale alla sorgente.

Il più importante obiettivo però è stato quello di definire un modello dell'impronta spettrale di quei segnali che, in condizioni controllate e di massima schermatura dai fenomeni esterni, non potevano avere altra origine che dal processo di deformazione e rottura della roccia sottoposta allo stress meccanico. Le sonde atmosferiche infatti



avrebbero captato una moltitudine di emissioni EM di diversa natura e origine, tra i quali era necessario, attraverso l'analisi spettrale, non soltanto scartare quelli di sicura origine artificiale o atmosferica ma anche riconoscere i possibili segnali di natura geologica. La finalità ultima del monitoraggio in atmosfera è appunto quella di confrontare eventi EM "sospetti" con gli eventi dei cataloghi sismici alla ricerca di possibili correlazioni. In questa fase di indagine, infatti, i presunti eventi precursori eventualmente evidenziati non saranno ancora degli spunti per formulare previsioni ma il risultato di una verifica svolta a posteriori sui dati immagazzinati dalle stazioni automatiche per individuare dei criteri di riconoscimento.



## 2.0 Il lavoro sperimentale

Gli obiettivi prefissati hanno richiesto la realizzazione pratica di 4 ricevitori VLF, tre stazioni fisse per l'acquisizione digitale automatica gestite da altrettanti computers, un laboratorio attrezzato per la rottura dei campioni in saturazione e un dispositivo per la registrazione digitale sincronizzata di tutta la strumentazione di monitoraggio delle prove di rottura. E' stato necessario inoltre reperire materiale lapideo di diversa natura e lavorare provini di forma e dimensioni idonee alle prove.

Per realizzare tutto ciò sarebbe stato necessario l'impiego di fondi e strumentazioni di cui l'università non disponeva. Il contributo del Dipartimento di Scienze della Terra si è concretizzato nella disponibilità di una sega circolare per il taglio dei campioni. La macchina utilizzata per le prove di rottura è la pressa idraulica da 500t messa a disposizione dal Laboratorio Terre dell'Istituto Sperimentale delle Ferrovie dello Stato. Attorno a questo indispensabile strumento è stato allestito un intero laboratorio di analisi deformativa e spettrometrica progettato e realizzato sulla base della tecnologia HiFi. E' stata cioè adattata allo scopo tutta quella tecnologia informatica ed elettronica per il trattamento dei suoni esistente sul mercato ad altissimo rapporto prestazione/prezzo. La natura stessa di questa tecnica d'indagine e della banda utilizzata, scaturite da una ricerca iniziata come radioamatore, hanno consentito la piena applicazione di questa strategia delle risorse.

Il lavoro sperimentale si è sviluppato dunque in tre fasi successive:

- preparazione dei campioni
- progettazione e realizzazione del laboratorio e delle stazioni automatiche
- esecuzione materiale della sperimentazione sui campioni e manutenzione delle stazioni di monitoraggio.

### 2.1 Preparazione dei campioni

Per le prove di rottura erano necessari campioni di grandi dimensioni e varia litologia che si è scelto di ricercare tra i litotipi più rappresentativi dell'Appennino umbro-marchigiano. Sono stati raccolti complessivamente 11 blocchi lapidei (fig.1) nell'area dei Monti Sibillini:

- *Calcare Massiccio* delle gole della Valnerina presso Visso (MC)
- *Calcare Corniola* presso Norcia, Forca Canapine, versante marchigiano.
- *Calcare marnoso Scaglia* presso Ospedaletto di Norcia (PG)
- *Arenaria argillosa della Laga* presso Favalanciata di Acquasanta Terme (AP)

La misura standard utilizzata dalle FS per i test sui materiali con la pressa da 500t era 10x10x10 cm. Avendo a disposizione anche alcuni campioni delle FS già lavorati (avanzati da loro precedenti lavori) e dovendo costruire uno schermo paraschegge sulla misura dei campioni, si è deciso di uniformare l'altezza dei nostri provini a quella standard delle ferrovie, mentre le dimensioni delle basi sono state ridotte ad 8x8 cm per uniformare tutti i nostri campioni alla dimensione massima che poteva essere ricavata dai blocchi raccolti. Se infatti dal *calcare massiccio* non era difficile estrarre campioni di 10 cm di lato, per le stratificazioni della *scaglia variegata* non era stato possibile estrarre blocchi di spessore superiore ai 10 cm e la dimensione massima che se ne poteva ricavare lavorando agevolmente era appunto di 8 cm.

La lavorazione dei campioni ha richiesto le seguenti operazioni:

- taglio dei blocchi in parallelepipedi di 8x8x10 cm
- rettifica del parallelismo delle facce 8x8
- smerigliatura delle facce 8x8

Per il taglio dei campioni è stata usata la più grande sega circolare di cui disponeva il Laboratorio Tagli del Dipartimento di Scienze della Terra (fig.2). Questa macchina ad acqua nel suo uso consueto era stata modificata per essere impiegata come rettifica per il taglio delle carote, grazie al montaggio di un'apposita morsa sulla base scorrevole. In queste condizioni garantiva probabilmente la perfetta perpendicolarità della superficie di taglio rispetto all'asse di un campione cilindrico alloggiato nella morsa, ma sembrava tuttavia aver perso la perpendicolarità della lama rispetto al piano della base. Il piano stesso, composto da due parti solidalmente scorrevoli ai lati della lama, era ormai diviso in due differenti livelli. Questo particolare causava la frattura dell'ultimo setto al termine di quasi ogni taglio.

Per questi motivi (oltre alla mia inesperienza come marmista) è risultato piuttosto difficile assicurare la perfezione geometrica dei 32 parallelepipedi ottenuti (fig.3) ed è stato necessario un successivo intervento di correzione almeno per le basi minori, sulle quali avrebbe agito la pressa.

L'unico strumento per la rettifica dei provini di cui si aveva conoscenza era una grossa macchina installata presso lo stesso laboratorio delle Ferrovie, che però era fuori uso da qualche tempo. Dopo alcuni sopralluoghi si è potuto accertare che aveva soltanto un'avaria all'impianto di carico e scarico dell'acqua, che abbiamo potuto accomodare in modo semplice ma efficace senza compromettere la funzionalità e la sicurezza dell'impianto. Con questo dispositivo è stato rettificato il parallelismo delle basi minori di tutti i provini (fig.4).

Le stesse superfici rettificate sono state infine smerigliate (fig.5) sempre presso il laboratorio FS, per assicurare la perfetta aderenza con le piastre della pressa.

Da questa seconda lavorazione sono stati ottenuti 30 campioni utili (fig.6), campioni cioè di forma e dimensioni uniformi e un parallelismo delle basi minori largamente compatibile con la tolleranza della pressa, che era di 0,5 mm. Alcuni di questi sarebbero stati sottoposti alle prove uniassiali in saturazione d'acqua dolce o salata e in questo caso la lavorazione è proseguita con le seguenti operazioni:

- essiccazione in forno ventilato
- misura del peso secco
- saturazione in acqua dolce o salata
- misura del peso saturo
- mantenimento in saturazione fino al loro impiego

L'essiccazione è durata 24 ore in un forno ventilato a 110°C (fig.7). La pesatura è stata eseguita su una bilancia elettronica centesimale (fig.8) sufficiente a verificare l'effettivo assorbimento del liquido da parte del campione. Tutti i provini poi sono stati mantenuti in stato di saturazione (fig.9) per un numero variabile di giorni, ma in ogni caso per più di una settimana prima del loro impiego sotto la pressa, durante il quale sono stati mantenuti ancora in stato di saturazione.

Come già accennato, alcuni campioni di forma cubica erano già disponibili presso il laboratorio delle FS. Tra questi sono state scelte alcune litologie particolarmente interessanti e differenziate, non trascurando nemmeno i campioni di calcestruzzo.

Nella tabella seguente sono elencate le tipologie dei provini lavorati e di quelli selezionati dal magazzino delle FS:

<b>LITOLOGIA</b>	<b>PROVENIENZA</b>	<b>PEZZI</b>
Calcere massiccio	Visso (MC)	8
Corniola	Norcia (PG)	8
Scaglia Variegata	Cascia (PG)	4
Arenaria argillosa	Acquasanta Terme (AP)	9
<i>Porfido</i>	<i>Albiano (Trento)</i>	3
<i>Calcere marnoso</i>	<i>“Canonica”</i>	2
<i>Calcere cristallino</i>	<i>Brescia</i>	2
<i>Calcere micritico</i>	<i>“cava di Colle Mollone”</i>	2
<i>Calcere spatitico</i>	<i>Bicurca (PA)</i>	3
<i>Metamorfite</i>	<i>Funtana Figu, Marrubiu (Oristano)</i>	1
<i>Peridotite</i>	<i>“Alpi”</i>	1
<i>Marmo</i>	<i>“Magari, Amantea” (Cosenza?)</i>	2
<i>Granito</i>	<i>“Foppa Montagnola”</i>	2
<i>Calcestruzzo a breccia</i>	- - -	1
<i>Calcestruzzo a ghiaia</i>	- - -	4
<i>Calcestruzzo “graniglia”</i>	- - -	1

I provini forniti dalle FS sono indicati in carattere corsivo. In questo caso la litologia è stata stabilita dall'esame a vista del campione mentre la provenienza deriva dai pochi documenti rinvenuti sui quali però non era possibile chiarire se l'intestazione fosse effettivamente riferita al luogo di origine. Nella tabella le provenienze incerte sono indicate tra virgolette.

**Fig.1** – Alcuni degli 11 blocchi raccolti sui Monti Sibillini. Le litologie scelte sono state: Calcare Massiccio, Corniola, Scaglia variegata e Arenaria.

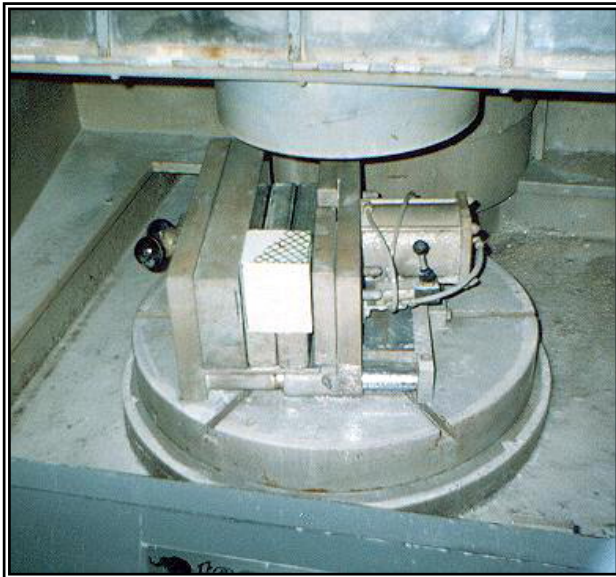


**Fig.2** – Taglio dei blocchi (laboratorio DST). Da ciascun blocco si è ricavato più di un campione, tagliato in forma di parallelepipedo con una particolare cura nel parallelismo.



**Fig.3** – Campioni rappresentativi delle quattro litologie confrontati con un blocco grezzo. Le dimensioni dei provini sono 8x8x10 cm.





**Fig.4** – Macchina per la rettifica del parallelismo delle facce (laboratorio FS). Con un pennarello sono state colorate le basi del campione per evidenziare l'azione levigante durante la lavorazione.



**Fig.5** – La smerigliatrice (laboratorio FS). Le basi minori di ciascun campione sono state levigate con carta abrasiva a grana finissima per assicurare la massima aderenza alle piastre della pressa.



**Fig.6** – Campioni pronti per le prove di rottura. Sono stati lavorati in totale 32 provini.

**Fig.7** – Bilancia elettronica centesimale per la pesatura dei provini. Sui campioni da impiegare nelle prove in saturazione sono stati misurati i pesi naturale, secco e saturo.



**Fig.8** – Provini nel forno. Per rilevarne il peso secco, i campioni destinati alle prove sature sono stati tenuti per 24 ore in un forno ventilato a 110°C.



**Fig.9** – Provini in saturazione. Tutti i campioni da testare in saturazione d'acqua dolce o salata sono stati saturati, pesati e mantenuti in saturazione per almeno una settimana prima della prova di rottura.





## 2.2 Note sull'acquisizione digitale

Il primo problema da risolvere è stato quello dell'acquisizione dei dati. Nel lavoro della tesi di laurea il segnale acustico era registrato in modo analogico su nastro magnetico e solo successivamente gli episodi più rappresentativi venivano campionati ed analizzati in modo digitale. Questo doppio passaggio limitava la larghezza di banda (il registratore filtra il segnale attraverso la propria curva di risposta) e non consentiva di misurare l'intensità assoluta dei segnali. Il primo passo per ciascuna applicazione (laboratorio e atmosfera) è stato dunque quello di progettare dei sistemi di acquisizione totalmente digitali. Più avanti verrà esposta nel dettaglio la meccanica dei due sistemi. In questo paragrafo verranno invece discussi i problemi e le scelte relativi ai vari parametri in gioco nell'acquisizione digitale e nell'analisi numerica. Anche se non si parla di accelerometri ed onde sismiche si è pur sempre messa a frutto la teoria dell'analisi numerica dei dati sismici, applicandola a questo nuovo scenario fatto di segnali elettromagnetici, frequenze acustiche e spettri dinamici. Per la bibliografia delle formule si rimanda dunque alle dispense del corso di Sismologia del prof. Caputo.

La registrazione digitale di un segnale acustico, rispetto al segnale sismico, richiede una scheda di campionamento ad alta frequenza. Come schede di campionamento sono state utilizzate le comuni schede sonore per PC.

La *frequenza di campionamento* ( $F_C$ ) è il numero di campioni raccolti in un secondo. Il Teorema di Nyquist dimostra che nel campionamento digitale la massima frequenza utile, nota appunto come *frequenza di Nyquist* ( $F_N$ ), risulta pari a  $\frac{1}{2}$  di  $F_C$ . Nel caso dei suoni, la cui banda si estende da 20 Hz a 20 kHz, quest'ultima frequenza sarà anche la  $F_N$  e corrisponde ad una minima  $F_C$  di 44 kHz. Le schede sonore sono state impiegate con  $F_C$  pari alla misura standard di 44100 Hz per poter lavorare sull'intero spettro dei suoni udibili con una  $F_N$  di 22050 Hz (tav.1).

A differenza del segnale analogico, la cui ampiezza varia con continuità, un segnale digitale è costituito da una successione regolare di campioni in corrispondenza dei quali è stata effettuata una misura di intensità. Tale intensità è a sua volta "quantizzata" in una scala suddivisa in dato numero di livelli. Se la risoluzione nei tempi dipende dalla quantità  $F_C$  di campioni raccolti nell'unità di tempo, la risoluzione nella lettura dell'intensità dipende invece dal numero di frazioni in cui è suddivisa la scala. Per tutte le applicazioni di questo studio l'acquisizione digitale è stata effettuata a 16 bit, corrispondenti a 65536 livelli di intensità (tav.2).

Il segnale elaborato dalla scheda sonora è di tipo elettrico, derivato dalla trasformazione diretta di oscillazioni EM in oscillazioni elettriche ad opera del radiogeofono. L'intensità di questo segnale può variare di molti ordini di grandezza ed ha quindi bisogno di essere espressa su scala logaritmica. In questo lavoro è stata scelta la scala in *Decibel* (dB), molto diffusa nelle applicazioni acustiche e analoga alla magnitudo sismica, esprimendo il logaritmo di un rapporto di intensità (tav.3). Lavorando su segnali elettrici, i livelli di intensità sono stati misurati in volt ed espressi in dBV.

Il segnale elettrico campionato dalla scheda sonora è ormai trasformato in una matrice numerica che può essere memorizzata sui supporti digitali e studiata attraverso processi di analisi matematica.

L'analisi del segnale nel dominio dei tempi (analisi della forma d'onda) può contare su una dinamica di circa 60 dB (dinamica minima strumentale, determinata dal radiogeofono) e un intervallo di lettura compreso tra  $1/F_N = 4,5 \times 10^{-5}$  sec e infinito.

L'analisi del segnale nel dominio delle frequenze (analisi spettrale) consente di scomporre il segnale nelle sue componenti cromatiche. Il Teorema di Fourier dimostra che varie classi di funzioni possono essere scomposte in una somma di seni e coseni. Analogamente qualsiasi oscillazione irregolare può essere scomposta in una somma di funzioni d'onda sinusoidali aventi ciascuna una propria ampiezza e una propria frequenza. Grazie all'applicazione della *trasformata di Fourier*, attraverso un algoritmo noto come *Fast Fourier Transform* (FFT), è quindi possibile operare matematicamente sulla matrice numerica del segnale digitale evidenziando il contributo di energia apportato da ciascuna componente spettrale.

La funzione FFT viene applicata su un certo numero di campioni alla volta ( $n$ ), ovvero su un determinato periodo di analisi ( $T_A$ ). La frequenza corrispondente a tale periodo è la risoluzione dell'analisi spettrale ( $F_R$ ), ovvero la minima frequenza leggibile, mentre la massima è ancora quella fissata dalla  $F_N$ . La nostra analisi dunque è vincolata ad una frequenza massima 22050 Hz e può variare la risoluzione in funzione di  $T_A$  (tav.4).

A questo punto si pone una scelta importante, quella della  $T_A$ , che deve essere ponderata in funzione degli obiettivi che si vuole raggiungere. La nostra analisi infatti non vuole fermarsi a fotografare un'istantanea del fenomeno ma ha il preciso scopo di filmare la dinamica degli eventi. Non possiamo fermarci allo "spettro classico", riferito cioè ad un intervallo discreto (un dato "istante") ma desideriamo ottenere un diagramma a tre variabili (frequenza, ampiezza e tempo) dove si intende osservare la variazione nel tempo della distribuzione spettrale dell'energia del segnale. Questo ci è essenziale, come vedremo in seguito, per distinguere l'evento utile nel panorama dei segnali E-VLF.

L'inverso della frequenza di risoluzione,  $T_A$ , è anche il più breve periodo risolvibile in quest'analisi spettrale "dinamica", ovvero il più breve intervallo di tempo in cui si riuscirà a vedere che sta cambiando qualcosa. Poiché  $T_A$  è il periodo di  $F_R$  e  $T=1/F$ , un'alta risoluzione nella lettura delle frequenze (piccola  $F$ ) corrisponderà sul nostro diagramma ad una bassa risoluzione nella lettura dei tempi (grande  $T$ ) e viceversa. A questo punto quindi bisogna stabilire un compromesso tra tempo e frequenza in funzione delle finalità dell'analisi.

Nelle registrazioni in laboratorio osserveremo fenomeni di breve durata (simulazione su campioni) dei quali vogliamo conoscere la dinamica in estremo dettaglio. La banda utile del radiogeofono (risposta uniforme) parte da circa 80 Hz. Si è scelto quindi di eseguire l'analisi FFT su 512 campioni, corrispondenti al periodo di 11,6 ms (risoluzione nel tempo) e alla risoluzione in frequenza di 86,1 Hz.

Tav. 1

Setting della scheda sonora	Frequenza di campionamento	Larghezza di banda ( $F_N$ )
44K (CD)	44100 Hz	22050,0 Hz
22K (Radio)	22050 Hz	11025,0 Hz
11K (Telephone)	11025 Hz	5512,5 Hz
8K (Low)	8000 Hz	4000,0 Hz

Tav. 2

**Frequenza di campionamento:***numero di campioni raccolti in un secondo*

$$F_c = 1/T_c \quad [\text{Hz}]$$

**Periodo di campionamento:***durata di ogni lettura e di ogni intervallo*

$$T_c = 1/F_c \quad [\text{sec}]$$

**Risoluzione del campionamento:***quantità di informazioni codificate in un secondo*

$$R_c = F_c \log_2 (n^\circ \text{ di possibili valori di } I) \quad [\text{bit/sec}]$$

<i>Livelli di intensità</i>	<i>Risoluzione (bit)</i>
2	1
4	2
16	4
256	8
65.536	16

Tav. 3

**Ampiezza del segnale in Decibels**

$$A = 10 \log_{10} (I_S/I_R) \quad [\text{dB}]$$

dove:  $I_S$  = intensità del segnale  
 $I_R$  = intensità del rumore

<i>Rapporto Segnale/Rumore</i>	<i>Misura in dB</i>
2	03
10	10
100	20
1.000	30

**Tav. 4**

**Serie di Fourier**

una funzione periodica  $g(t)$ , definita in un piccolo intervallo di tempo  $T$ , può essere espressa come la somma di un numero infinito di funzioni sinusoidali con la seguente formula:

$$g(t) = \frac{1}{2} c \sum_{n=1}^{\infty} a_n \sin(n2\pi ft) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \cos(n2\pi ft)$$

Dove  $f=1/T$  è la frequenza fondamentale ed  $a_n$  e  $b_n$  sono le ampiezze dell'ennesima armonica, che ha una frequenza  $n$  volte più grande della frequenza fondamentale. I valori di  $c$ ,  $a_n$  e  $b_n$  sono tutti calcolabili come integrali di  $g(t)$  in  $t$ .

Il segnale sorgente  $g(t)$ , osservato per un intervallo di tempo  $T_A$ , si può quindi rappresentare come una serie di valori di intensità riferiti allo spettro delle frequenze in una banda ampia  $F_N$ .

**Periodo di analisi FFT:**

come intervallo temporale

$$T_A = n/F_c \quad [\text{sec}]$$

come numero di campioni analizzati

$$n = F_c * T_A$$

**Frequenza di Nyquist:**

massima frequenza leggibile

$$F_N = F_c/2 \quad [\text{Hz}]$$

**Risoluzione dell'analisi FFT:**

minima frequenza rilevabile

$$F_R = 1/T_A = F_c/n \quad [\text{Hz}]$$

più breve evento rilevabile

$$1/F_R = T_A \quad [\text{sec}]$$

**Tav. 5**

Eseguendo l'analisi di Fourier su un segnale campionato a 44100 Hz, la massima frequenza utile è 22050 Hz mentre la risoluzione ottenibile dipende dall'intervallo di analisi:

	<b>Analisi FFT su campioni</b>	<b>Risoluzione nei tempi (<math>T_A</math>)</b>	<b>Risoluzione in frequenza (<math>F_R</math>)</b>
	256	5,8 ms	172,3 Hz
*	512	11,6 ms	86,1 Hz
	1.024	23,2 ms	43,1 Hz
	(...)	(...)	(...)
	32.768	743,0 ms	1,35 Hz
**	65.536	1.486,1 ms	0,67 Hz
	131.072	2.972,2 ms	0,34 Hz

Nelle registrazioni in atmosfera invece i fenomeni di natura sismica avranno presumibilmente una maggiore durata<sup>6</sup> e saranno disturbati da una quantità di altri segnali indesiderati, dai quali si dovranno distinguere grazie a un accurato esame dell'impronta spettrale. I più intensi tra questi disturbi saranno i fulmini, la cui durata tipica<sup>7</sup> è di circa 1 sec. Inoltre c'è da calcolare che la memorizzazione digitale del segnale campionato a 44,1 kHz con 16 bit procede ad un rate di 86 kb/sec. Un Hard Disk da 1 Gb si esaurirebbe in circa 3,2 ore e sarebbe impossibile ottenere dalle stazioni lunghi periodi di autonomia.

Per tutti questi motivi si è scelto di rinunciare ad una buona risoluzione nel tempo a favore di una migliore risoluzione in frequenza, sfruttando però la scarsa risoluzione temporale per ridurre la visibilità dei fulmini. Questa scelta tiene conto anche del fatto che i fulmini sono sempre fenomeni impulsivi sporadici<sup>8</sup> mentre l'emissione di origine sismica è caratterizzata da fitte raffiche impulsive.

In conclusione l'analisi FFT nel monitoraggio in atmosfera è stata eseguita su 65536 campioni, pari ad una durata di circa 1,5 secondi e una risoluzione della FFT di 0,67 Hz. Gli eventi impulsivi risulteranno tanto meno evidenti quanto più il loro periodo sarà inferiore ad 1,5 sec. (La soluzione completa al problema dell'immagazzinamento dei dati verrà esposta nel paragrafo successivo.)

Prima di concludere l'argomento occorre fare ancora qualche considerazione sul rischio di sottocampionamento, che costituisce il primo problema legato all'acquisizione digitale di un segnale. Le schede sonore sono concepite per essere impiegate sulla banda acustica (fino a 20 kHz) e come abbiamo visto (tav.1) lavorano al loro massimo livello su una frequenza di campionamento poco maggiore del necessario. Se all'ingresso si presenta un segnale ultrasonico questo non potrà essere rilevato dall'analisi spettrale, la cui larghezza di banda ( $F_N$ ) è fissata dalla frequenza di campionamento. Tuttavia, se il segnale è stato campionato, il contributo energetico delle componenti spettrali fuori banda verrà attribuito a componenti spettrali interne alla banda, producendo un'interferenza nota come *aliasing*.

Per evitare false letture occorre quindi evitare l'ingresso di segnali non acustici, che tuttavia esistono nello spettro radio. Per questo motivo la banda utile del radiogeofono è limitata a 12 kHz e il livello lungo la pendenza della curva di risposta raggiunge il valore relativo di -60 dB (dinamica strumentale) proprio alla frequenza di 20 kHz.

In conclusione l'impiego delle schede sonore, che ha rappresentato la chiave della realizzazione tecnica di questo progetto, non è stata una soluzione di ripiego ma una ponderata scelta nella strategia di gestione delle risorse. L'impiego di 9 schede sonore e dell'hardware standard di 4 PC gestito da particolari applicazioni software ha consentito la realizzazione di un progetto che altrimenti avrebbe richiesto risorse inaccessibili per una ricerca di dottorato.

---

<sup>6</sup> Nella tesi di laurea (Nardi, 2001) la differenza di scala tra le emissioni ottenute dai campioni in laboratorio e quelle registrate dal crollo di fronti di cava riguardava soltanto la durata delle raffiche di impulsi.

<sup>7</sup> Osservazioni derivate da studi precedenti sulle diverse tipologie di scariche elettriche atmosferiche.

<sup>8</sup> Come sopra.

## 2.3 Le stazioni automatiche

Il radiogeofono usato nella tesi di laurea (versione "Gaia-4b") non era adatto a lavorare all'aperto sotto l'azione gli agenti atmosferici e inoltre un'antenna alternativa alla telescopica incorporata poteva essere fissata solo direttamente sul ricevitore perché l'uso di un cavo schermato di collegamento avrebbe incontrato problemi a causa dell'alta impedenza circuitale. Questi problemi ed altri legati al filtraggio delle basse frequenze sono stati risolti con la progettazione della nuova versione "Gaia-T".

Si tratta di una soluzione integrata antenna-ricevitore (fig.10) in cui tutto il sistema è racchiuso in un tubo di plastica completamente stagno che viene collegato direttamente al PC attraverso un cavetto a bassa impedenza. L'antenna è costituita da un condensatore composto da due cilindri sovrapposti. La scheda elettronica è inserita all'interno dell'armatura negativa che funge anche da schermatura del circuito. La scheda stessa costituisce il dielettrico separatore tra le armature del condensatore ed è direttamente collegata all'antenna. Attraverso il cavo di collegamento il "tubo Gaia" riceve l'alimentazione dal PC e fornisce il segnale audio alla scheda sonora.

Questa nuova configurazione ha consentito la realizzazione di stazioni automatiche in grado di lavorare con lunghi periodi di autonomia. Il tubo infatti può essere installato in esterno e resistere a condizioni atmosferiche estreme mentre il PC, al coperto, può campionare il segnale e immagazzinare i dati. La necessità di installare il PC in un luogo dotato di corrente di rete è stata compensata da un circuito più tollerante nei confronti dell'elettrosmog. Le caratteristiche circuitali infine sono state adattate alle necessità del campionamento attraverso la scheda sonora.

Con questa nuova antenna sono state equipaggiate tre stazioni automatiche gestite da altrettanti PC. I siti sono stati scelti in zone poco contaminate dai disturbi di origine industriale, tuttavia la scelta è stata influenzata principalmente dalla disponibilità materiale di un luogo asciutto e dotato di corrente elettrica offerto incondizionatamente da privati (fig.11). Così il primo sito è stato individuato a Frascati (RM), nella soffitta di una casa posta al centro di un vigneto, dove un generoso zio ha avuto anche la bontà di controllare di tanto in tanto l'operatività della stazione. Il secondo è stato offerto da un membro dell'IESN (Italian Experimental Seismic Network) nello stesso luogo dove avevano già collocata una stazione sismica. Si tratta di una ex stalla che domina sul Piano Grande di Norcia (PG) a 1450 m di quota. La terza stazione infine è collocata su un balcone in una piccola frazione di Cascia (PG), là dove solitamente sperimento le nuove apparecchiature.

Quest'ultima purtroppo non garantisce alcun controllo sulla continuità dell'alimentazione elettrica e quindi lavora sporadicamente quando la casa è abitata e quando non sto lavorando su altre apparecchiature. Tutte le stazioni sono in grado di riattivarsi automaticamente dopo un'interruzione nell'erogazione della corrente elettrica e, attraverso una particolare strategia software, possono immagazzinare dati per almeno 6 mesi, limitando la manutenzione ordinaria a 2 volte l'anno.

Come già accennato nel paragrafo precedente il campionamento digitale monofonico a 44,1 kHz e 16 bit ha un rate di 86 kb/sec e a questo ritmo esaurirebbe rapidamente la capienza degli hard disk. Per risolvere questo problema si è pensato di far eseguire al PC in tempo reale la stessa analisi FFT a cui sarebbe stato sottoposto il segnale registrato in digitale. In questo modo ciò che si salva è un'immagine digitale che rappresenta lo spettrogramma di un'ora di registrazione.



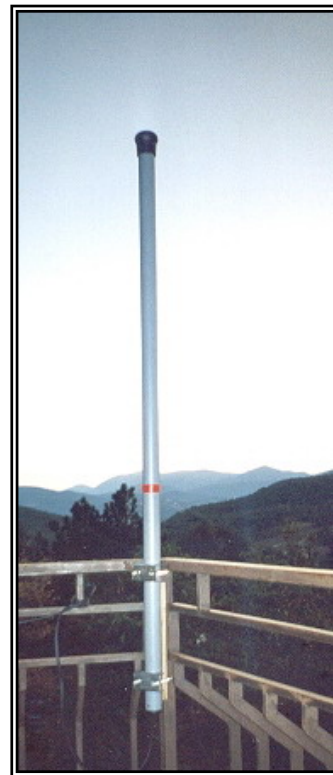
**Fig. 11** - Le stazioni automatiche di monitoraggio in atmosfera. A destra: posizione delle installazioni. La distanza tra Frascati e Cascia è di circa 105 km. Le stazioni di Cascia e Norcia distano meno di 20 km. In basso: i ricevitori E-VLF (radiogeofoni "Gaia-T") nelle loro installazioni. L'antenna di Frascati è installata su un tetto isolato al centro di una vigna, l'antenna di Norcia è all'interno di una stalla che domina sul Piano Grande di Norcia. La stazione di Cascia è installata su un balcone al margine del centro abitato di una piccola frazione.



**Frascati (RM)**  
 latitudine: 41,8 N  
 longitudine: 12,7 E  
 quota: 138 m



**Norcia (PG)**  
 latitudine: 42,8 N  
 longitudine: 13,2 E  
 quota: 1450 m



**Cascia (PG)**  
 latitudine: 42.8 N  
 longitudine: 13,1 E  
 quota: 900 m



Il rate diventa allora di 175 kb/ora (0,05 kb/sec) ma il prezzo da pagare è che non si avrà memoria del segnale originale per eseguire ulteriori altre analisi.

A questo punto è necessario decidere con accuratezza le modalità di composizione dello spettrogrammi. Di questo tipo di diagramma parleremo nel paragrafo 3.1. Per il momento diciamo che si tratta di una successione continua di spettri discreti rappresentati ciascuno da una linea verticale (*colonna grafica*). L'insieme delle colonne compone l'immagine della variabilità dello spettro nel tempo. Ciascuna colonna quindi rappresenta, come già accennato, una lettura nel tempo pari ad un periodo di circa 1,5 sec (tav.5). Da un punto di vista grafico questa bassa risoluzione temporale non è ancora sufficiente a fornire un'immagine che nell'arco di un'ora si componga con un numero di colonne compatibile con la risoluzione grafica dello schermo del PC. Per questo motivo, e per migliorare il filtraggio dei segnali industriali transitori, è stato scelto di integrare in ciascuna colonna l'analisi di 8 secondi, ovvero la media di 5 spettri discreti. Infine la finestra grafica sull'analisi FFT è stata chiusa a 10 kHz, compatibilmente con la finestra utile del radiogeofono.

Il risultato finale è un'immagine bitmap (.BMP) che rappresenta la variabilità della distribuzione spettrale nell'arco di un'ora. Lo spettro è rappresentato da 0 a 10000 Hz con una risoluzione in frequenza di 0,67 Hz, una risoluzione nei tempi di 8 sec e una risoluzione nelle ampiezze pari a 65536 tonalità di grigio su una dinamica di 60 dB.

La fig.12 schematizza l'architettura di una stazione automatica. La tav.6 riepiloga i parametri di analisi confrontati con quelli impiegati nelle prove di laboratorio.

I dati raccolti raggiungono in 6 mesi la quantità approssimativa di 756 Mb. A questo punto vengono esportati su CD attraverso un masterizzatore, di cui sono dotate tutte le stazioni.

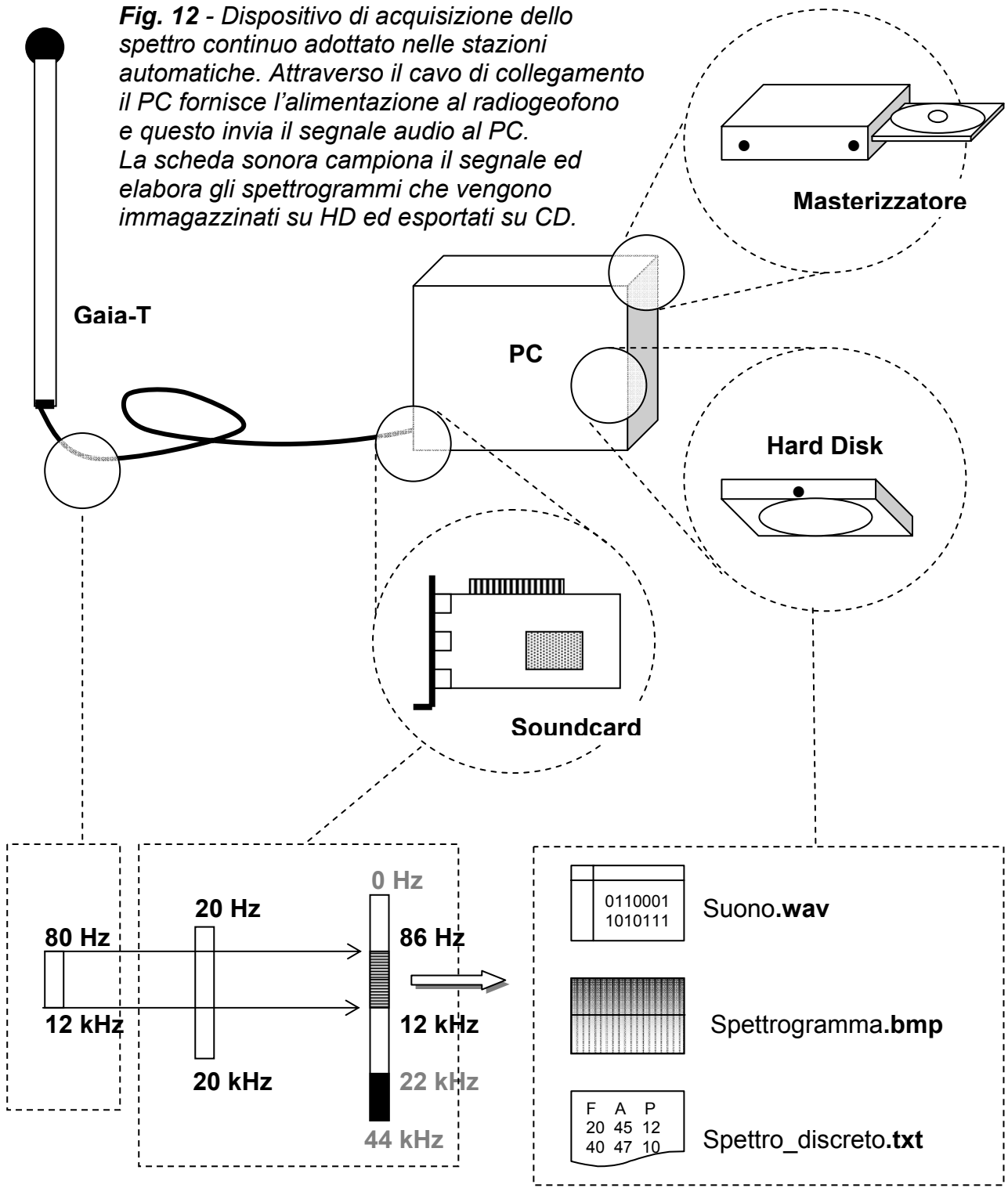
**Tav. 6**

*Confronto tra i parametri di analisi adottati nei due rami della ricerca:*

	<b>Settings:</b>	<b>Risultato pratico:</b>
<b>Campionamento digitale</b>	Frequenza di campionamento: 44,1 kHz Frequenza di Nyquist: 22,05 kHz	raccolta di 44100 campioni al secondo max frequenza campionata: 22 kHz
<b>Analisi nelle registrazioni in atmosfera</b>	FFT su 65536 campioni $T_A = 1/F_R = 1,486$ s Integrazione = 8 s = 5 FFT	min. frequenza risolvibile: 0,67 Hz non si registrano fenomeni atmosferici si attenuano i disturbi urbani transitori
<b>Analisi in laboratorio</b>	FFT su 512 campioni $T_A = 1/F_R = 11,6 \times 10^{(-3)}$ s	min. frequenza risolvibile: 86,1 Hz si rilevano eventi della durata di 1/100 s

*In laboratorio il fenomeno è stato studiato con un'alta risoluzione nei tempi e una risoluzione nelle frequenze bassa ma compatibile con il sistema di rilevamento. In campagna invece, per poter registrare dati per tempi lunghi, è stato necessario salvare i valori medi di FFT raccolti in un periodo di 8 secondi. In un certo senso in campagna è stato registrato un campionamento delle FFT.*

**Fig. 12 -** Dispositivo di acquisizione dello spettro continuo adottato nelle stazioni automatiche. Attraverso il cavo di collegamento il PC fornisce l'alimentazione al radiogeofono e questo invia il segnale audio al PC. La scheda sonora campiona il segnale ed elabora gli spettrogrammi che vengono immagazzinati su HD ed esportati su CD.



Qui sopra: la larghezza di banda è di 22 kHz e i vari passaggi nella manipolazione del segnale garantiscono l'uniformità di risposta nella finestra 0,86 - 12 kHz. I dati ottenuti con questo sistema sono la registrazione digitale del segnale sonoro (formato WAV), lo spettro discreto (matrice numerica dell'analisi FFT) e lo spettrogramma (diagramma delle variazioni nel tempo dello spettro delle ampiezze).

## 2.4 Le simulazioni in laboratorio

Lo scopo principale di questi esperimenti è quello di simulare in laboratorio il processo di microfratturazione che porta alla rottura della roccia. I campioni sono stati sottoposti a compressione uniassiale fino alla rottura mantenendo un incremento di sforzo costante<sup>9</sup>. Durante le prove sono state monitorate le emissioni EM su tre bande radio, le emissioni acustiche e la deformazione verticale. La radiazione acustica è stata usata come marcatore degli eventi meccanici che avvengono all'interno del campione. La deformazione verticale invece marca le macrofratture, la rottura finale e inoltre, relazionata al tempo, fornisce informazioni sul campo di deformazione in cui si manifestano gli eventi registrati. Tutte le registrazioni infatti sono sincronizzate e confrontabili in relazione al tempo. Alcuni esperimenti sono stati eseguiti in saturazione d'acqua dolce o di acqua salata su campioni già portati in saturazione prima della prova e mantenuti tali durante la compressione. Nella saturazione in acqua salata è stata utilizzata a temperatura ambiente una soluzione di NaCl nella proporzione di 1 kg ogni 5 litri d'acqua<sup>10</sup>.

Lo strumento più importante e insostituibile è stata una pressa idraulica di grande potenza. Attorno a questa macchina è stato necessario allestire un laboratorio *ad hoc* per poter eseguire le prove in saturazione e registrare simultaneamente e nello stesso formato digitale i segnali provenienti da tutti i sensori.

### 2.4.1 La pressa

La pressa utilizzata è quella da 500t dell'Istituto Sperimentale delle FS. Questa macchina antica e monumentale non soltanto è in grado di rompere campioni di grandi dimensioni ma a differenza delle altre non emetteva alcun disturbo radio essendo completamente priva di elettronica. Inoltre le sue grandi piastre metalliche hanno garantito un'ottima schermatura elettrica dell'ambiente sperimentale. Nella tesi di laurea, che vedeva impiegata la medesima pressa, erano state eseguite delle prove di compressione su un blocco metallico<sup>11</sup> raggiungendo una forza maggiore di quella necessaria alla rottura della roccia e verificando che nessuna parte dell'impianto della pressa emetteva alcun tipo di segnale anche sotto sforzo (Nardi, 2001). Per eseguire i nostri esperimenti le piastre della pressa sono state cortocircuitate da un impianto di messa a terra che collegava tra loro altre masse metalliche circostanti come scaffalature metalliche e banchi di lavoro.

### 2.4.2 La vasca di saturazione

Questa importante struttura svolge contemporaneamente tre funzioni. E' uno schermo paraschegge che protegge la strumentazione circostante dall'esplosione del campione. E' il supporto di tutti i sensori ad eccezione dell'antenna VLF. E' infine una vasca a tenuta stagna per mantenere i campioni in saturazione durante la prova di compressione. La vasca è stata realizzata in plexiglas e neoprene secondo il progetto illustrato in fig.13. La struttura ha un telaio quadrato aperto sopra e sotto.

---

<sup>9</sup> L'incremento di sforzo sarà costante nei limiti della meccanica della pressa.

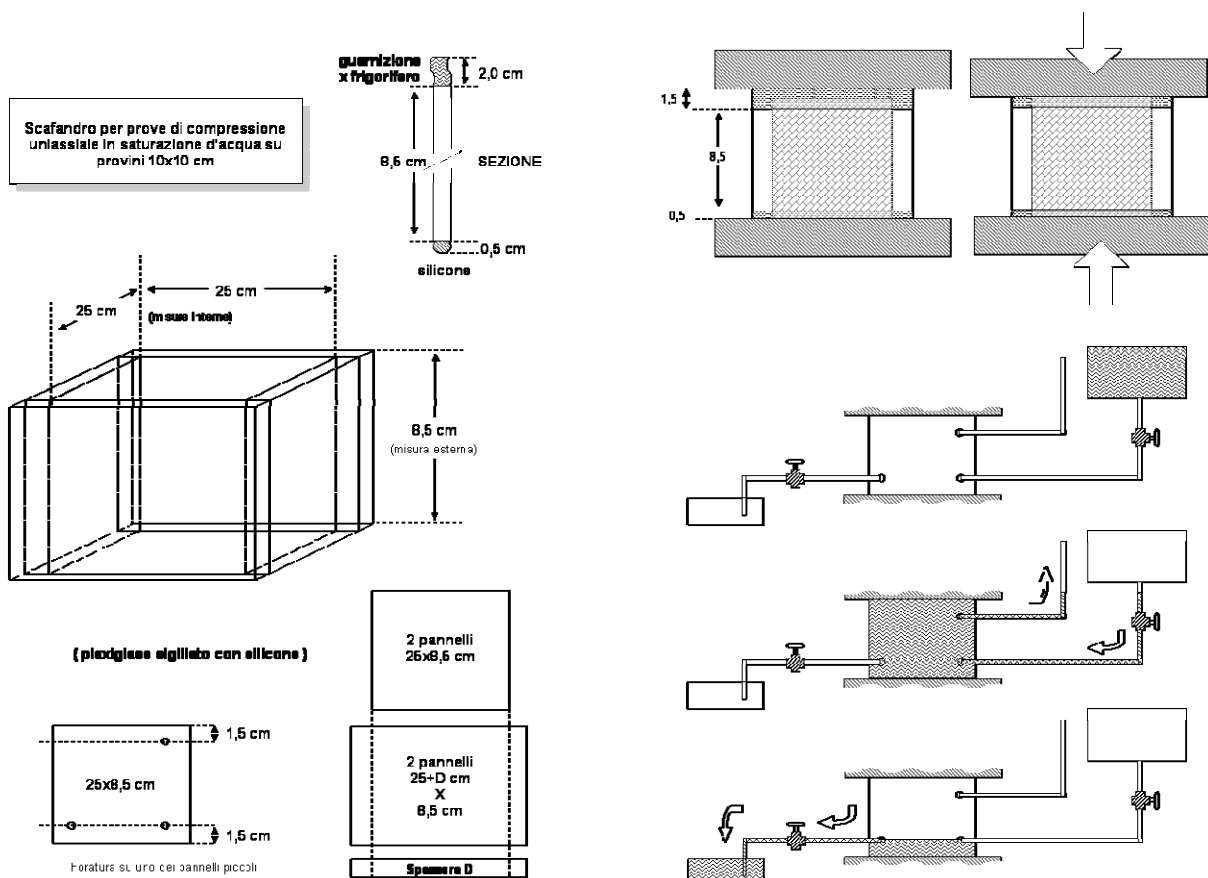
<sup>10</sup> Sale marino da tavola e acqua di rubinetto.

<sup>11</sup> Fu usato un segmento di rotaia, oggetto inconsueto ma facilmente reperibile nelle officine delle FS.

Il telaio ha uno spessore di 1 cm e va posizionato intorno al campione, tra i due piatti della pressa. Ai margini del telaio sono sigillate con silicone due guarnizioni di neoprene dello stesso spessore del telaio. Le guarnizioni sono molto cedevoli e l'intera struttura è 1 cm più alta dei campioni, cosicché quando la piastra superiore mobile si posiziona a contatto con il campione (inizio della prova) essa comprime le guarnizioni e la struttura diventa a tenuta d'acqua. Naturalmente durante la prova non potrà resistere alla pressione esercitata dall'acqua per il principio di Pascal ma del resto non è previsto che gli esperimenti avvengano con una pressione di confinamento. La pressione dell'acqua quindi sarà sempre mantenuta equivalente a quella del recipiente riempito a pelo libero grazie ad un tubicino di sfogo sifonato. L'ulteriore discesa del pistone durante le prove verrà sempre ammortizzata dal cedimento delle guarnizioni che hanno un'altezza totale di 2,5 cm a fronte di un  $\Delta h$  previsto al massimo come millimetrico (cfr. tav.8).

Un lato del telaio è accessoriato di un piccolo impianto idraulico a tre rubinetti<sup>12</sup> per agevolare le operazioni di riempimento, svuotamento e sfogo (fig.14).

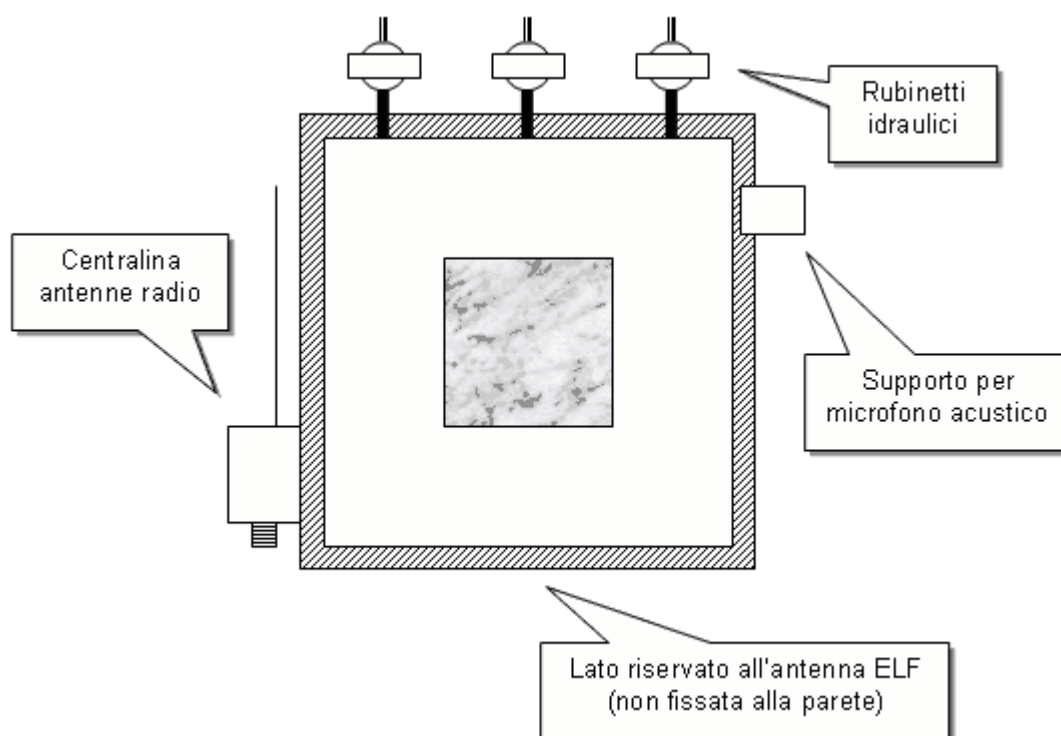
Su altri due lati opposti del telaio sono fissati gli alloggiamenti delle antenne radio e del microfono. In corrispondenza di quest'ultimo nella parete è scavato un foro cieco che riduce lo spessore del plexiglas a 4 mm.



**Fig.13 - Progetto della vasca di saturazione. Nella colonna a sinistra la soluzione tecnica e nella colonna a destra la sua applicazione.**

<sup>12</sup> Impianto realizzato con tubicini e rubinetteria disponibili sul mercato per la piccola irrigazione domestica.

**Fig.14** - Visione in pianta della vasca di saturazione e dei suoi accessori.



Il quarto lato è libero e costituisce lo scudo dell'antenna ELF che però, per motivi tecnici, deve mantenere l'isolamento meccanico dalla struttura (cfr. oltre par. 2.4.5).

Occorre precisare infine che dopo le prime prove il sistema si è rivelato troppo lento nelle operazioni di riempimento e svuotamento. Per questo motivo in un secondo tempo è stato modificato sigillando al telaio una base d'acciaio dello spessore di 1 cm. Il sistema si è trasformato così in una vasca vera e propria che poteva essere riempita e svuotata dall'alto, a piastra alzata<sup>13</sup>.

#### **2.4.5 La strumentazione di monitoraggio**

I fenomeni da osservare sono la radiazione EM sulle bande E-VLF, HF e UHF, l'emissione acustica nello spettro sonoro e la deformazione verticale del campione.

La radiazione EM in banda E-VLF è monitorata a larga banda (sull'intera banda radioacustica) con un radiogeofono dello stesso tipo di quello usato dalle stazioni automatiche ma realizzato in versione portatile con antenna corta e removibile (fig.22a). L'antenna è saldamente fissata al ricevitore e resta sospesa dietro allo schermo in plexiglas senza toccarlo. Un eventuale movimento o falso contatto con il bocchettone di fissaggio potrebbe infatti causare falsi segnali su questa banda a causa dello scambio di cariche statiche tra i conduttori.

<sup>13</sup> Questa soluzione, la più semplice, non era stata presa in considerazione in fase di progetto perché la lavorazione di una base che potesse resistere indeformata alla pressione di lavoro non era alla portata di una realizzazione da "bricolage". Per le officine delle FS invece non è stato affatto difficile tagliare l'acciaio ma piuttosto si è dovuto cercare tra i ritagli una lastra dello spessore di "soltanto" 1 cm.

Le altre due bande EM sono comuni bande radiofoniche per le quali sono stati impiegati due ricevitori professionali<sup>14</sup>. Una radio, differentemente dal radiogeofono, lavora su una strettissima banda passante (sintonizza una stazione alla volta) ed opera sul segnale per estrarre l'informazione modulata nell'*onda portante*. Su ciascuna banda radio quindi è stata scelta una frequenza campione, un modo di demodulazione e una larghezza di banda.

Occorre chiarire però che il segnale EM naturale non contiene alcuna componente di segnale utile che modula l'onda portante, dunque l'apparecchio radio agirà sul segnale sorgente un "lavoro" teso ad estrarre un segnale fittizio, funzione della variabilità in ampiezza o in frequenza (AM/FM) osservata nella sorgente. La demodulazione in ampiezza in particolare esprime un segnale la cui frequenza è condizionata dalla variazione di ampiezza della sorgente e la cui ampiezza è funzione dell'ampiezza della sorgente. In questa modalità risulta più facile evidenziare episodi impulsivi. Inoltre c'è da dire che in ogni caso la banda passante corrisponde anche alla larghezza di banda audio del segnale rivelato, per cui il modo AM a banda larga (6 kHz) si presta meglio ai nostri scopi. Per questo motivo<sup>15</sup> in entrambe le bande radiofoniche è stato impostato il *modo* "AM-W".

In banda HF si è scelta la frequenza di 3.9 MHz perché piuttosto distante dalle stazioni radio<sup>16</sup> ma anche perché è quella in cui, ascoltando la radio durante i temporali, le scariche dei fulmini sembrano emettere la massima energia. In un certo senso si è scelto il contrario di quanto si è cercato di fare nelle stazioni automatiche ma del resto questa volta si cerca di rivelare delle scariche elettriche in tecnica radio, si lavora in un ambiente schermato e per episodi molto brevi. Per questa frequenza è stato impiegato il ricevitore multibanda *Marc NR-82F1* (fig.22b) e come antenna un circuito LC calcolato esattamente per una risonanza di 3,9 MHz (tav.7).

Per la banda UHF si è scelta la frequenza di 234 MHz perché è multipla della precedente, ricade nella banda aeronautica militare UHF che a Roma è poco frequentata e inoltre aveva un numero facile da ricordare<sup>17</sup>. E' stato impiegato un ricevitore scanner *Black Jaguar 200 MKII* (fig.22c) e come antenna una configurazione a stilo corta "con carico alla base", anche questa calcolata per la perfetta risonanza sulla frequenza di lavoro (tav.7).

Per il monitoraggio acustico è stato usato un microfono professionale *Accord PA196*, del tipo "a gelato" ma estremamente compatto, omnidirezionale e preamplificato (fig.22d).

---

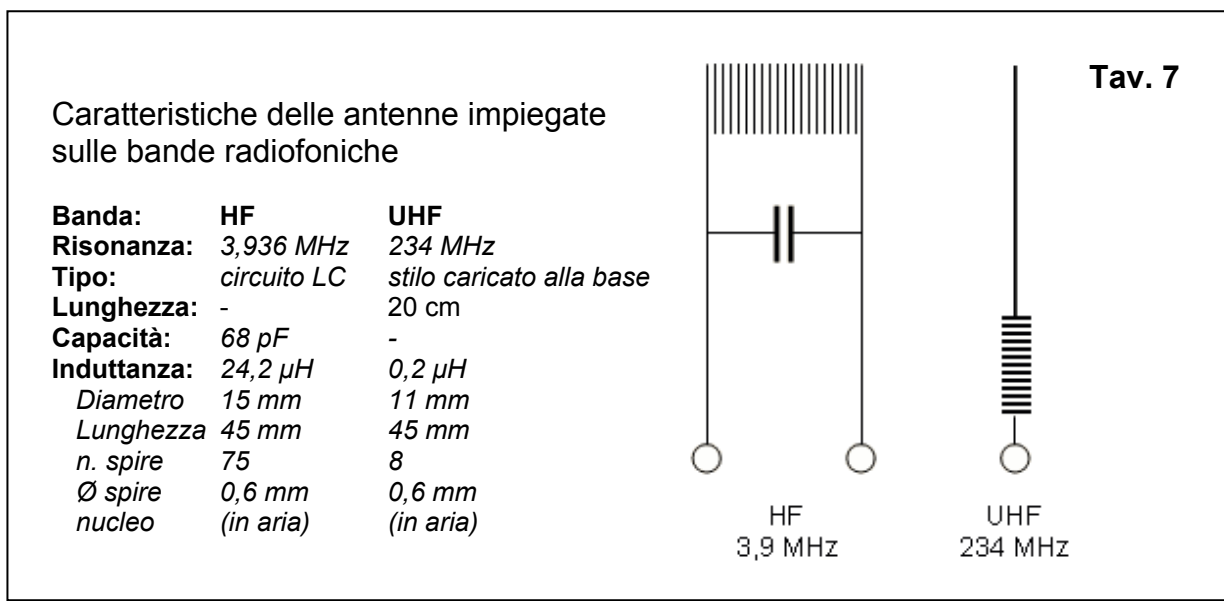
<sup>14</sup> Ricevitori multibanda e multimodo con lettura digitale della frequenza di cui disponevo essendo radioamatore.

<sup>15</sup> Si potrebbe obiettare che sarebbe stato più corretto misurare l'ampiezza del segnale prelevato prima del rivelatore. I motivi di questa scelta sono molteplici. Prima di tutto in questo modo otteniamo ancora una volta un segnale acustico, poi ciò che su queste bande intendiamo realmente verificare è soprattutto la portata spettrale del segnale ELF, ovvero l'attendibilità delle testimonianze dei radioamatori sull'esistenza di un "radiodisturbo". Infine c'è da considerare che in questo lavoro sono stati impiegati i miei migliori ricevitori radio, quelli con cui da anni condivido le mie esperienze di esplorazione dello spettro radio. Non si manomette mai un apparecchio già perfettamente funzionante... specialmente quando è il mio.

<sup>16</sup> Si trova nella zona di sovrapposizione tra una banda aeronautica militare poco usata e la banda BC dei 75m (radiodiffusione internazionale) utilizzata soltanto in Asia.

<sup>17</sup> Quest'ultima caratteristica si è rivelata un'idea infelice perché se è vero che a Roma non si era mai ascoltato nulla nei dintorni di quella frequenza è accaduto poi che anche l'aeronautica ha scelto questo bel numero qualche giorno prima della parata militare del 2 giugno, quando improvvisamente si è udita una voce squillante provenire dalla terza traccia del sistema di monitoraggio. Fortunatamente si è trattato di un episodio isolato che non ha compromesso nemmeno il lavoro di quel giorno.

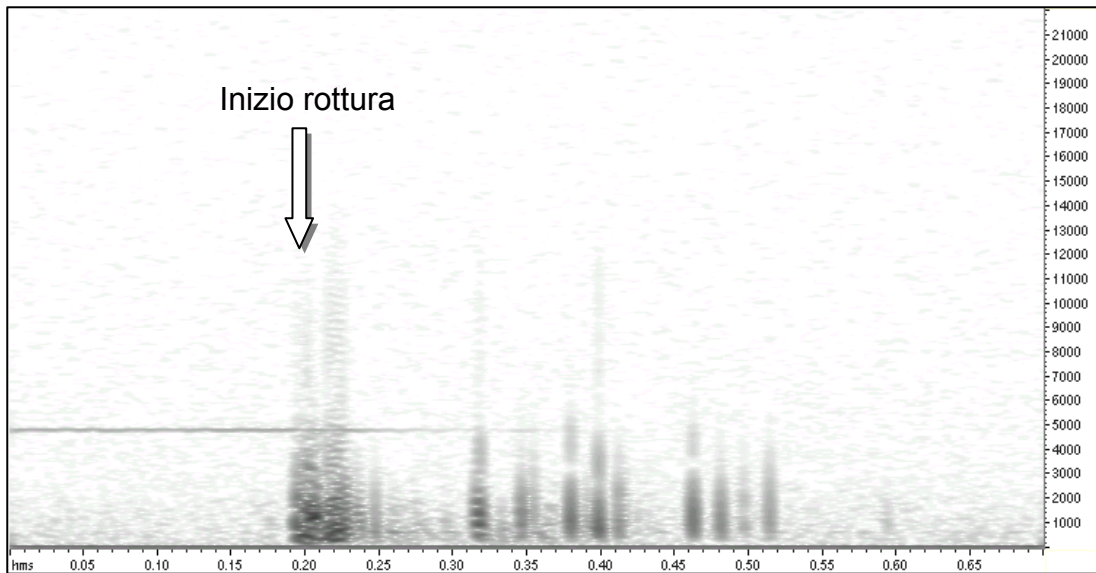
Per quanto riguarda infine la misura della deformazione verticale, la soluzione adottata, pur semplice, ha avuto una storia talmente complessa da richiedere un intero paragrafo di spiegazioni.



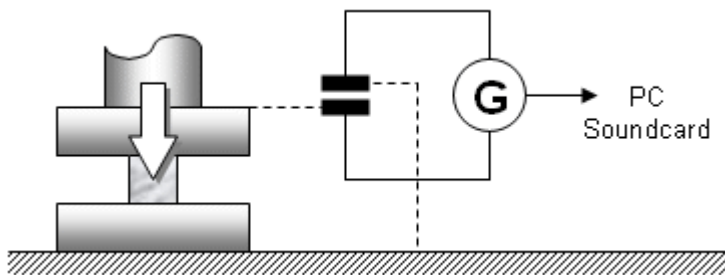
#### 2.4.4 Il problema dell'estensimetro

La misura della deformazione verticale del campione ha posto subito un problema piuttosto grave. L'anziana pressa idraulica infatti era equipaggiata di un dispositivo meccanico per la registrazione su carta della deformazione verticale, però i tiranti e parte degli ingranaggi di trasmissione del movimento erano stati smontati da tempo e non era più possibile reperirli.

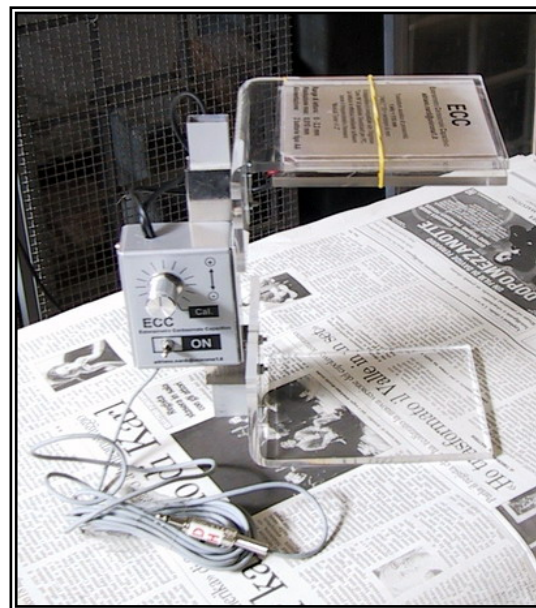
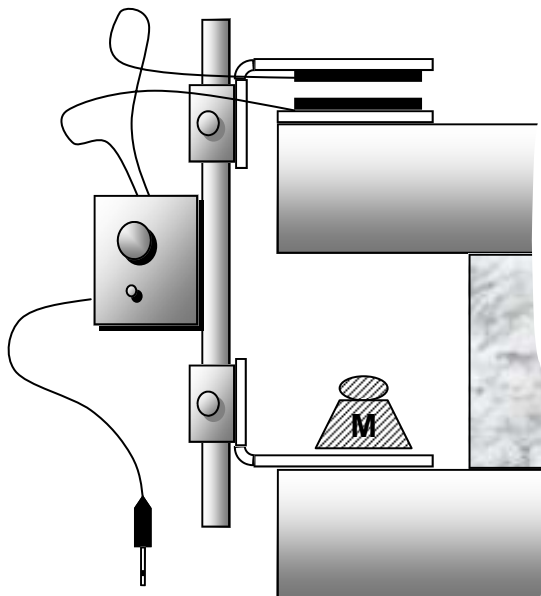
Ciò che oggi si usa per queste misure sono degli estensimetri resistivi detti *strain gauges*. Si tratta di resistori variabili con la dilatazione che devono essere collegati ad un'apparecchiatura elettronica la quale naturalmente deve erogare una corrente elettrica su cui misurare la resistenza della sonda. Durante il lavoro della tesi di laurea avevo testato con il radiogeofono le prove uniassiali di un mio collega che applicava ai provini questo tipo di sonde estensimetriche ed avevo potuto osservare (fig.15) che la corrente usata era alternata e produceva negli spettrogrammi un disturbo persistente monocromatico. Inoltre era evidente che a volte la misura cessava pochi istanti prima della rottura a causa probabilmente del distacco di schegge dalla superficie esterna del campione, ove erano incollati i sensori. Questo minimo scarto sulla rottura era comunque leggibile sugli spettrogrammi grazie all'alta risoluzione nel tempo del nostro dispositivo che intende indagare proprio la dinamica della rottura. Inoltre non sarebbe stato facile disporre di riferimenti per mettere in relazione la traccia su carta con le nostre registrazioni acustiche. In ultimo, a dire il vero, ci sarebbe stato anche il problema di reperire l'apparecchiatura necessaria. L'università infatti non supporta questo tipo di necessità quando non dispone già di un laboratorio attrezzato e non si vedeva dunque una soluzione immediata.



**Fig.15** - spettrogramma dei segnali EM emessi alla rottura da una carota strumentata con strain gauge resistivo. Sull'asse X i tempi in sec; sull'asse Y le frequenze in Hz. La linea a circa 5kHz è il disturbo della corrente di alimentazione.



**Fig.16** - Similitudine tra le piastre della pressa e le armature di un condensatore variabile. Il condensatore può pilotare un generatore elettronico di frequenze acustiche.



**Fig.17** - Soluzione meccanica dell'estensimetro: disegno e realizzazione pratica.



Tuttavia lo stesso spettrogramma della fig.15 mi suggeriva l'idea che se l'informazione estensimetrica fosse stata codificata nella frequenza della corrente, la sua variazione nel tempo sarebbe stata visualizzata direttamente come una curva sullo stesso grafico. Ciò avrebbe reso l'informazione compatibile con il trattamento destinato agli altri canali di monitoraggio e direttamente confrontabile con le informazioni in essi contenute.

Era necessario allora che la sonda dell'estensimetro fosse qualcosa in grado di convertire una distanza in una frequenza e la soluzione definitiva apparve non appena vidi nell'immagine delle piastre della pressa le armature di un condensatore piano. Se infatti fossero state un condensatore, al variare della distanza sarebbe variata la capacità e un *condensatore variabile* avrebbe potuto pilotare un oscillatore elettronico per erogare segnale elettrico che esprimeva una nota acustica. In questo modo, tra l'altro, si sarebbe realizzato l'affascinante scenario in cui la totalità degli strumenti, malgrado la loro diversità, avrebbero espresso la propria misura in funzione dello stesso parametro: una nota elettrica variabile nel tempo.

Utilizzare materialmente le piastre della pressa è ovviamente impossibile all'atto pratico però è stato sufficiente realizzare un vero condensatore piano con un'armatura solidale al terreno e l'altra alla piastra superiore mobile della pressa (fig.16). Per praticità è stata l'armatura inferiore ad essere collegata meccanicamente alla piastra mobile, in modo tale da partire con la distanza 0 e misurare variazioni positive al procedere della compressione del campione. Ciò ha evitato che il condensatore incontrasse una "fine corsa" per schiacciamento.

Per realizzare questo originale tipo di estensimetro elettroacustico, che si potrebbe chiamare *trasduttore acustico di prossimità*, è stato necessario pianificare quattro fasi successive:

- valutazione preventiva delle specifiche richieste al sistema
- progettazione e costruzione di un circuito rispondente alle specifiche
- progettazione e costruzione di una soluzione meccanica
- calibrazione dello strumento

Può sembrare a prima vista un lavoro poco attinente alla geologia ma invece è iniziato proprio con uno studio geologico applicativo. Per prima cosa infatti era necessario equilibrare il circuito per ottenere una nota variabile all'interno dello spettro acustico a partire da un certo range di variazione di capacità. Questo range è funzione della superficie delle piastre (valore fisso) e della distanza variabile tra di esse. Insomma, prima di progettare qualsiasi cosa, occorre sapere in quale intervallo di deformazioni potevano reagire alla compressione quei campioni delle dimensioni prestabilite e delle litologie disponibili. I relativi calcoli sono esposti nella tavola 8. I calcoli elettronici verranno omessi, ricordando solo che il problema principale è stato quello di progettare un circuito che fornisse una conversione lineare tra  $\Delta h$  e  $F$  e al contempo si basasse su capacità dell'ordine del pF, altrimenti le armature avrebbero richiesto dimensioni improponibili<sup>18</sup>.

Il risultato finale è stato la stima della deformazione massima (calcare tenerissimo) pari a 3,5 mm e una configurazione con armature di dimensioni 6×15 cm in grado di lavorare in una scala di distanze da 0 a 3 mm con la funzione di conversione  $[Hz]*100 = [mm]/100$ . Per esigenze legate all'analisi FFT sono stati

---

<sup>18</sup> I primi calcoli fornivano valori di capacità dell'ordine del nF che richiedevano superfici prossime al m<sup>2</sup>.

infine fissati come limiti operativi una risoluzione di lettura del centesimo di millimetro su una scala di 2,2 mm. Queste caratteristiche si sono poi dimostrate effettivamente compatibili con le prove di rottura.

La costruzione meccanica dello strumento è stata risolta con un'architettura che si adatta alla pressa in modo semplice e universale, come si vede in fig.17.

## Tav. 8

Valutazione dell'ordine di grandezza della deformazione attesa nelle prove uniassiali su campioni di calcare delle dimensioni prestabilite:

modulo di elasticità o modulo di Young (Y):

$$E = \Delta P / \epsilon = (F/A) / (\Delta L / L_0) \quad [ \text{kg/cm}^2 ] \quad (\text{Lambe, pag. 178; Serway I, pag.352})$$

dove: F = forza applicata  
A = superficie su cui la forza è applicata  
L<sub>0</sub> = dimensione del provino nella direzione di applicazione della forza  
ΔL = deformazione del provino nella direzione di applicazione della forza

esplicitando ΔL si ha:

$$\Delta L = [(F/A) * L_0] / E \quad [ \text{cm} ]$$

nel nostro caso:

F ≈ 200 t = 200.000 kg (valore medio della forza applicata alla rottura)  
A = 8\*8 = 64 cm  
L<sub>0</sub> = 10 cm

quindi si può stimare:

$$\Delta L = 312500 / E \quad [ \text{mm} ]$$

il modulo di Young (Y) per i calcari spazia nel seguente range:

$$Y = 86.9 \div 107.6 \times 1000 \quad [ \text{MN/m}^2 ] \quad (\text{Lambe-Whitman, pag. 178})$$

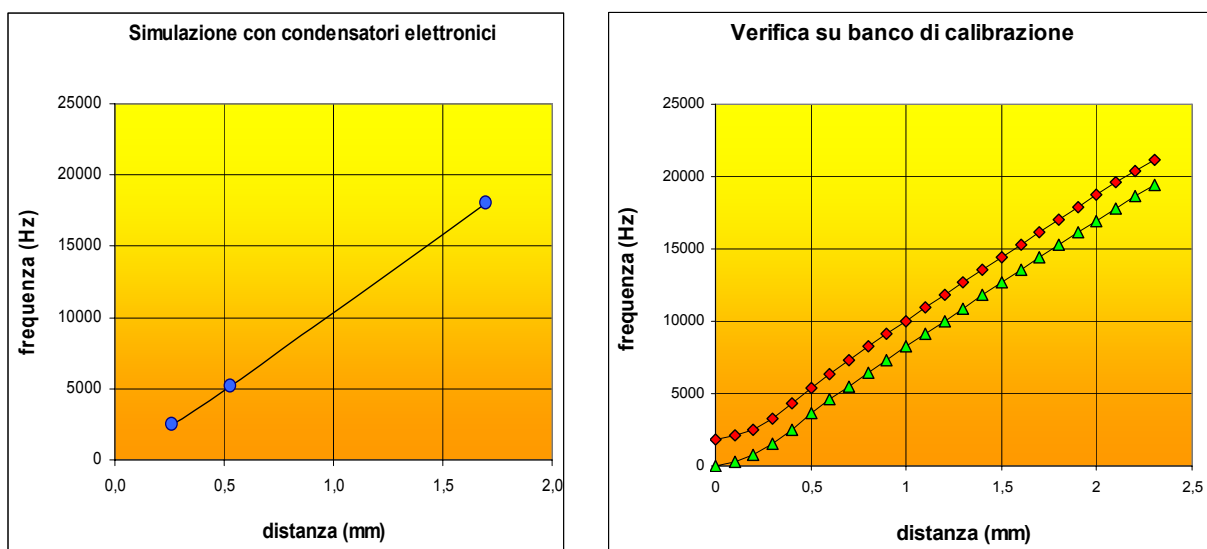
quindi, convertendo le unità, possiamo considerare questo range:

$$E = 88611 - 1097197.2 \quad [ \text{kg/cm}^2 ]$$

con il quale si ottiene, per provini di calcare della misura da noi scelta, il seguente range di deformazioni:

$$\Delta L = 3,53 - 0,29 \text{ mm}$$

Una calibrazione preliminare del circuito è stata effettuata sul prototipo usando al posto delle armature una serie di condensatori elettronici di valori standard e calcolando la distanza equivalente tra le armature del condensatore piano. In questa fase è stata verificata la linearità della risposta (fig.18). La calibrazione operativa dello strumento è stata effettuata invece presso il *laboratorio prove materiali* della Facoltà di Ingegneria (Univ. “La Sapienza”, via Eudossiana). Qui disponevano di un banco di taratura meccanico con precisione millesimale su cui sono state posizionate le armature del nostro sensore, la cui risoluzione è centesimale. La figura 18 illustra le curve di taratura ed evidenzia, nella configurazione operativa, una leggera non linearità nei valori più vicini allo 0.



**Fig.18** - Curve di risposta dell'estensimetro. A sinistra la curva misurata sul prototipo con capacità fornite da condensatori elettronici, a destra le curve misurate con le armature della meccanica operativa. La taratura dello 0 strumentale si può effettuare grazie ad un'apposita manopola.

Questo effetto può essere attribuito a due concause: la difficile installazione delle piastre sul banco di misura e l'*effetto di bordo* del condensatore. La prima è dovuta al fatto che sul banco di taratura l'orientamento delle piastre non è quello orizzontale, operativo, col quale si posizionano in modo ottimale sotto il loro stesso peso. Le piastre erano invece fissate con una colla speciale in posizione verticale e ortogonale al banco di misura. Non si può quindi garantire il perfetto parallelismo tra loro e nella posizione 0 era possibile un pur minimo cedimento elastico con effetto "schacciamento". La seconda causa è il fenomeno noto in fisica come *effetto al bordo* di un condensatore, che per piccole distanze tra le armature manifesta una non uniformità del campo elettrico lungo i bordi delle armature stesse (Serway II, pag. 692). Le soluzioni tecniche a questo problema potrebbero essere l'adozione di armature di maggiore superficie e/o l'impiego di un piccolo spessore per ridurre la distanza effettiva allo 0 operativo. Del resto era già previsto uno spessore costituito da due fogli di acetato adesivo applicato alle superfici interne delle armature per impedire il contatto in posizione 0. Questo accorgimento, tra l'altro, migliora l'efficacia del condensatore introducendo un dielettrico migliore dell'aria.

Il risultato finale di questo lavoro è stato un sensore universale e riutilizzabile<sup>19</sup> adatto a qualsiasi PC. Le caratteristiche generali sono esposte nella tavola 9. Eseguendo le prove uniassiali con un incremento di sforzo costante lo spettrogramma del segnale in uscita riproduce una curva analoga al diagramma sforzo-deformazione. La lettura dei dati verrà discussa nel paragrafo 3.1 con l'interpretazione degli spettrogrammi.

Alla luce dell'esperienza sperimentale il progetto può essere ulteriormente migliorato con l'aggiunta di un filtro passabasso in uscita tagliato su 22 kHz e prelevando l'alimentazione del sistema direttamente dalla porta Midi della soundcard.

## Tav.9

### Specifiche tecniche dell'estensimetro

Tipo: trasduttore acustico di prossimità

Range di sensibilità: 0 ÷ 3 mm

Range di lettura: 0 ÷ 2,2 mm ( con Fc = 44,1kHz )

Risoluzione: 0,010 mm ( con Fc = 44,1kHz e FFT su 512 cp)

Risposta acustica: banda 100 Hz ÷ 22 kHz

Equivalenza: 100 Hz = 1/100 mm

Dimensioni delle piastre: 6x15 cm

Alimentazione: 3V ( 2 batterie AA )

*Il dispositivo è compatibile con l'ingresso "Line IN" di qualsiasi Soundcard per PC. La lettura si effettua mediante frequenzimetro o spettrometro software.*

### 2.4.3 La registrazione digitale

Nel progetto di lavoro anche in questo caso la registrazione digitale ha rappresentato il primo dei problemi da risolvere. Il campionamento richiede gli stessi parametri stabiliti per le stazioni automatiche e la registrazione del segnale sorgente su file acustico digitale si può effettuare senza difficoltà a causa della breve durata delle prove. Però questa volta è stato necessario registrare 5 canali digitali in sincronia, e questo rappresentava il problema da risolvere.

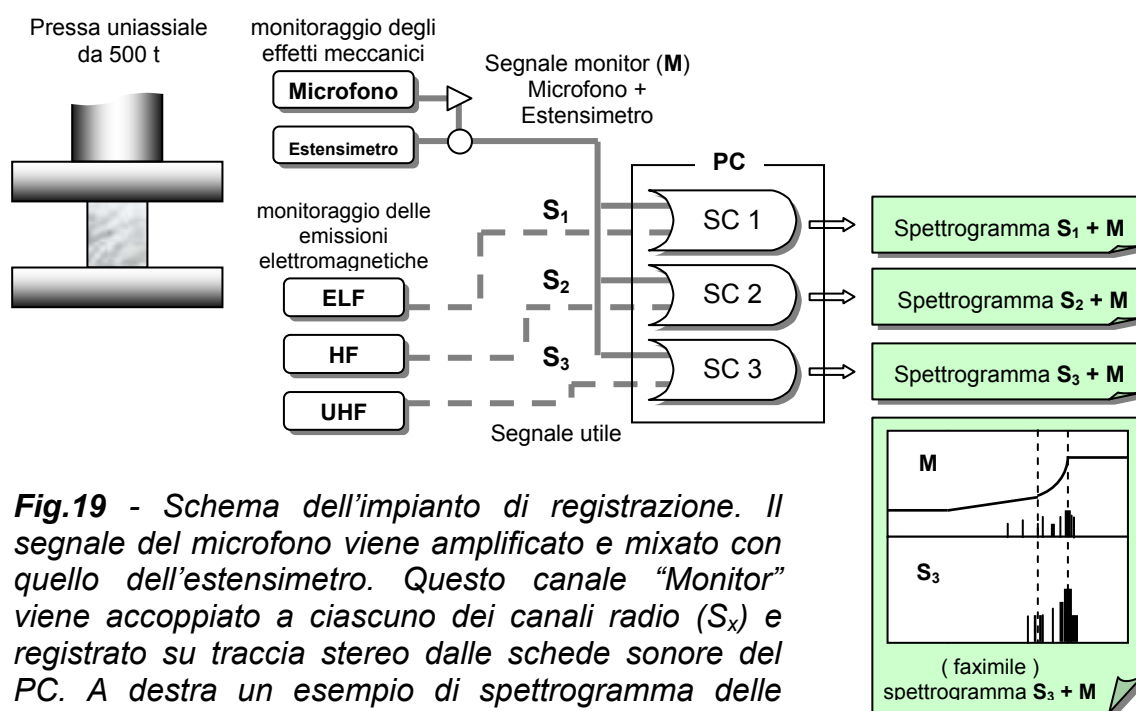
La soluzione è ancora una volta l'adozione di schede sonore e una gestione computerizzata della registrazione ma è stato anche necessario progettare un particolare impianto per far sì che il sistema si comportasse nel complesso come un registratore sincrono multitraccia per almeno 5 canali (fig.19).

Prima di tutto sono stati distinti i canali del *segnale utile* (radio VLF, HF, UHF) dai canali del *segnale monitor* (suono acustico ed estensimetro). I segnali monitor sono stati mixati in un unico canale di riferimento per il monitoraggio delle prove. Ciò è stato possibile sia perché si tratta in entrambi i casi di segnali audio, sia perché nello

<sup>19</sup> Gli strain gauges di cui si è parlato erano sensori "usa e getta". Questa soluzione, che io sappia, è inedita e originale e potrebbe essere brevettata.

spettrogramma le rispettive impronte si distingueranno nettamente per avere sviluppo tendenzialmente verticale l'una e orizzontale l'altra (cfr. par. 3.1).

Questo "Canale Monitor" è stato poi accoppiato a ciascun canale utile per formare una traccia stereo campionata da una *soundcard* per PC. Con tre schede sonore dunque si è potuto registrare contemporaneamente 3 tracce stereo (6 canali in tutto) i cui eventi sono confrontabili tra loro grazie al confronto diretto con il medesimo canale di monitoraggio dello stato del campione.

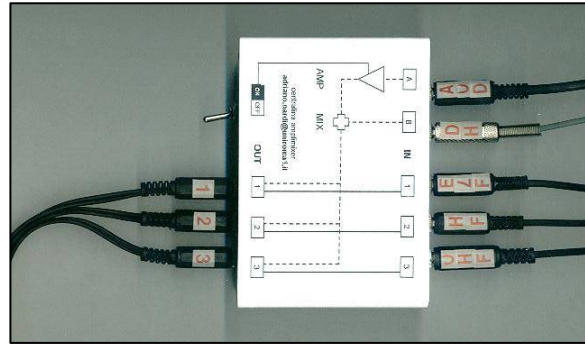
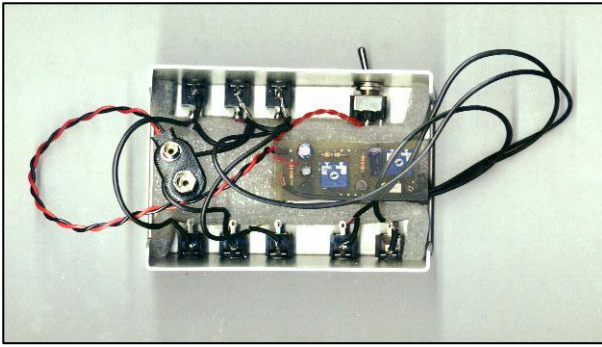


**Fig.19** - Schema dell'impianto di registrazione. Il segnale del microfono viene amplificato e mixato con quello dell'estensimetro. Questo canale "Monitor" viene accoppiato a ciascuno dei canali radio ( $S_x$ ) e registrato su traccia stereo dalle schede sonore del PC. A destra un esempio di spettrogramma delle tracce stereo: in alto il monitor, in basso il segnale.

Questo risultato si è potuto ottenere grazie alla costruzione di una centralina *ad hoc* che ha provveduto al mixaggio e alla distribuzione dei segnali ma anche all'ulteriore amplificazione del microfono fino al livello Line della scheda sonora<sup>20</sup>. La figura 20 mostra la realizzazione di questa centralina che abbiamo chiamato *preamplimixer*. Molto brevemente le caratteristiche generali sono l'impedenza di 600  $\Omega$  su tutti i canali, l'amplificazione fino a un massimo di 40 dB di uno dei due canali mixati e l'alimentazione a batteria da 9V.

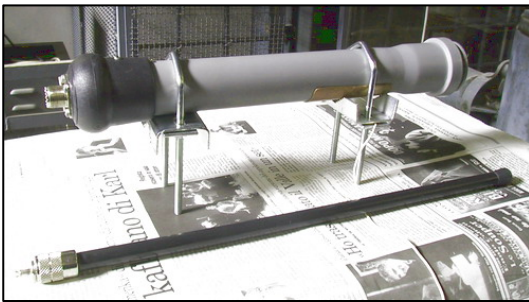
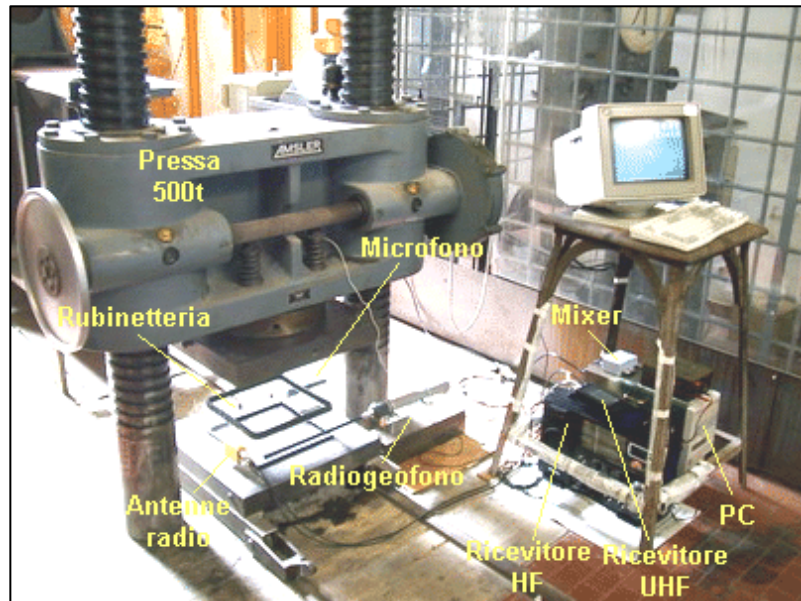
Le caratteristiche generali del monitoraggio ottenuto attraverso questo sistema sono schematizzate nella tavola 10. L'insieme di questo impianto allestito intorno alla pressa è illustrato nella fig. 21 mentre la fig. 22 mostra i 5 strumenti di rilevamento che erogano i segnali registrati sui 5 canali nel modo fin ora descritto.

<sup>20</sup> Tutte le schede sonore sono dotate di due livelli di ingresso audio: *MIC* per i microfoni e *LINE* per il segnale già preamplificato. In questo lavoro è stato usato per tutti i canali l'ingresso Line perché su di esso non agisce (oppure è escludibile) il dispositivo AGC (controllo automatico di guadagno) che livella invece l'ingresso Mic amplificando i segnali troppo bassi ed amplificando quelli troppo alti.



**Fig.20** - La centralina preamplimixer. Sul dorso si legge lo schema di collegamento.

**Fig.21** - L'impianto per il monitoraggio delle prove di rottura allestito intorno alla pressa. La gabbia rivestita in plexiglas che si vede sullo sfondo è la cella protetta per la manovra della pressa.



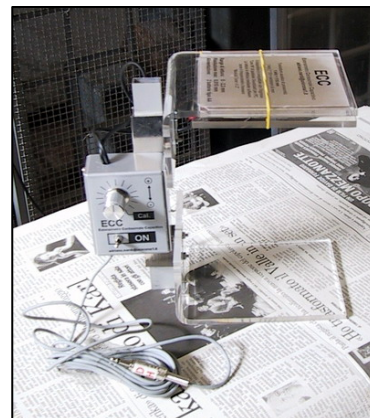
< a



d >



< b



e >

< c

**Fig.22** - La strumentazione di monitoraggio delle prove di rottura: a) Radiogeofono. b) Ricevitore HF. c) Scanner UHF. d) Microfono preamplificato. e) Estensimetro.

*Monitoraggio delle prove di rottura:*

**Canale E-VLF:** componente campo elettrico in banda radioacustica  
 Banda: 0,08 – 12 kHz  
 Sensore: antenna elettrica lunghezza 40 cm  
 Strumento: “radiogeofono Gaia-T”  
 Elaborazione: trasduzione acustica su tutta la banda  
 Uscita audio: banda 12 kHz, livello compatibile *soundcard LINE IN*

**Canale HF:** ampiezza dell'emissione EM sulle onde corte  
 Banda: larga 6 kHz e centrata su 3,9 MHz  
 Sensore: antenna magnetica (risonanza LC)  
 Strumento: ricevitore multibanda multimodo MARC NR-82F1  
 Elaborazione: rivelazione della componente AM\*  
 Uscita audio: banda 6 kHz, livello compatibile *soundcard LINE IN*

**Canale UHF:** ampiezza dell'emissione EM sulle microonde  
 Banda: larga 6 kHz e centrata su 234 MHz  
 Sensore: antenna elettrica caricata alla base (stilo cm 20)  
 Strumento: ricevitore scanner Black Jaguar 200 MKII  
 Elaborazione: rivelazione della componente AM\*  
 Uscita audio: banda 6 kHz, livello compatibile *soundcard LINE IN*

**Canale acustico:** marcatore degli eventi meccanici  
 Banda: 0,05 – 16 kHz  
 Sensore: microfono omnidirezionale electret  
 Strumento: microfono preamplificato Accord PA196  
 Elaborazione: preamplificazione  
 Uscita audio: banda 16 kHz, livello compatibile *soundcard MIC IN*

**Canale Δh:** relazione sforzo-deformazione  
 Banda: 0 – 2,2 mm  
 Sensore: condensatore piano  
 Strumento: “estensimetro elettroacustico”  
 Elaborazione: trasduzione acustica della distanza tra le armature  
 Uscita audio: banda 22 kHz, livello compatibile *soundcard LINE IN*

\*) Naturalmente non esisterà nel segnale naturale una componente di segnale utile che ha modulato l'onda portante. Ciò che si vedrà è solo l'ampiezza di un segnale rivelato che sarà comunque proporzionale all'ampiezza del segnale sorgente.

## 2.5 Altri esperimenti

Alcune prove di rottura sono state eseguite in saturazione d'acqua dolce o di acqua salata per verificare alcune ipotesi sull'origine e sulla propagazione del segnale EM. In questi casi l'intensità del segnale e l'evoluzione dell'emissione deve essere confrontata con le prove effettuate sui campioni secchi e in particolare, nelle prove in acqua salata, ci si aspettava una forte attenuazione del segnale. A questo proposito si è posto a priori un problema di metodologia in quanto era ipotizzabile che l'attraversamento di mezzi diversi avrebbe potuto influire sulla propagazione della radiazione EM. Era necessario dunque verificare cosa succede quando un segnale in banda radioacustica attraversa i mezzi interessati nelle prove di rottura in modo indipendente dall'influenza che questi potevano avere sul meccanismo di emissione.

Un'ulteriore serie di esperimenti è stata quindi eseguita nelle medesime condizioni sperimentali delle prove di rottura<sup>21</sup> ma con una sorgente artificiale della quale era possibile controllare il potenziale e la superficie irradiante. L'emettitore era costituito da un dipolo elettrico collegato via cavo ad un generatore d'onda quadra (fig.23). Questo artificio ha simulato l'irraggiamento da una singola frattura per calibrare le stime sull'ampiezza del segnale registrato in funzione della propagazione nei mezzi attraversati e verificare l'ampiezza assoluta alla sorgente.

Per verificare la corrispondenza tra la lettura del segnale in dB e il potenziale alla sorgente sono state eseguite tre serie di misure a distanza costante<sup>22</sup> con tre diverse lunghezze del dipolo radiante. In ciascuna serie il dipolo è stato alimentato da una corrente alternata a 200 Hz con potenziali variabili ed è stata rilevata la misura di potenziale corrispondente ad ogni 5 livelli della scala dB.

Per verificare la variazione di intensità del segnale con la distanza sono state eseguite quattro serie di misure fissando alla sorgente il potenziale e la superficie radiante. In ciascuna serie le letture del livello di segnale in dB sono state fatte alle distanze prefissate di 10, 20, 30 e 40 cm. La differenza tra le quattro serie è nel mezzo di propagazione del segnale misurato, che di volta in volta è stato aria (fig.25), acqua dolce e salata (fig.26) e roccia (fig.27). In tutte le prove l'emettitore è stato distanziato e isolato dalla piastra della pressa mediante una tavoletta di plexiglas. Nelle prove all'interno dell'acqua l'emettitore è stato avvolto e sigillato in un sacchetto da freezer per evitare il cortocircuito del dipolo (fig.24). Per le prove attraverso la roccia lo spessore lapideo è stato creato componendo uno strato disomogeneo con gli stessi campioni 8x8x10 che sono stati usati nelle prove di rottura. In questo caso però non è stato fatto caso alla litologia.

Soltanto per le prove in acqua salata (l'unico mezzo conduttore) è stata ripetuta più volte la misura usando emissioni a diversa frequenza in quanto si è reso subito evidente che in quel caso l'attenuazione del mezzo era significativamente funzione della frequenza.

---

<sup>21</sup> Compresa la collocazione tra le piastre della pressa in modo che si mantenesse anche la stessa schermatura delle condizioni sperimentali delle prove di rottura.

<sup>22</sup> La stessa delle prove di rottura, ponendo l'emettitore al centro del volume occupato dal campione.

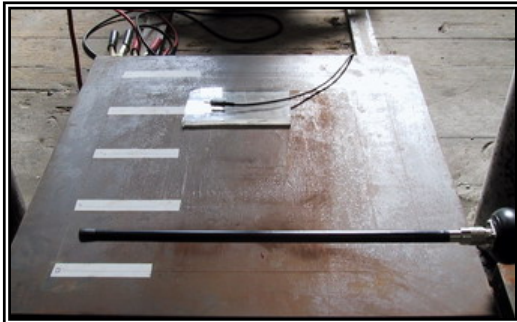




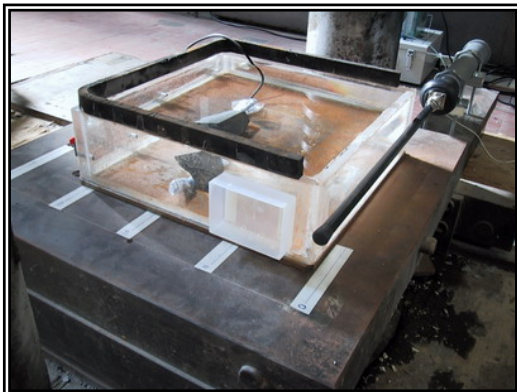
**Fig. 23** - Il cavetto-sonda usato con la sorgente artificiale. Il dipolo emettitore (in basso nella foto) è ricavato da un jack forato (del tipo solitamente usato negli alimentatori).



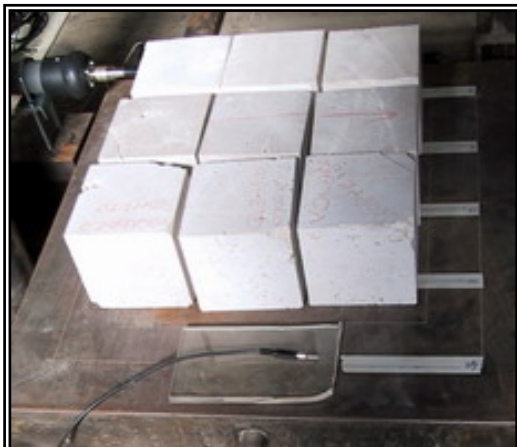
**Fig. 24** - La sonda avvolta nel sacchetto da freezer per l'impiego in acqua. L'ansa aiuta ad impedire l'ingresso dell'acqua.



**Fig. 25** - Prove di propagazione in aria. In primo piano l'antenna ELF, in fondo la sonda emettitrice. Sulla piastra inferiore della pressa sono segnate le distanze standard di misura su spezzoni di nastro adesivo.



**Fig. 26** - Prove di propagazione in acqua. La sonda viene spostata all'interno della vasca. In queste prove lo schermo è completato dalla base d'acciaio a formare una vasca.



**Fig. 27** - Prove di propagazione in roccia. Lo spessore di roccia è creato con l'assemblaggio di blocchi dello stesso tipo di quelli usati nelle prove uniassiali ma senza badare alla litologia.



### 3.0 Analisi dei risultati

I risultati sperimentali sono registrazioni acustiche su traccia stereofonica. Per ciascuna prova di rottura si sono ottenute 3 tracce stereo, ciascuna composta dal segnale monitor confrontato passo-passo con il segnale del rispettivo canale EM. Da queste registrazioni si può ottenere ogni tipo di elaborazione ed analisi. Principalmente è possibile studiare la forma d'onda (dominio dei tempi) e lo spettro delle ampiezze (dominio delle frequenze). L'elaborazione più significativa per i nostri scopi sarà il diagramma a tre variabili che chiamiamo *spetrogramma*, che in questo caso sarà stereografico. Nel monitoraggio in atmosfera invece non possediamo la registrazione acustica (cfr. par. 2.3) ma soltanto gli spetrogrammi (a singola traccia) derivati da un'elaborazione automatica eseguita in tempo reale dalla stazione stessa.

Nel primo caso quindi possiamo studiare ogni dettaglio del fenomeno e ricavarne dei modelli, mentre nel secondo si possono soltanto interpretare gli spetrogrammi alla luce di queste conoscenze e di varie esperienze acquisite "on air", sempre attraverso spetrogrammi. Prima di esaminare i risultati è quindi opportuno fare alcune precisazioni sulla lettura degli spetrogrammi.

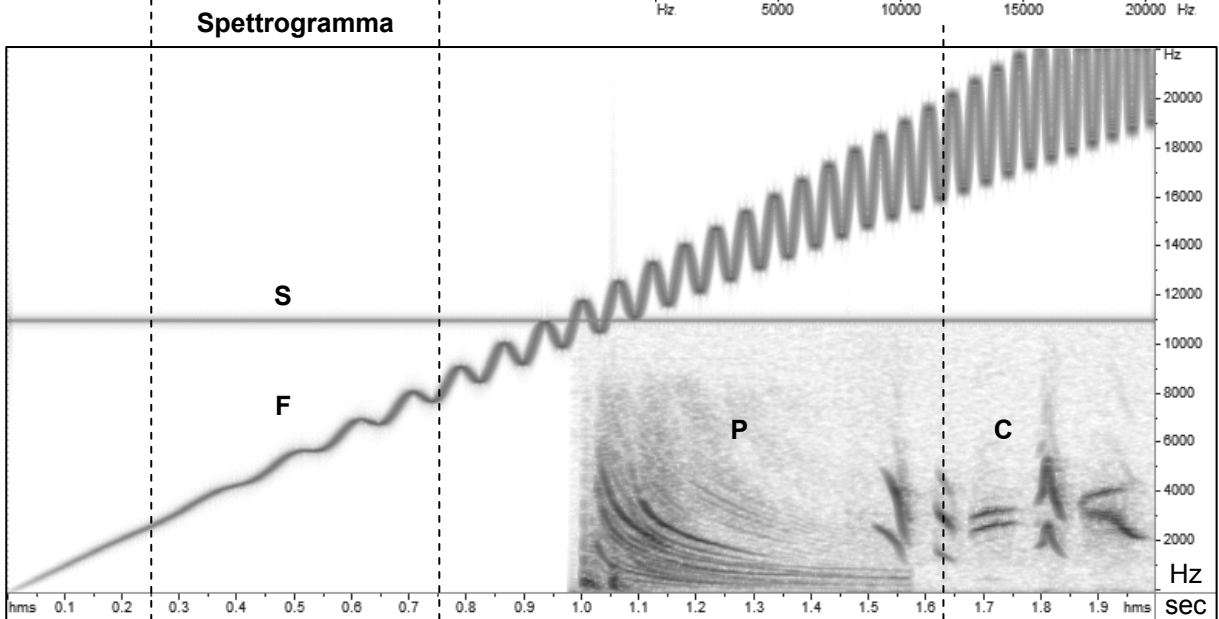
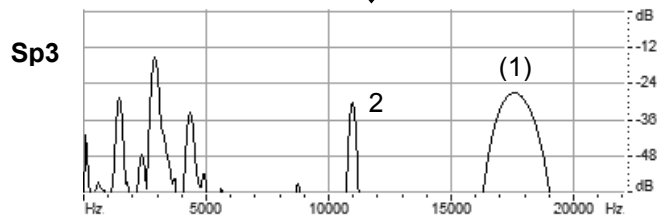
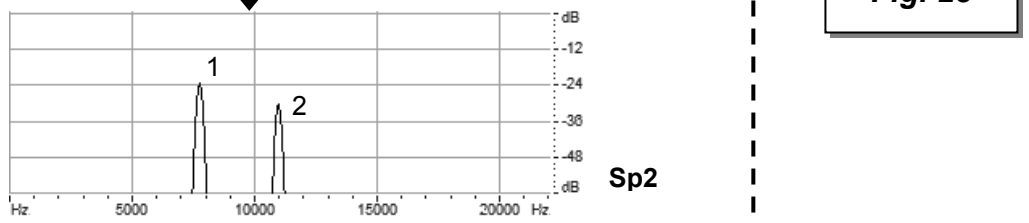
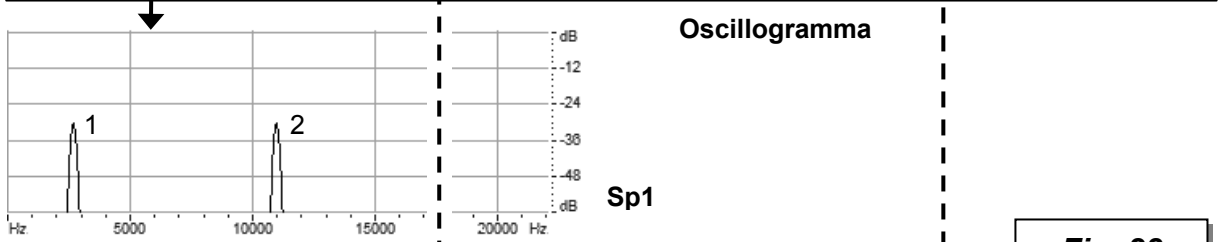
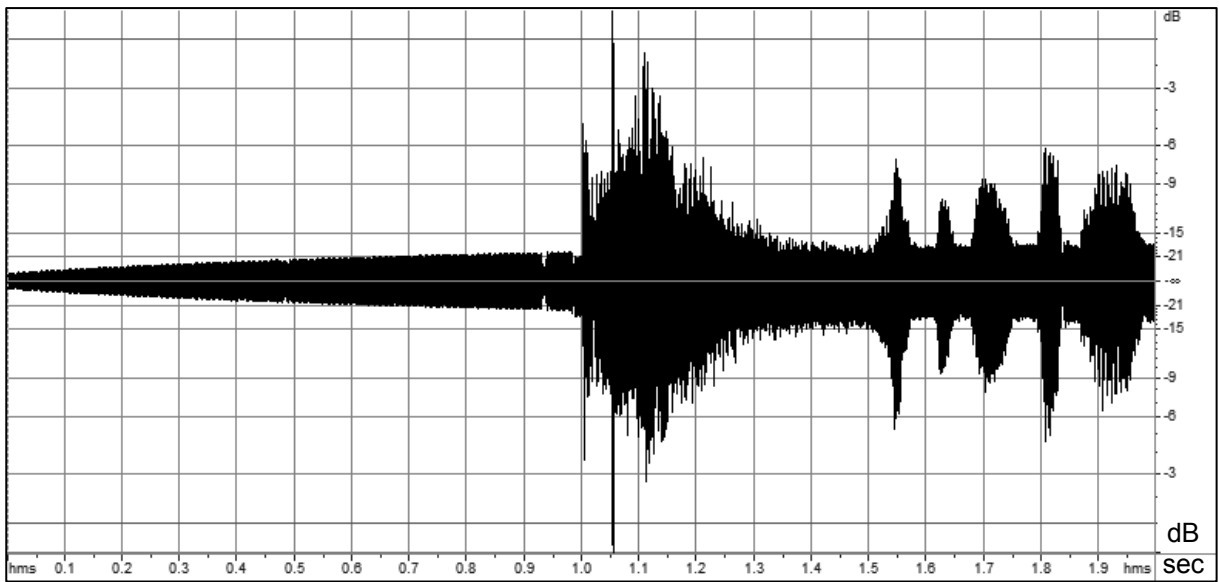
#### 3.1 Interpretazione degli spetrogrammi

Nella fig. 28 è illustrato come esempio lo studio di 2 secondi di un segnale digitale sintetizzato al computer appositamente per questa dimostrazione. In alto è raffigurato l'oscillogramma del segnale. Il tempo è marcato in secondi lungo l'asse X; le ampiezze sono indicate in dB sull'asse Y. Ciò che si vede è la traccia del segnale *nel dominio dei tempi*, che esprime la variazione dell'ampiezza nel tempo, ovvero la forma d'onda delle oscillazioni. Apparentemente è simile ad un sismogramma e si può riconoscere un evento principale iniziato a 1,0 secondi e l'arrivo di altri treni d'onda successivi nello scenario di un rumore di fondo crescente. L'aspetto è vagamente simile ad un segnale sismico ma nel nostro caso bisogna indagare più a fondo perché nello spettro radioacustico si potrebbero manifestare fenomeni di diversa natura che occorre distinguere tra loro.

Il passo successivo dunque è l'analisi spettrale, cioè *nel dominio delle frequenze*. I grafici "Sp" della fig. 28 sono spettri discreti eseguiti sul segnale in tempi diversi, indicati sull'oscillogramma dalle frecce tratteggiate. Riportano sull'asse X la scala delle frequenze in Hz e sull'asse Y i livelli di ampiezza in dB. Questa visione rivela nel rumore di fondo la presenza di almeno due componenti distinte: i picchi 1 e 2 nei diagrammi Sp1 e Sp2. Si nota inoltre una dinamica del picco 1 rispetto al picco 2 che rimane fisso nel tempo sulla frequenza di 1100 Hz. Ciò potrebbe indicare la presenza di due fenomeni distinti ma ancora la situazione è confusa, visto che nello spettro Sp3 appaiono altre componenti analoghe ma difficilmente associabili al picco 1.

L'ulteriore passo avanti è l'elaborazione di uno *spetrogramma* (fig. 28, in basso) cioè di una serie continua di spettri discreti. Sull'asse X è riportato il tempo come nell'oscillogramma. Ogni riga verticale di questo grafico rappresenta uno spettro, con le frequenze marcate in Hz sull'asse Y e le ampiezze espresse in tonalità di grigio. Le linee tratteggiate indicano le sezioni già raffigurate negli spettri discreti Sp.

Soltanto ora è evidente che il segnale sorgente è composto da quattro fenomeni nettamente distinti, ciascuno con una propria dinamica. Ecco di cosa si tratta:



**Fig. 28**

**S** = *sibilo*. E' un'emissione monocromatica alla frequenza di 11000 Hz con intensità costante nel tempo. Nello spettrogramma è rappresentata dalla linea orizzontale centrale, negli spettri era il picco 2 e nell'oscillogramma faceva parte del rumore di fondo.

**F** = *fischio*. E' un'emissione di intensità crescente e tonalità mediamente crescente con una variabilità armonica. Acusticamente è qualcosa di simile ad una "sirena". Nello spettrogramma è l'oscillazione ad andamento obliquo, negli spettri era il picco 1, dinamico e non facilmente identificabile in Sp3. Nell'oscillogramma invece rappresentava la componente ad ampiezza crescente del rumore di fondo.

**P** = *pistola*. E' appunto la registrazione digitale di un colpo di pistola. Inizia ad 1,0 secondi ed è visibile anche nell'oscillogramma come l'evento di maggiore intensità.

**C** = *cinguettio*. Si tratta proprio del cinguettio di un uccello. Nello spettrogramma è nettamente distinguibile dal colpo di pistola anche se i due eventi sono parzialmente sovrapposti nel tempo. Nello spettro Sp3 erano i picchi comparsi nella regione dove si trovava P1. Nell'oscillogramma sono gli eventi successivi a quello principale.

Questa evidenza si ha con lo spettrogramma perché esprime la variabilità nel tempo della distribuzione spettrale dell'intensità del segnale, cioè esprime su carta tutte le caratteristiche percepibili qualitativamente con l'ascolto diretto. Questo tipo di elaborazione grafica a tre variabili (frequenza, ampiezza e tempo) descrive quantitativamente il suono in modo completo e mantiene al contempo una percezione intuitiva paragonabile all'ascolto diretto.

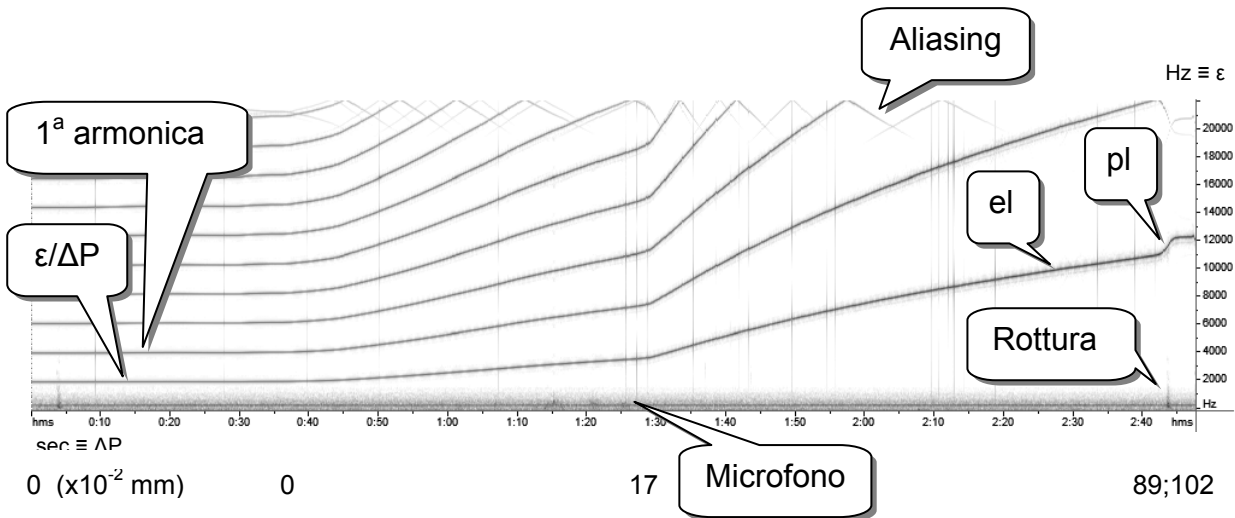
Questo stesso strumento matematico verrà impiegato nello studio della radiazione EM in banda acustica. Per convenzione associeremo i riferimenti al tempo sempre all'asse X: in secondi o in samples nei dati di laboratorio, sempre in minuti nelle registrazioni in atmosfera. Sull'asse X saranno riportate sempre le frequenze in Hz ma in ordine crescente verso l'alto nei dati in laboratorio e inverso in atmosfera (per motivi tecnici). Le ampiezze sono espresse invece in modo qualitativo, attraverso una scala cromatica di grigi in cui il bianco rappresenta lo 0 relativo (rumore strumentale) e il nero il livello di 60 dB.

Nelle registrazioni fatte in laboratorio, su traccia stereo, gli spettrogrammi saranno doppi, ponendo a confronto diretto il segnale registrato sul "canale radio" con quello registrato sul "canale monitor". L'interpretazione del segnale monitor è un po' più complessa perché contiene due informazioni, di cui una codificata.

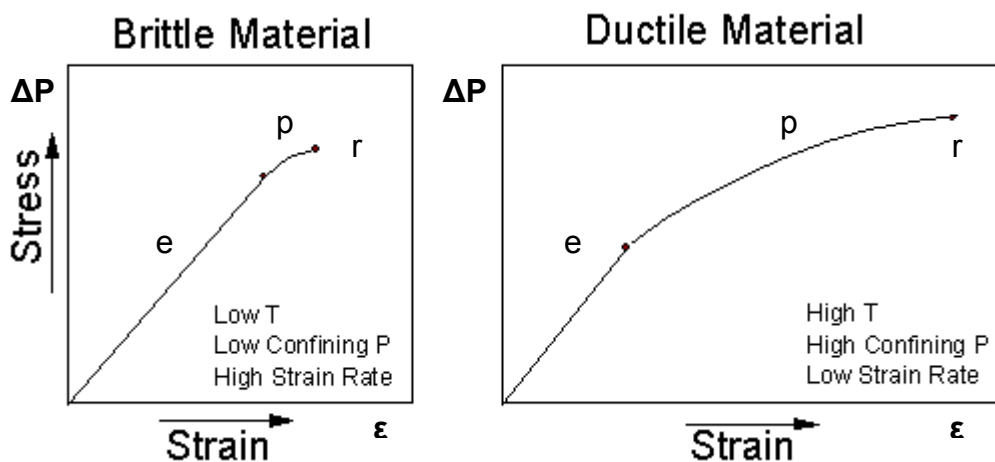
Vediamo di cosa si tratta. La fig. 29 mostra la legenda dello spettrogramma del canale monitor registrato durante la compressione di un campione di "graniglia" (calcestruzzo).

L'interpretazione del microfono acustico è molto semplice: come sempre sull'asse X ci sono i tempi in secondi e sull'asse Y le frequenze in Hz. La banda scura è il rumore ambientale. Sono riconoscibili come zone più scure gli eventi meccanici che hanno interessato il campione (sciame di microfratture) e in particolare le grandi fratture che sono marcate da spettri più estesi (linee verticali). In questo caso il campione è equiparabile ad una breccia con matrice argillosa e la fratturazione è molto limitata. E' tuttavia ben visibile il momento della rottura del campione.

L'interpretazione dell'estensimetro si basa sulla premessa che le prove sono state effettuate ad incremento di sforzo costante. Se questa condizione è vera allora la scala dei tempi (X) è proporzionale allo sforzo applicato. Poiché la frequenza del segnale estensimetrico (Y) è proporzionale alla deformazione, la traccia che produce sullo spettrogramma è un grafico che mette in relazione lo sforzo con la deformazione con un andamento  $\epsilon/\Delta P$ , cioè speculare rispetto al classico grafico  $\Delta P/\epsilon$  (fig.30). La conversione delle frequenze in distanze segue la già citata equivalenza:  $[\text{Hz}] \cdot 100 = [\text{mm}]/100$ .



**Fig.29** – Interpretazione del canale Monitor. La linea indicata come  $\epsilon/\Delta P$  è il grafico deformazione/sforzo. L'entità della deformazione è stata riportata in centesimi di mm nella scala riportata sotto all'asse X. Questo campione di calcestruzzo si è comportato come un materiale rigido che si deforma lentamente in campo elastico (el) ed attraversa un breve campo plastico (pl) prima della rottura. La radiazione acustica rivela inoltre che il comportamento non è fragile poiché non manifesta significative fratture se non dove cambia la pendenza della deformazione. La grande fratturazione avviene solo alla rottura del campione. La deformazione elastica ha raggiunto un  $\Delta h$  di 0,89 mm ma il  $\Delta h$  massimo, alla rottura, è stato di 1,02 mm.



**Fig.30** – Diagramma sforzo-deformazione nella sua grafica classica. Legenda: e) campo di deformazione elastica, p) campo di deformazione plastica, r) rottura.

Sul grafico però si vede un fascio di curve dapprima parallele e poi divergenti. Quella che fa fede è la curva più bassa, ovvero la frequenza fondamentale. Le altre sono lo spettro delle sue armoniche. La presenza delle armoniche può sembrare a prima vista un elemento di disturbo ma in realtà è un utile strumento per percepire immediatamente, a colpo d'occhio, le più piccole variazioni di  $\Delta h$ , senza dover ricorrere alla lettura di precisione sul file digitale. Le armoniche infatti divergono in proporzione matematica "ingrandendo" la deviazione dall'andamento orizzontale di  $2^n$  volte alla  $n^a$  armonica. I "baffi" che ricadono verso il basso quando le armoniche intercettano il limite superiore del grafico<sup>23</sup> (frequenza di Nyquist) sono degli aliasing e non vanno interpretati (cfr. pp. 27 e 42).

## 3.2 Risultati degli esperimenti in laboratorio

Le prove di rottura uniassiale sono state eseguite su un totale di 42 campioni, dei quali 28 sono stati rotti in condizioni naturali, 8 in saturazione d'acqua dolce e 6 in saturazione d'acqua salata. Il primo risultato che si può osservare, senza fare distinzioni tra litologie e condizioni di saturazione, è che in banda radioacustica (ELF-VLF) l'86% dei campioni ha emesso segnali impulsivi e il 43% ha manifestato, insieme a questi, anche un tipo di emissione distinto e mai osservato prima<sup>24</sup>, che è stato chiamato *sequenza impulsiva ordinata* (SIO). Soltanto nel 14% dei casi non si è potuto osservare nessun tipo di emissione.

Per quanto riguarda le bande radiofoniche (HF e UHF) i segnali sono stati molto meno evidenti e spesso di dubbia interpretazione. Sono singoli impulsi associati solo alla rottura ed hanno interessato il 38% dei campioni. La tabella che segue riassume a grandi linee le caratteristiche e gli esiti di ciascuna prova.

Una più approfondita e completa lettura delle registrazioni richiede però l'interpretazione caso per caso, in funzione della litologia, dello stile di deformazione, dello stato di saturazione e degli eventuali problemi occorsi nella prova.

### 3.2.1 Tipi di rottura

In generale, dal punto di vista meccanico, sono stati osservati tre tipi di rottura, che chiameremo rottura "a morsa", "a clessidra" ed esplosione del campione.

La rottura *a morsa* indica che il campione ha subito la compressione in modo non uniforme. Questo può essere dovuto alla cattiva reazione del campione, a causa ad esempio di discontinuità stilolitiche, o alla mancanza del parallelismo nelle piastre della pressa<sup>25</sup>. L'effetto è quello di uno schiacciamento iniziato da un lato del provino e propagatosi verso il lato opposto, con la formazione di fratture parallele ad andamento subverticale che lasciano il provino "in piedi" anche se scomposto

---

<sup>23</sup> Come si accennava nel par. 2.4.4, il circuito dell'estensimetro si può migliorare con l'aggiunta di un filtro passabasso tagliato a 20 o 22 kHz per eliminare l'aliasing delle armoniche. Anche se senza un filtro questo effetto è graficamente antipatico ma non compromette la funzionalità del metodo.

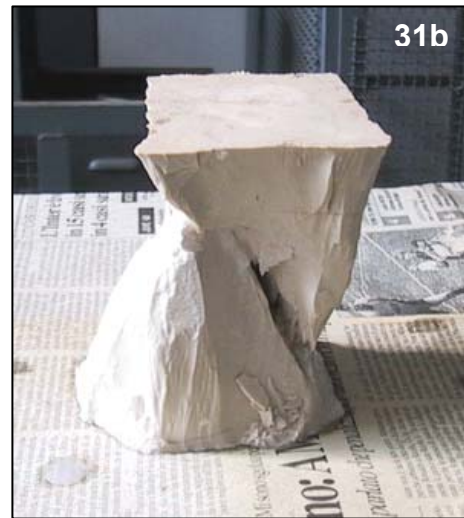
<sup>24</sup> Rispetto all'esperienza della tesi di laurea, in cui analoghe prove erano state registrate in analogico.

<sup>25</sup> Già nella tesi di laurea era stato osservato che questo incidente può accadere talvolta nelle prove eseguite dopo la rottura di campioni "esplosi". In questo caso, a causa della forte scossa, è possibile che delle schegge cadano nel binario della piastra inferiore facendole perdere il perfetto orientamento spaziale.

(fig.31c). Questo tipo di rottura non è ottimale ma produce ugualmente emissioni EM anche se con sequenze differenti dalla norma.

La rottura *a clessidra* è quella che causa fratture con inclinazione di circa 30° rispetto all'asse di compressione, come prevede la teoria. Si è verificata nella maggior parte dei casi e il residuo del provino è costituito da una breccia più o meno omogenea e da una struttura a doppio cuneo (fig.31a) che spesso assume la tipica forma bipiramidale della figura 31b.

L'*esplosione* del campione avviene solo nelle litologie più resistenti, che si rompono alle pressioni maggiori. In questo caso il campione si sbriciola del tutto e il residuo può avere anche le dimensioni di una sabbia. Proprio in questi campioni si registrano, alla rottura, i più alti valori di intensità dell'emissione EM.



**Fig.31** – Prove di rottura:  
a) residui del provino dopo la rottura  
b) rottura “a clessidra”  
c) rottura “a morsa”



A destra la tabella riassuntiva delle prove di rottura; qui sotto la legenda.

- Legenda:
- F** forza applicata alla rottura (tonnellate)
  - $\Delta h$**  deformazione alla rottura (mm)
  - SID** manifestazione della sequenza impulsiva disordinata (ELF)
  - ER** emissione di segnale solo alla rottura del campione (ELF)
  - SIO** manifestazione della sequenza impulsiva ordinata (ELF)
  - RB** emissione anche sulle bande radiofoniche



Caratteristiche ed esiti delle prove di compressione uniassiale:

ROCCIA			ROTTURA			EMISSIONE				Banda kHz	NOTE
Sigla	Litologia	Località	F [t]	Δh [mm]	Riuscita	S I D	E R	S I O	R B		
SCX	scaglia	Norcia (PG)	13	0,63			X		X	5	campione irregolare (prova)
AR4	arenaria	Arquata (AP)	50	0,32		X			X	5	
AR8	arenaria	Arquata (AP)		0,28						10	nessun segnale
CEM1	calcestruzzo	breccia FS	98	0,27	collasso	X		X	X	5	resistenza costante, collasso uniforme
CEM2	calcestruzzo	ghiaia FS	118	1,08			*			10	deboli segnali, collasso senza botto
CEM3	calcestruzzo	ghiaia FS	116	0,31	collasso					10	nessun segnale
CEM4	calcestruzzo	ghiaia FS	141	1,14	collasso					10	nessun segnale, o impercettibile
CEM5	calcestruzzo	ghiaia FS	136	0,71	collasso		X	X		10	deboli segnali
Gran	"graniglia"	ghiaia FS	47	1,02	collasso					10	nessun segnale, resistenza costante
Can	c. marnoso	"Canonica"	67	0,31			X			10	strana traccia dell'estensimetro
Cr5	corniola	Norcia (PG)	31	1,31	mediocre	X		X	X	5	unica frattura traversa
Calc1	calcare	Brescia		0,02		X		?	X	10	?=simile ad SIO ma bassa freq.
Calc2	calcare	Brescia	129	0,24		X				10	
Mol	calcare	"colle Mollone"	80	0,30	mediocre	X				10	segnali deboli, fratturazione poco obliqua
Mol2	calcare	"colle Mollone"	176	0,10	buona	X			X	10	dilatazione alla rottura
Bic1	calcare	"Bicurca"	89	0,34	no botto	X		X		10	grande segnale C
Bic	calcare spat.	"Bicurca"	85	-0,04	cattiva		*			10	problema alla pressa, solo impulso C
CM1	c.massiccio	Visso (MC)	101		buona	X		X		5	manca traccia estensimetrica
CM2	c.massiccio	Visso (MC)	101	0,12	buona	X			X	5	
CM6	c.massiccio	Visso (MC)	34	0,15		X		X	X	5	spettacolare SIO
CM7	c.massiccio	Visso (MC)	24	0,51	cattiva		X		X	10	fratturazione verticale
CM5	c.massiccio	Visso (MC)	78	0,17	buona	X			X	10	forte botto alla rottura
P1	porfido	Trento	234		buona	X		X	-	10	3 VLF, no radio, no estensimetro
P2	porfido	Trento		0,03		X		X	X	10	forse 2 episodi SIO, vedi note
FF1	metamorfite	Marrubiu (OR)	175	0,20	esplosione	X		X	X	10	buona prova con molto segnale
Civ	gabbro	Alpi	270	0,05	esplosione		X	X		10	2 cicli di carico: 276; 270 t
Mag	marmo	"Amantea"	277	0,09	esplosione	X		X		10	3 cicli di carico: 200; 250; 277
GRA1	granito	"Montagnola"	150	0,27	esplosione	X				10	
SAR1	arenaria	Arquata (AP)	23	0,18			*		X?	10	nessun segnale, forse solo in HF
SAR9	arenaria	Arquata (AP)	22	0,29					X?	10	nessun segnale, forse solo in HF
SSC1	scaglia	Norcia (PG)	56	0,03		X				10	debole e concentrato su 2.5 kHz
SCR1	corniola	Norcia (PG)	41	-0,01		X				10	debole e concentrato su 2.5 kHz
SCM4	c.massiccio	Visso (MC)	58	0,09		X		X		10	debole e concentrato su 2.5 kHz
SG1	granito	"Montagnola"	151	0,13	esplosione	X				10	Saturo dolce, immerso salata
SDScan1	c. marnoso	"Canonica"	38	0,37	collasso			X		10	preamplimicro spento, altri problemi
SDCr3	corniola	Norcia (PG)	108	1,82	buona	X		X	X	10	resistenza costante
SDCr4	corniola	Norcia (PG)	90	0,05	buona		X		X	10	rapido con resistenza costante e forte botto
SDAbic1	calcare spat.	"Bicurca"	105	0,37	cattiva		X			10	frenata, compr. veloce, collasso no crack
SDCm3	c. massiccio	Visso (MC)	103	0,14	buona		X		X	10	incertezza iniziale, bel botto e bei prismi
SDCm8	c. massiccio	Visso (MC)	55	0,28	mediocre		X	X	?	10	incremento incostante e rapido, cedimenti
SDSp1	porfido	Trento	83	0,20	cattiva		X		X	10	problema controllo pressa, troppo veloce
SDSm1	marmo	"Amantea"	336	0,20	esplosione	X		X	?	10	2 SIO, 2 emissioni ambigue, vedere note

Aria

Acqua salata

Acqua dolce

### 3.2.2 Tipi di segnale EM

Le emissioni EM osservate in banda radioacustica sono tutte di tipo impulsivo ma dall'analisi spettrale e delle distribuzioni nel tempo si possono riconoscere due differenti tipologie: *Sequenze Impulsive Ordinate* (SIO) e *Sequenze Impulsive Disordinate* (SID).

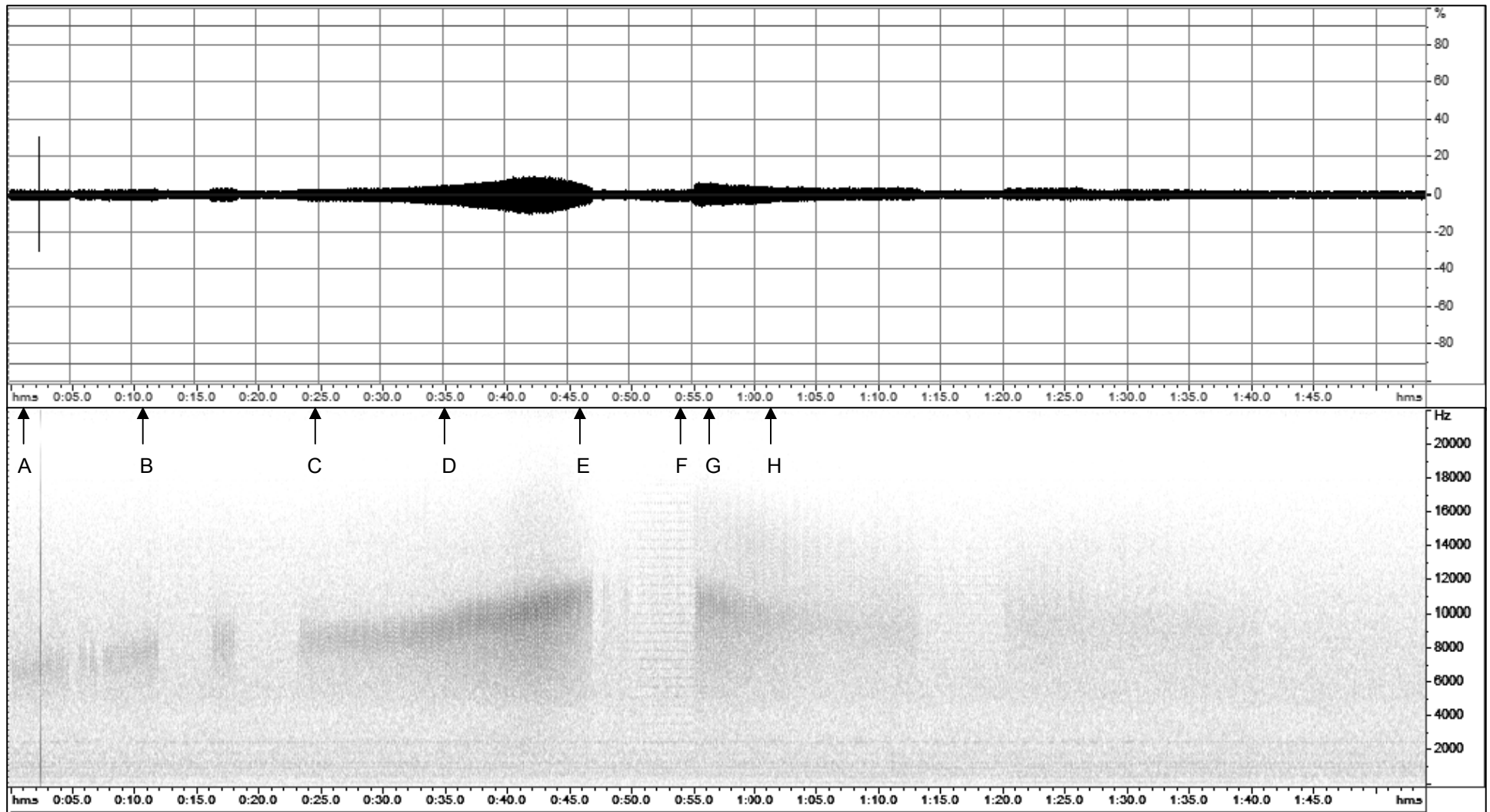
**SIO.** Le sequenze ordinate sono caratterizzate da successioni regolari di impulsi quasi identici tra loro. La distribuzione spettrale delle ampiezze è anch'essa uniforme e localizzata in una fascia ampia circa 3 kHz che può tendere ad una lenta deriva, quasi sempre verso frequenze più alte (fig.32). Il centro banda dell'emissione può spazzare una regione di spettro compresa tra 5 e 15 kHz (es. fig.33). Questo fenomeno si manifesta nei nostri spettrogrammi come una banda grigia piuttosto uniforme che si estende orizzontalmente o con una piccola inclinazione, sospesa a cavallo della metà della scala delle frequenze. Questo alone (che ricordiamo è composto da una fitta sequenza di impulsi) presenta improvvise nette interruzioni dovute proprio alla cessazione della raffica impulsiva. Quando l'impronta manifesta una deriva è proprio in corrispondenza di queste interruzioni che può (raramente) invertire la tendenza e derivare verso il basso. Sempre raramente, nelle pause può manifestarsi un terzo tipo di emissione, l'unico non impulsivo<sup>26</sup>, costituito da un coro di frequenze monocromatiche, equidistanziate ma apparentemente non armoniche (figure 32 e 33b, spettro F). Questa particolare impronta spettrale solitamente compare con intensità crescente e termina improvvisamente alla ripresa della raffica impulsiva.

Se si osservano le raffiche con un'alta risoluzione nei tempi (fig.34c) si può notare che gli impulsi si ripetono in realtà in sequenze identiche di 3 unità, che chiamiamo *treni*. Gli impulsi di ciascun treno non sono davvero gemelli ma presentano una lieve variabilità. La frequenza media degli impulsi di ogni serie è ciò che determina la posizione del centro banda mentre la variabilità degli impulsi rispetto a questa media determina l'ampiezza della banda. Si può inoltre osservare, negli spettri discreti ottenuti su lunghi periodi di analisi, la presenza di creste simili a quelle già osservate nella fig. 33c-F. Questa volta però (fig. 34b) si tratta del modo in cui lo spettro visualizza la ripetizione delle serie di impulsi succedutesi durante il periodo di analisi. La frequenza che separa le creste corrisponde infatti al periodo di ripetizione dei treni. Questo modo per evidenziare il periodo di variabilità del segnale è analogo, anche se meno elegante dal punto di vista matematico, al risultato di una trasformata sulla trasformata di Fourier.

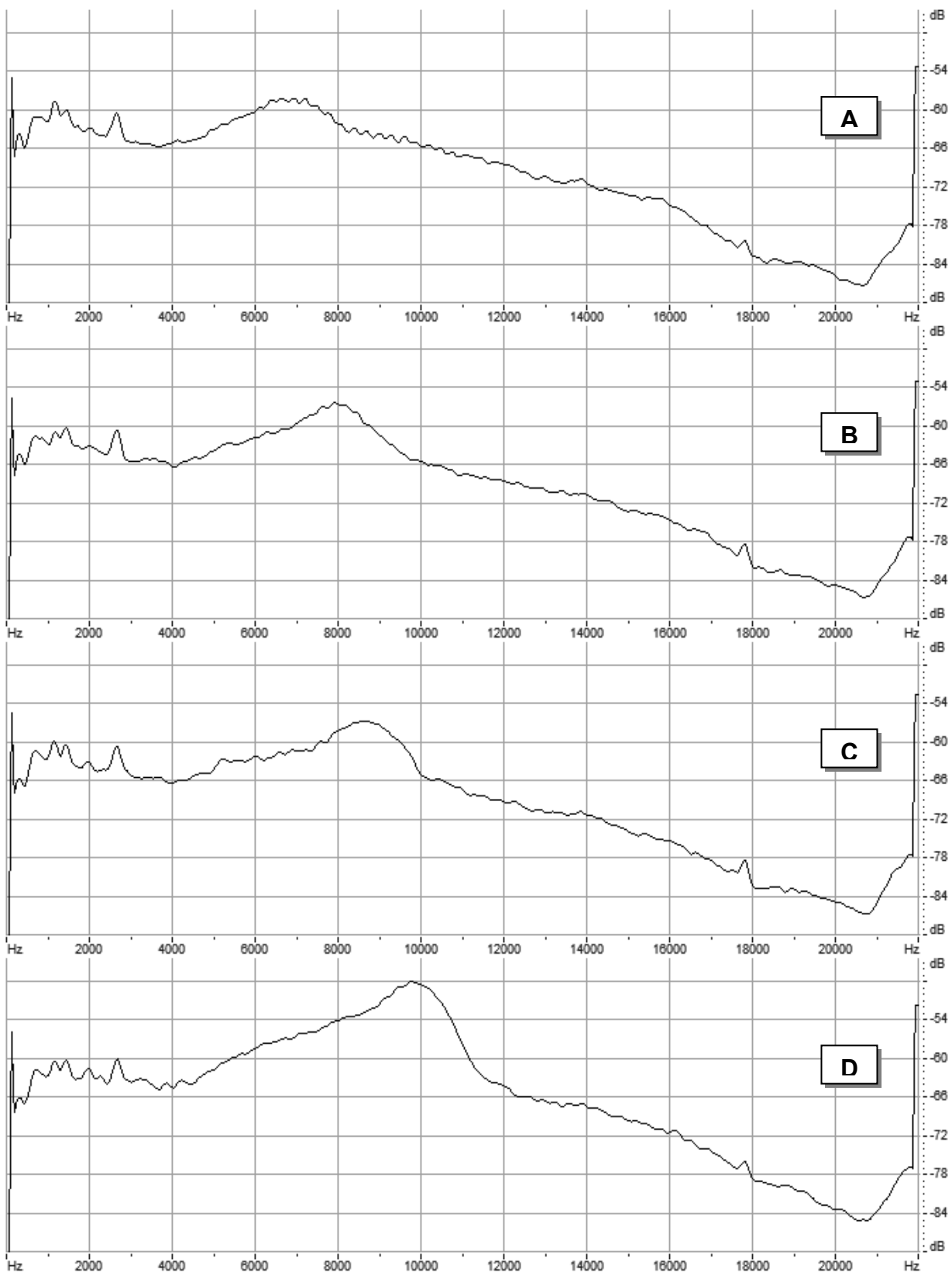
Tornando alle considerazioni generali, il fenomeno SIO si manifesta solitamente nella prima metà della prova di compressione o in episodi più tardivi quando talvolta fratture di grande entità (marcate anche nella traccia estensimetrica) scaricano la tensione accumulata e danno il via ad un nuovo episodio di accumulo sul blocco residuo. Analogamente un campione che eccezionalmente era stato sottoposto a tre cicli di carico (due scarichi della pressa sulla soglia della rottura) ha manifestato il più intenso episodio SIO proprio all'inizio del terzo ciclo.

---

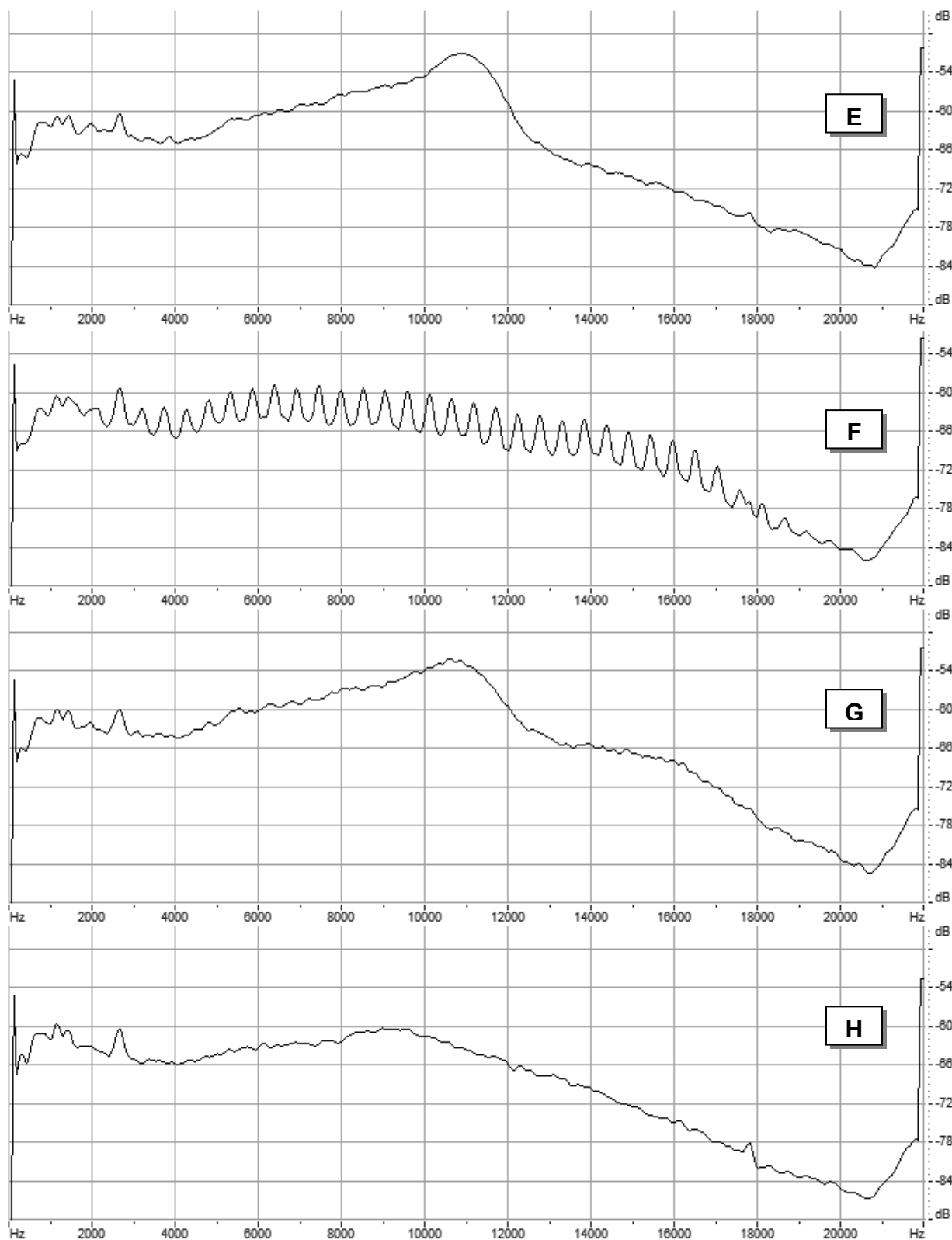
<sup>26</sup> Malgrado la diversa natura è un evento rarissimo e sempre associato all'SIO, ragion per cui è classificato come parte della dinamica di uno unico fenomeno.



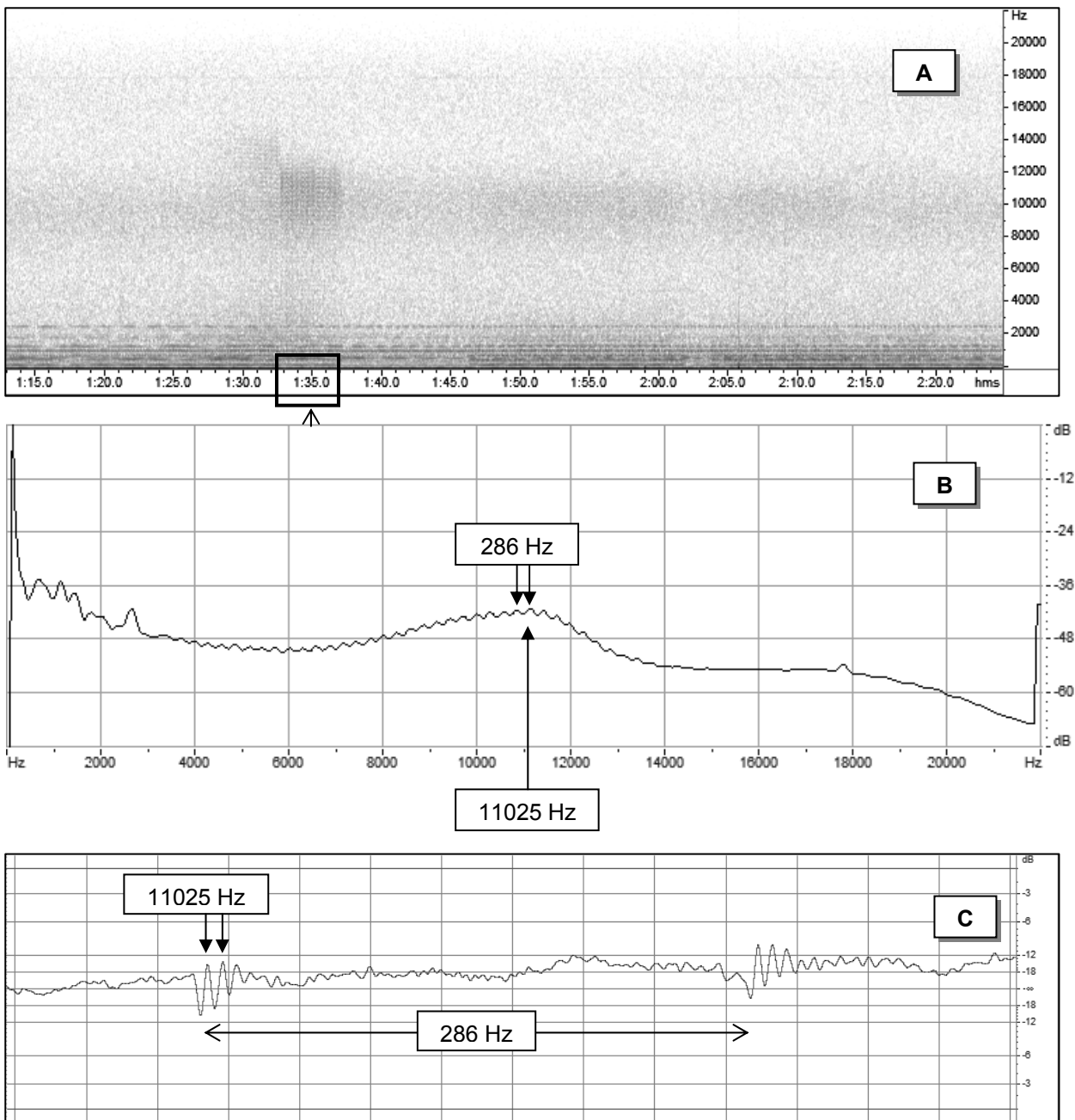
**Fig.32** - Sequenza Impulsiva Ordinata (SIO) in un campione di "calcare massiccio" (CM6) della successione umbro-marchigiana raccolto presso Visso (MC). La scala orizzontale esprime il tempo in min:sec. Le scale verticali indicano l'ampiezza del segnale in % nell'oscillogramma (in alto) e la frequenza dello spettrogramma (in basso) dove le ampiezze sono invece espresse dalla tonalità dei grigi (bianco = 0 dB; nero = -90 dB). Si osservano diversi episodi separati da nette interruzioni e una deriva in frequenza della banda di maggiore intensità del segnale. Le frecce marcano sulla scala dei tempi gli istanti da cui sono stati estratti gli spettri che seguono.



**Fig.33a** - Spettri discreti estratti dall'episodio SIO della figura 32 nei punti in essa indicati. Medie spettrali su intervalli di 1 sec con FFT su 512 campioni (il periodo della FFT è di 11,6 ms, la risoluzione di 86 Hz). Sugli assi X le frequenze in Hz; sugli assi Y le ampiezze in dB. Si osserva chiaramente la deriva verso le alte frequenze di un segnale la cui massima ampiezza è concentrata in una stretta banda.



**Fig.33b** - Spettri discreti estratti dall'episodio SIO della figura 33a nei punti in essa indicati. Medie spettrali su intervalli di 1 sec con FFT su 512 campioni (il periodo della FFT è di 11,6 ms, la risoluzione di 86 Hz). Sugli assi X le frequenze in Hz; sugli assi Y le ampiezze in dB. Negli spettri E e G la massima ampiezza del segnale è raggiunta alla frequenza di 10859 Hz. Nello spettro F la periodicità dei picchi è di 529 Hz e il decadimento delle ampiezze non sembra rispecchiare l'andamento di uno spettro di armoniche.



**Fig. 34 a, b, c.** – Emissione SIO registrata in un diverso tipo di calcare (Bic1) e rappresentativa questa volta di una modesta attività.

A) Spettrogramma dell'episodio SIO. Sull'asse X i tempi in min:sec; sull'asse Y le frequenze in Hz; la scala dei grigi esprime l'ampiezza del segnale. La colorazione dello sfondo è dovuta al risalto dato al segnale di modesta intensità attraverso l'amplificazione digitale di 30 dB e l'aumento del contrasto grafico.

B) Spettro discreto mediato per tutta la durata dell'episodio SIO (come indicato). Sull'asse X le frequenze in Hz; sull'asse Y le ampiezze in dB. La massima intensità corrisponde alla frequenza di 11000 Hz circa e si osserva che la curva spettrale presenta numerose creste che si susseguono con periodicità regolare di 286 Hz.

C) Oscillogramma di una porzione del segnale SIO. Griglia di 0,454 ms e ampiezza in dB. Si osservano due treni il cui periodo di successione corrisponde ( $t=1/f$ ) alla frequenza di periodicità delle creste osservate nello spettro del diagramma C. Ciascun treno è composto di tre impulsi principali il cui periodo medio corrisponde alla frequenza di massima emissione osservata sempre nel diagramma C.

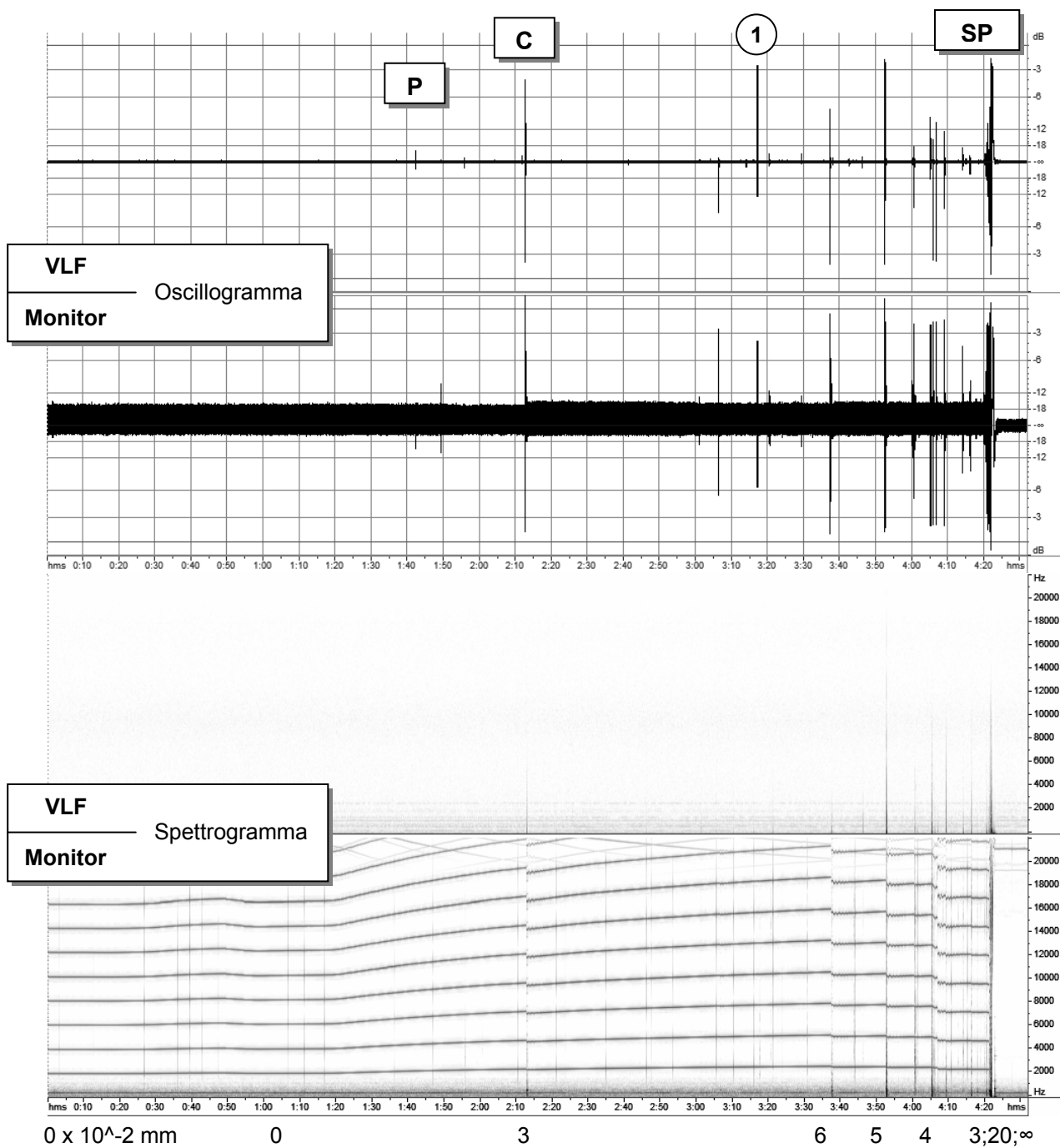
**SID.** Le sequenze disordinate sono successioni di impulsi non identici e variamente distribuiti nel tempo che terminano e culminano al tempo stesso con la rottura del campione. In generale la durata del fenomeno, quindi l'anticipo sulla rottura, risulta sempre poco maggiore della metà del tempo necessario a raggiungere la rottura con un incremento di sforzo costante. La densità di eventi è variabile, addensata in gruppi e gradualmente più fitta all'approssimarsi della rottura. Nell'imminenza della rottura infatti si può riconoscere un gruppo particolarmente fitto e intenso che chiamiamo *Sequenza Parossistica* (SP) e che culmina con picchi di massima intensità assoluta proprio alla rottura. Nelle figure 35 e 36 sono messi a confronto materiali di diversa reattività. In entrambi i casi i picchi rappresentano spesso gruppi di segnali se osservati con maggiore risoluzione temporale. La sequenza parossistica è illustrata in dettaglio nella fig. 37.

L'intensità di questo tipo di impulsi è sempre maggiore di quella dei fenomeni SIO. Misure ripetute sistematicamente su tutte le prove di rottura hanno evidenziato che l'intensità del segnale SIO non supera il 25% della media dei segnali SID (rottura esclusa) e il 6% della media dei picchi di rottura (SID). Il periodo degli impulsi nella SID presenta una certa variabilità ma è mediamente compreso tra 1 e 5 ms (banda 200 Hz - 1 kHz) e la distribuzione spettrale è talvolta analoga ad uno spettro di armoniche (impulso puro) ma più spesso complessa e condizionata da diverse componenti presenti nella forma d'onda. La figura 38 mostra alcuni esempi. L'oscillogramma tipico è composto da tre semifasi di periodo crescente, con la prima solitamente positiva. La massima ampiezza è sempre nella fase centrale, la cui frequenza determina la distribuzione armonica dello spettro e la sua collocazione nella banda radioacustica. La prima fase, di ampiezza intermedia, apporta agli spettri quelle vistose componenti ad alta frequenza che talvolta ne caratterizzano l'aspetto. La terza semifase è sempre quella di minore ampiezza e apporta le componenti che completano lo spettro nelle basse frequenze. Raramente sono stati registrati impulsi gemelli ma sempre ravvicinati e in associazione con eventi gemelli anche nella registrazione acustica.

Confrontando gli oscillogrammi sulle tracce stereo può apparire a prima vista una perfetta corrispondenza tra gli impulsi EM e le fratture del campione, marcate dalla registrazione del microfono acustico. In realtà studiando i picchi nel dettaglio emerge che se è vero che tutti gli impulsi EM corrispondono a fratture, è vero anche che non tutti i picchi acustici trovano corrispondenza nelle emissioni EM. L'associazione alle fratture di maggiore entità è comprovata dall'ulteriore corrispondenza ai "gradini" della traccia estensimetrica. Tuttavia è possibile che molti picchi della traccia microfonica siano in realtà da attribuire al distacco di schegge dalla superficie del campione, ai loro urti con lo schermo di protezione e alla caduta. Se si confrontano le due tracce con un alto dettaglio nella scala dei tempi si nota inoltre che spesso non esiste una perfetta sincronia temporale anche negli eventi apparentemente coincidenti. Inoltre il primato nell'arrivo del treno d'onde non appartiene con sistematicità a nessuno dei due segnali<sup>27</sup>, tuttavia il picco di maggiore ampiezza è spesso quasi coincidente.

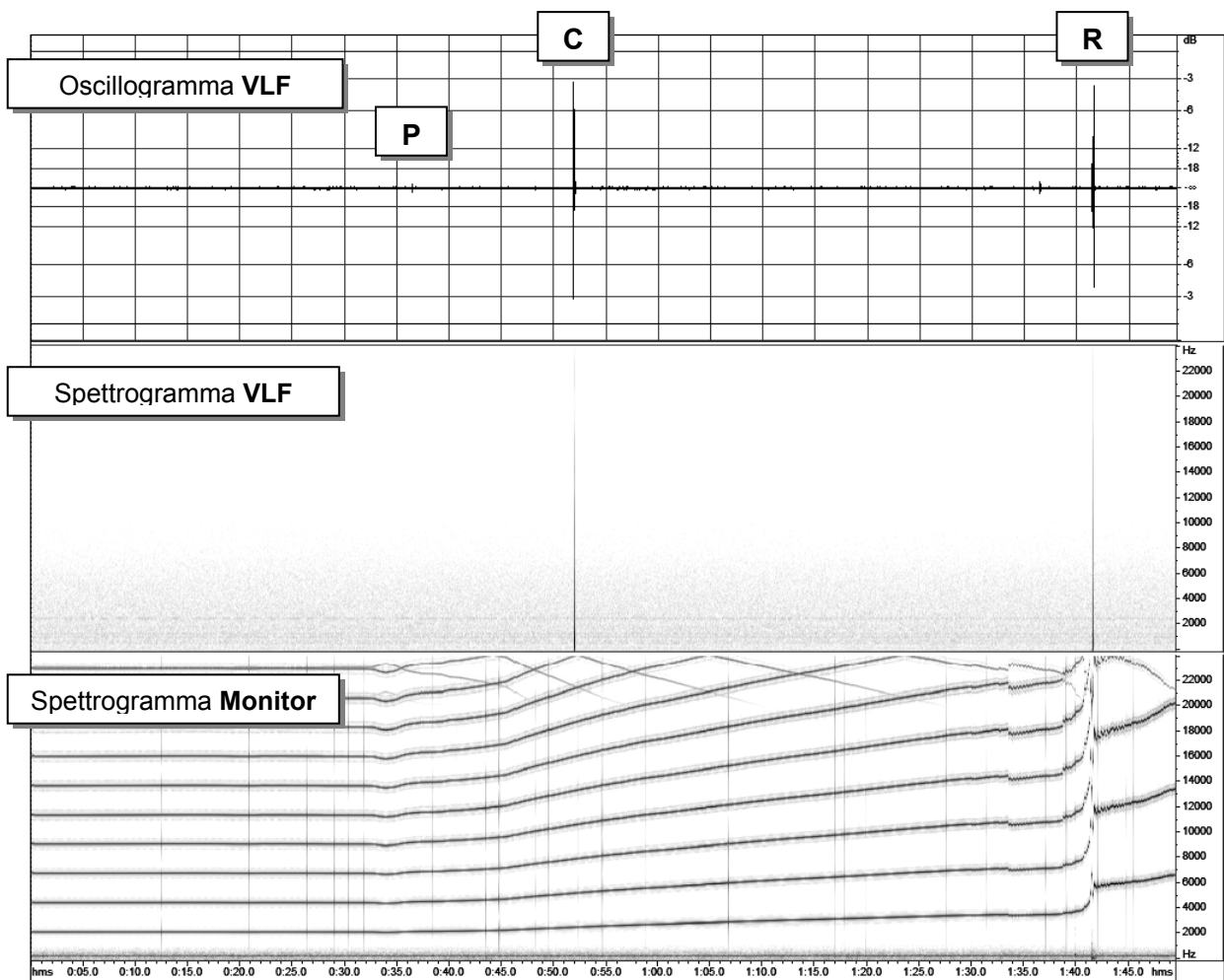
---

<sup>27</sup> Le distanze dei sensori dal centro del campione sono inferiori ai 20 cm e la differenza tra la velocità del suono e quella della luce non è rilevante in questo caso.



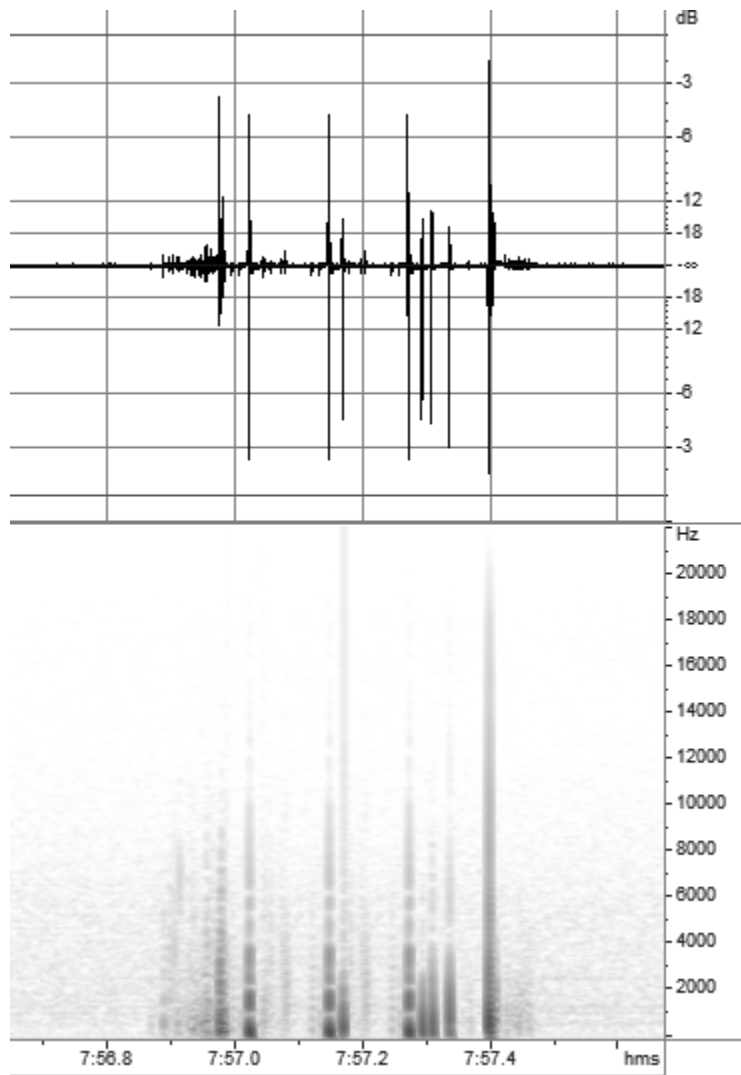
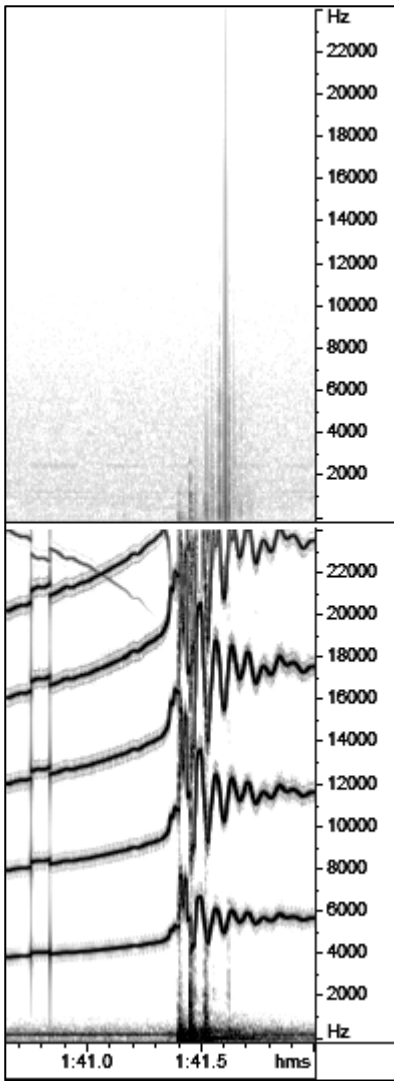
**Fig. 35** - oscillogramma e spettrogramma a confronto, relativi alla coppia sincrona di segnali VLF (sopra) e Monitor (sotto). Il campione in esame (FF1) è una metamorfite proveniente da Oristano. Asse X = tempo in minuti. Assi Y = ampiezza del segnale in dB e spettro del segnale in Hz. Il segnale Monitor è composto da curve a sviluppo orizzontale che rappresentano il grafico equivalente sforzo-deformazione (x-y) e da rumore di fondo (compresi spettri a sviluppo verticale) che rappresenta la radiazione acustica emessa dal campione. Interpretazione della deformazione: la curva più bassa (segnale sorgente) rappresenta il grafico sforzo-deformazione su scale equivalenti: l'asse x è proporzionale allo sforzo; l'asse y è proporzionale alla deformazione (1 kHz = 1/10 mm). Le curve parallele (armoniche del segnale sorgente) riproducono la stessa deformazione su scala progressivamente più accentuata, rendendo percepibile alla visione grafica anche le variazioni più piccole rilevabili altrimenti solo dalla misura del segnale digitale. La scala X riportata più in basso indica la deformazione in mm raggiunta in quell'istante.





**Fig. 36** - Oscillogramma e spettrogramma del segnale VLF confrontati con il segnale Monitor (solo spettro) in una prova effettuata su un campione di Arenaria Argillosa (AR4) della Formazione della Laga (Arquata, AP). Asse X = tempo in minuti; assi Y = ampiezza del segnale in dB e spettro del segnale in Hz. Il segnale Monitor è composto da curve a sviluppo orizzontale che rappresentano il grafico equivalente sforzo-deformazione (x-y) e da rumore di fondo (compresi spettri a sviluppo verticale) che rappresenta la radiazione acustica emessa dal campione. Interpretazione della deformazione: la curva più bassa (segnale sorgente) rappresenta il grafico sforzo-deformazione su scale equivalenti: l'asse x è proporzionale allo sforzo; l'asse y è proporzionale alla deformazione (1 kHz = 1/10 mm). Le curve parallele (armoniche del segnale sorgente) riproducono la stessa deformazione su scala progressivamente più accentuata, rendendo percepibile alla visione grafica anche le variazioni più piccole rilevabili altrimenti solo dalla misura del segnale digitale. La massima deformazione raggiunta dal campione alla rottura è stata di 0,32 mm.

Si osserva una sequenza SID ridotta, tipica di un materiale in cui la matrice argillosa assorbe lo sforzo comprimendosi. La curva di deformazione manifesta visibilmente il campo plastico. Durante la deformazione si formano poche fratture e il campione si rompe praticamente in un unico evento meccanico finale (confrontare con il caso di fig.35). Occorre chiarire che la riduzione della dimensione grafica dell'immagine ha fatto scomparire alcuni impulsi dallo spettrogramma, tuttavia visibili ancora sull'oscillogramma. Questo discorso è valido anche per la precedente fig.35.

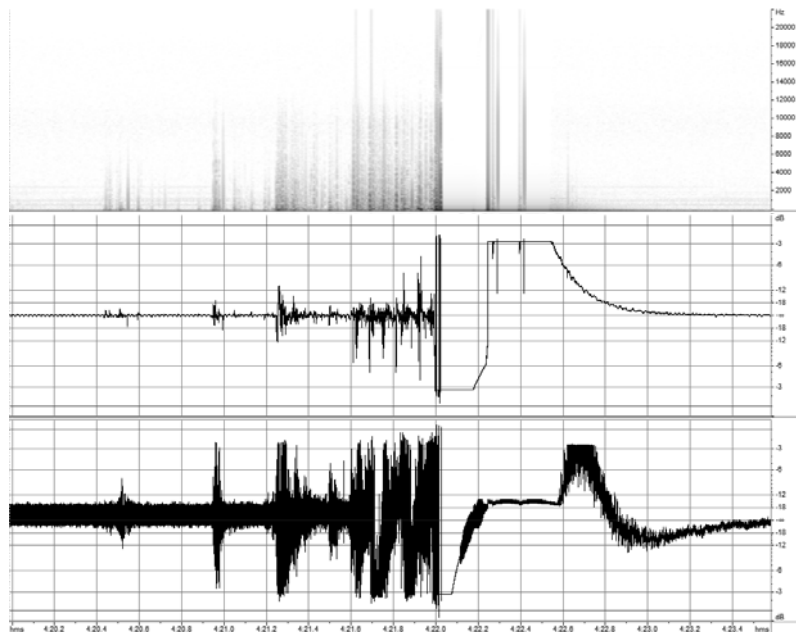


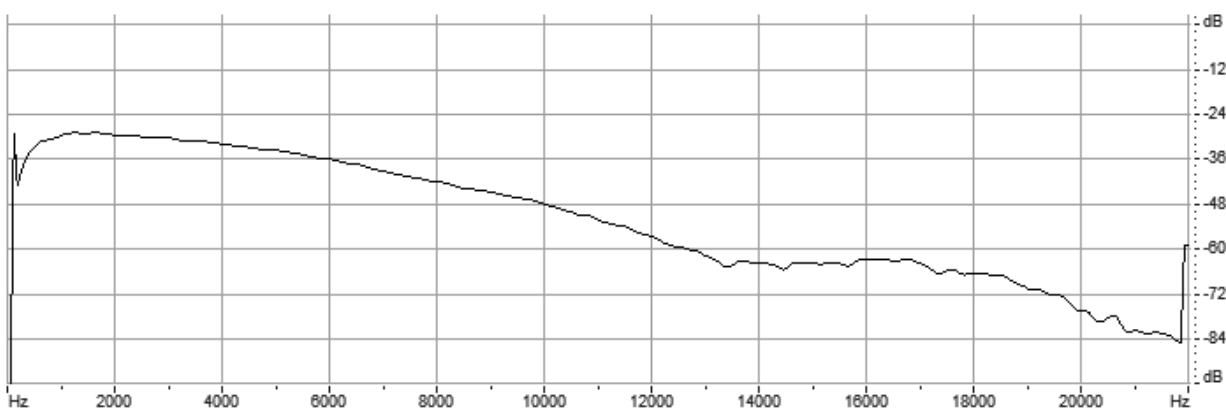
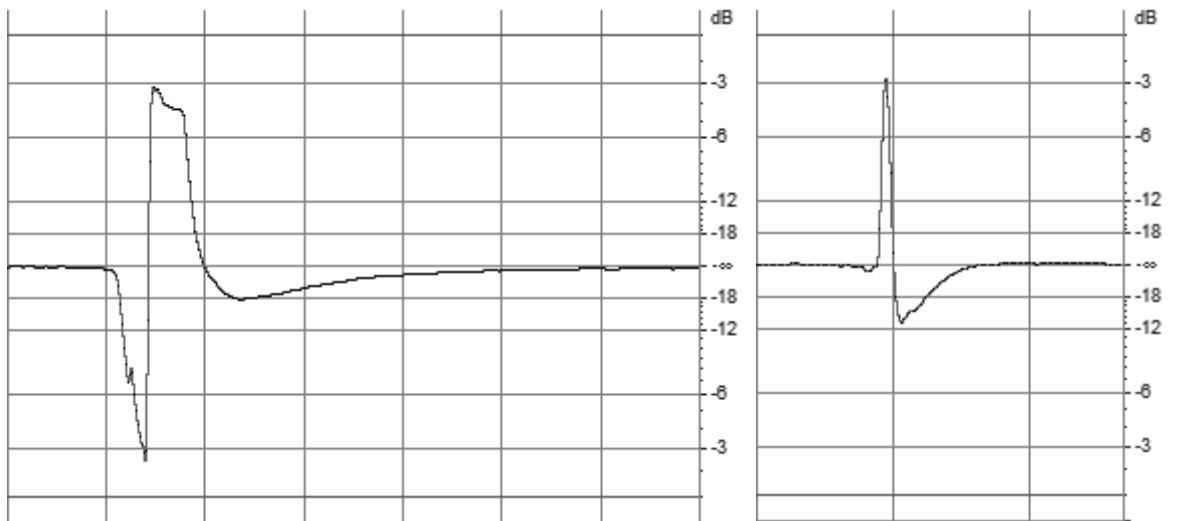
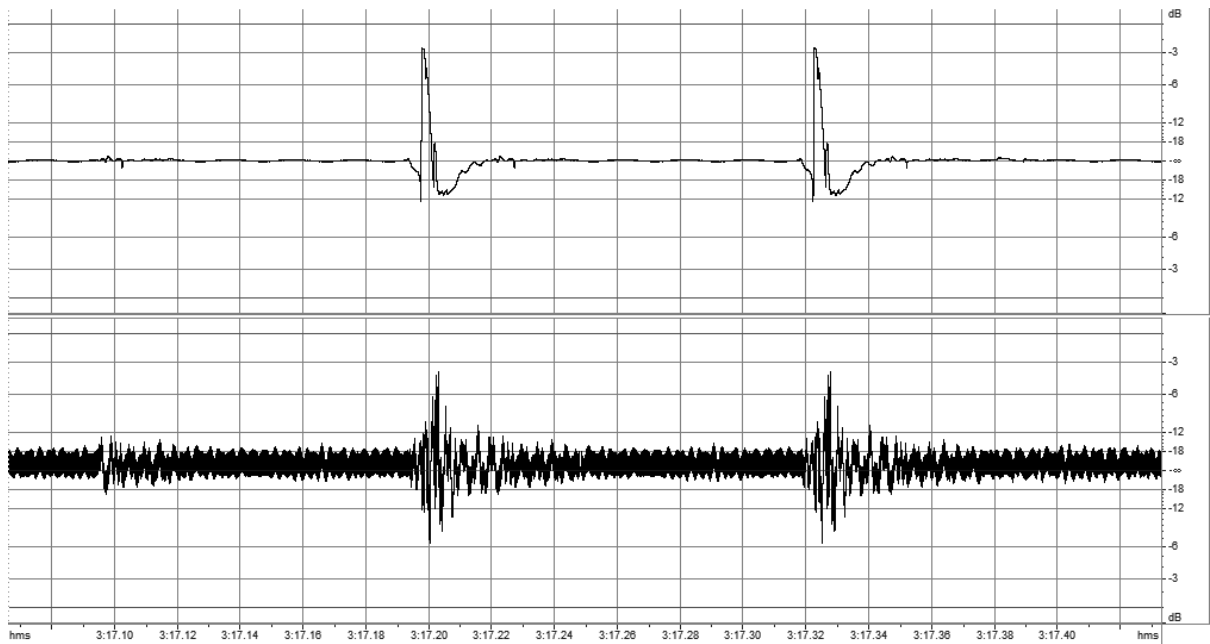
**Fig. 37** - Alcuni esempi di Sequenza Parossistica in dettaglio.

In alto lo spettrogramma della SP vista in fig.36: sopra VLF e sotto Monitor.

A destra in alto la SP di una prova su calcestruzzo: solo segnale VLF con oscillogramma sopra e spettrogramma sotto.

A lato la SP della prova vista in fig.35. Dall'alto: spettrogramma VLF, oscillogramma VLF, oscillogramma Monitor.





**Fig. 38** – Variabilità della forma d'onda tipica degli impulsi nella SID. In alto il dettaglio dell'episodio marcato con (1) nel campione della fig. 35 e caratterizzato da una coppia di impulsi gemelli. Tempo espresso in min:sec.dd; ampiezza in dB. Al centro a sinistra il dettaglio dell'impulso marcato P1 nel campione della fig. 36. Griglia di 1,134 ms e ampiezza in dB. Il periodo di 5,7 ms (176 Hz) è composto da semifasi di 1103 Hz, 735 Hz e 110 Hz. Al centro a destra un impulso rilevato nel calcestruzzo CEM1 (stesse scale) e sotto il suo spettro con FFT di periodo 11,6 ms.

### 3.2.3 Stili di deformazione e stili di emissione

La quantità degli impulsi nella SID è strettamente legata alla quantità di fratture che subisce il materiale e questo implica un legame tra la dinamica dell'emissione EM e lo stile di deformazione fragile o duttile del materiale stesso<sup>28</sup>. Le figure 35 e 36 erano appunto due esempi su materiali di stile diverso.

Nelle prove eseguite possiamo distinguere due stili opposti nella reazione del campione alla compressione uniassiale. Da un lato abbiamo materiali come l'arenaria argillosa (appunto la fig. 36) o i calcestruzzi (equiparabili a brecce con matrice argillosa) che oppongono poca resistenza, si comprimono molto con poca o nessuna fratturazione e si rompono in un unico episodio fragile. Ci sono poi le rocce molto rigide e fragili, che si comprimono poco e si fratturano molto. Durante lo sforzo si staccano schegge dalla superficie esterna, si formano molte microfratture interne e a volte insorgono macrofratture di assestamento (adattamento rigido alla deformazione) che interessano l'intero campione. Nella stessa rottura si può riconoscere spesso più di un episodio di macrofratturazione. Questi due stili si riconoscono anche nella sequenza impulsiva dell'emissione radioacustica, che è caratterizzata nel primo caso (fig.36) da una scarsa successione di impulsi e un breve ma intenso episodio parossistico alla rottura. Nel secondo caso invece (fig.35) si manifesta una densa raffica di impulsi che termina con una sequenza parossistica più lunga e articolata.

Ci sono tuttavia nella SID delle caratteristiche comuni che si ripetono in quasi tutte le prove, quasi fossero indipendenti dagli stili. Consideriamo come unità di tempo (100%) il tempo necessario per portare il campione alla rottura con un incremento di sforzo costante e chiamiamo  $T_{100}$  l'istante della rottura. Rispetto a questa notiamo ancora sulle figure 35 e 36 (scala dei tempi marcata più in basso) che si è manifestato un impulso di particolare entità (marcato C) molto vicino a  $T_{50}$  e che l'inizio della sequenza disordinata (impulso P) cade in prossimità dei 2/3 di  $T_{50}$ . Queste caratteristiche sono visibili in entrambe le figure di riferimento, anche se nella 36 la quantità di impulsi è estremamente ridotta. In realtà questa caratteristica di "sincronia" di alcuni picchi caratteristici si ripete su quasi tutte le prove e interessa forse anche un terzo impulso e l'inizio della SP. Il "quasi" è dovuto alla necessità di una certa interpretazione che occorre fare su alcune prove, là dove per problemi tecnici la pressa non era partita subito con il rate operativo o ha subito variazioni manuali nel corso della prova (incremento incostante). Ma applicando su queste prove "anomale" i parametri di sincronismo ottenuti sulle altre si può osservare ancora una buona sovrapposizione dei picchi ed è possibile anche individuare un  $T_0$  di inizio effettivo della prova.

L'ultima analisi riguarda i "campioni muti", cioè quel 14% che non ha emesso segnale EM. Si tratta di 6 provini: due arenarie argillose, tre calcestruzzi e una "graniglia" (calcestruzzo a matrice bianca e brecce colorate). In tutti i casi sono materiali a matrice argillosa che tendono a comprimersi senza fratturarsi fino alla rottura e che in altre prove hanno comunque emesso dei segnali, ma in modo molto limitato a causa del loro particolare stile di rottura. Inoltre due dei provini sono stati rotti in saturazione (come si vedrà in seguito questo limita l'emissione) e in uno dei calcestruzzi rotti in aria si vede qualcosa che non è interpretabile ma potrebbe essere un segnale molto debole.

---

<sup>28</sup> Questa differenza non sembra riflettersi mai nella SIO, che del resto non trova corrispondenza con le fratture marcate nel canale Monitor.

### 3.2.4 Propagazione del segnale nei vari mezzi

Le prove di propagazione nei mezzi aria, roccia, acqua dolce e acqua salata hanno evidenziato due caratteristiche nell'attenuazione del segnale VLF. La prima è che il mezzo agisce come un filtro passabasso, la seconda è che la pendenza del filtro dipende dal materiale e dalla frequenza della radiazione. Tutto ciò è conforme con la teoria della propagazione EM che lega l'attenuazione (Telford et al., 1976) alla costante dielettrica del mezzo e alla frequenza della radiazione (cfr. tav. 15).

Le figure 39a e 39b mostrano questa variabilità misurata sulle radiazioni di 5000 Hz e 500 Hz. In entrambi i casi esiste una distanza critica che separa un'inversione nell'ordine di successione dei materiali come miglior mezzo di propagazione. Questa distanza però varia con la frequenza. La fig. 40 mette a confronto i due grafici evidenziando che la differenza interessa anche la pendenza delle rette. La figura 41 infine mette a confronto gli spettri delle armoniche di 100 Hz nel segnale che ha attraversato i vari materiali per una stessa distanza fissa. E' evidente che l'acqua salata è l'elemento con la massima variabilità e che rappresenta il miglior mezzo di propagazione per le basse frequenze ma il peggiore per le alte frequenze della banda acustica. Si vede inoltre che l'azione filtrante è sempre di passabasso. Questa vistosa divergenza di sviluppo nell'acqua salata è dovuta alla notevole differenza di resistività rispetto agli altri mezzi presi in esame.

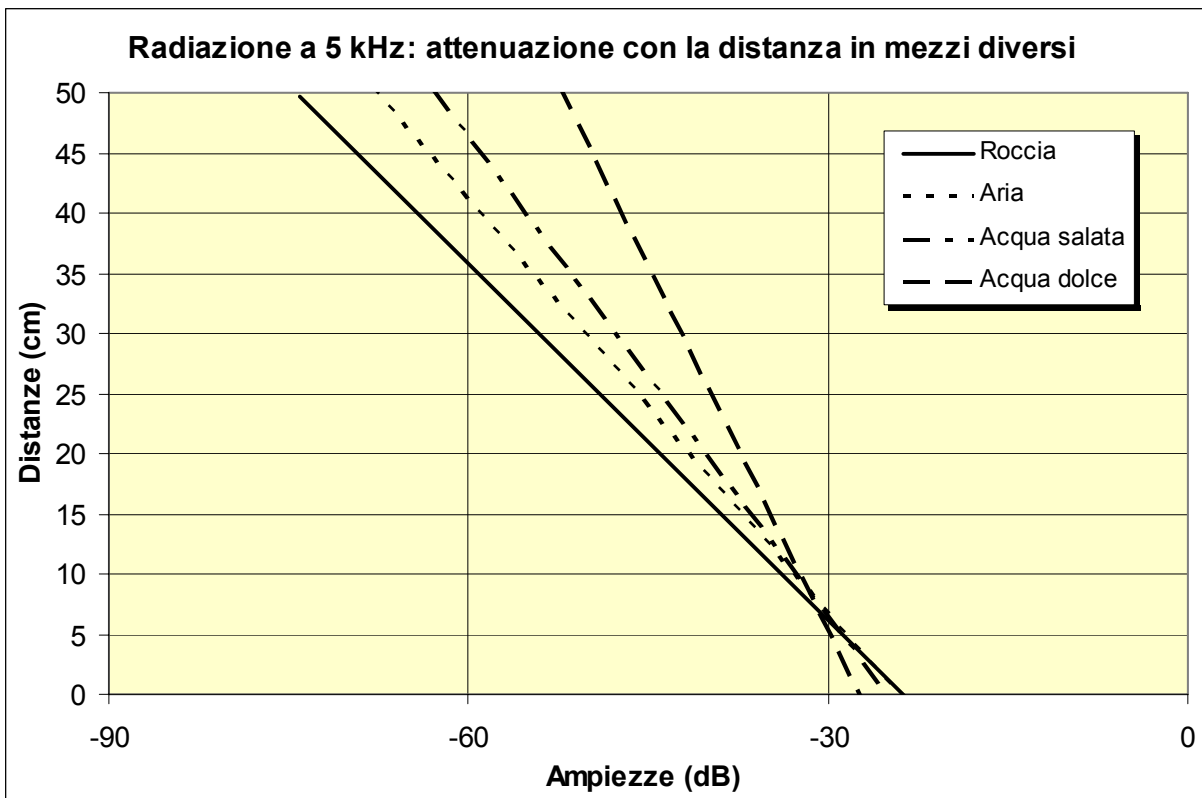
### 3.2.5 Reazione alla saturazione del campione

In tutte le prove eseguite in saturazione si nota una netta riduzione del numero di eventi della sequenza disordinata e dei loro livelli di intensità, mediamente sempre più bassi rispetto a quelli osservabili nelle prove in aria.

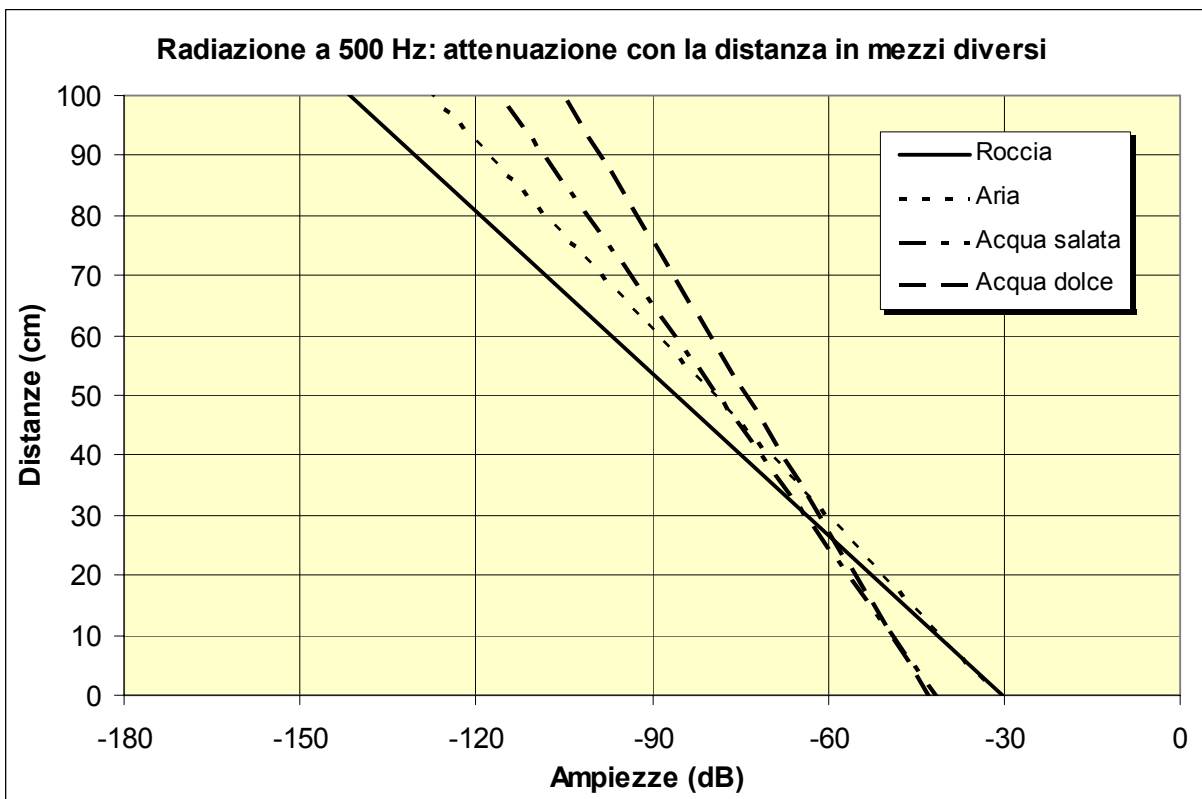
La scarsità di eventi nella SID è comune a tutti gli stili di deformazione e d'altra parte, in base alle osservazioni fatte nel paragrafo precedente, l'entità dell'attenuazione non è giustificabile con il filtraggio dell'acqua.

Si potrebbe supporre, come ci si attendeva, che la presenza di acqua (dolce o salata) abbia potuto influenzare la sorgente del segnale impedendo o limitando l'emissione EM. Nell'acqua salata tuttavia è accaduto un fenomeno imprevisto: tutti gli impulsi mostrano una netta tendenza alla monocromia dello spettro. La SID, pur sfoltita e attenuata nell'intensità, sembra produrre impulsi con la massima energia concentrata intorno alla frequenza di 2 kHz (esempi nelle figure 42 a, b, c). Sempre in base alle osservazioni fatte nel capitolo precedente, questo effetto non può essere attribuito ad un filtraggio dell'acqua. La variabilità del fenomeno sembra inoltre caratterizzare il campione, poiché in ciascuna prova tutti gli impulsi hanno impronta simile.

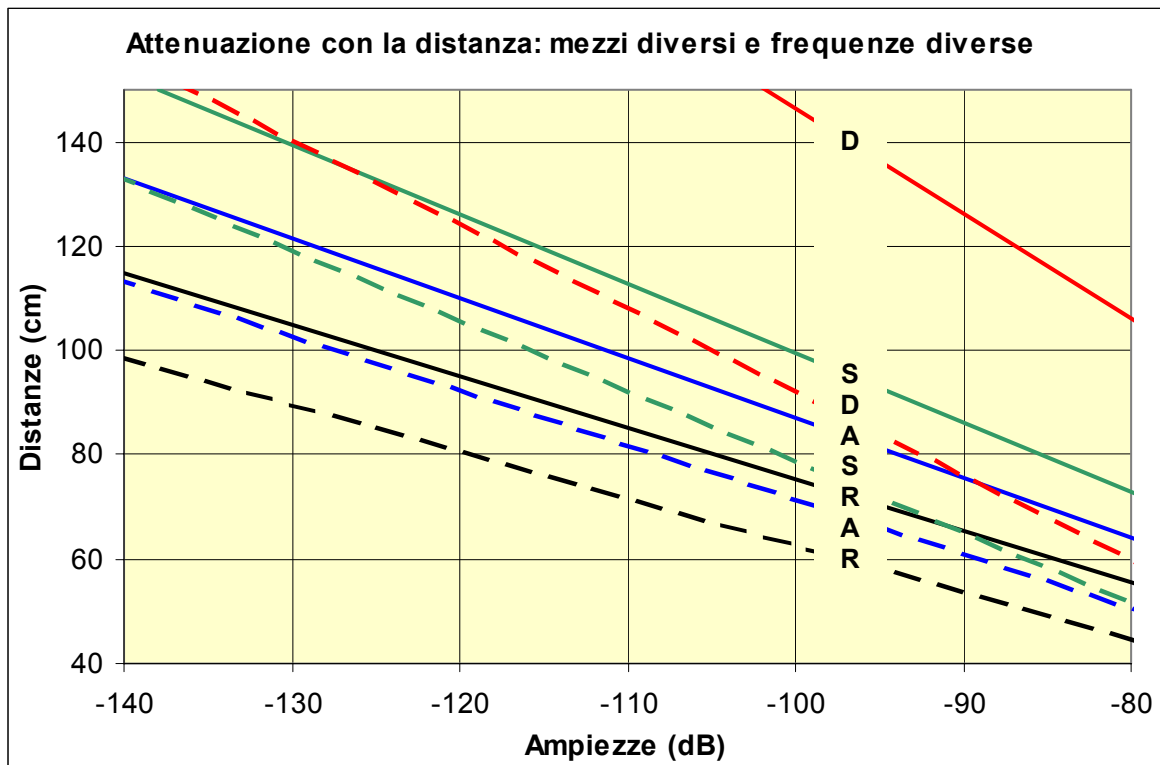
Le emissioni SIO, che si sono potute osservare sia in acqua dolce che in acqua salata (es. fig.43), non mostrano anomalie rispetto alla variabilità del fenomeno manifestato nei campioni in aria (cfr. fig. 34), a parte l'intensità comunque molto bassa. Apparentemente la presenza dell'acqua ha influenzato significativamente soltanto le sequenze impulsive disordinate.



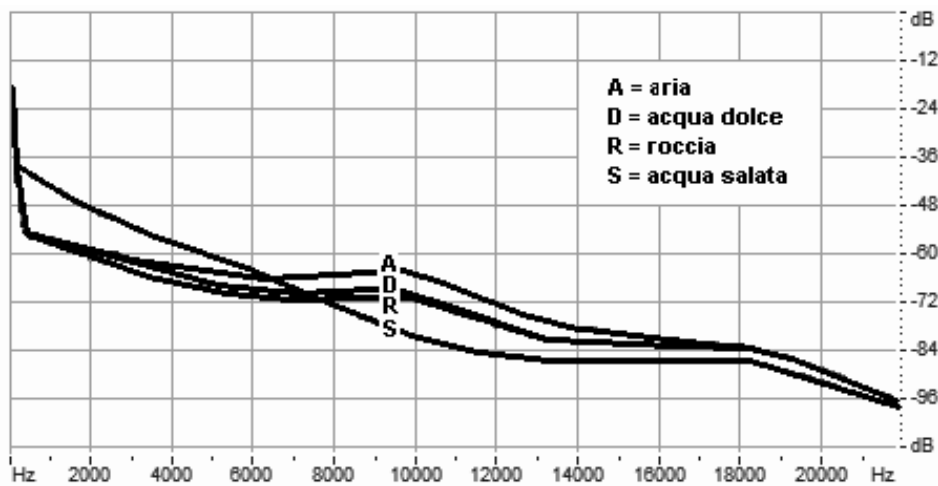
**Fig.39a** - Radiazione a 5000 Hz: calo dell'ampiezza con la distanza nei vari mezzi. L'attenuazione aumenta da destra verso sinistra. A circa 7 cm c'è l'inversione. L'intersezione non avviene in un punto e in basso è l'aria il mezzo più trasmittivo.



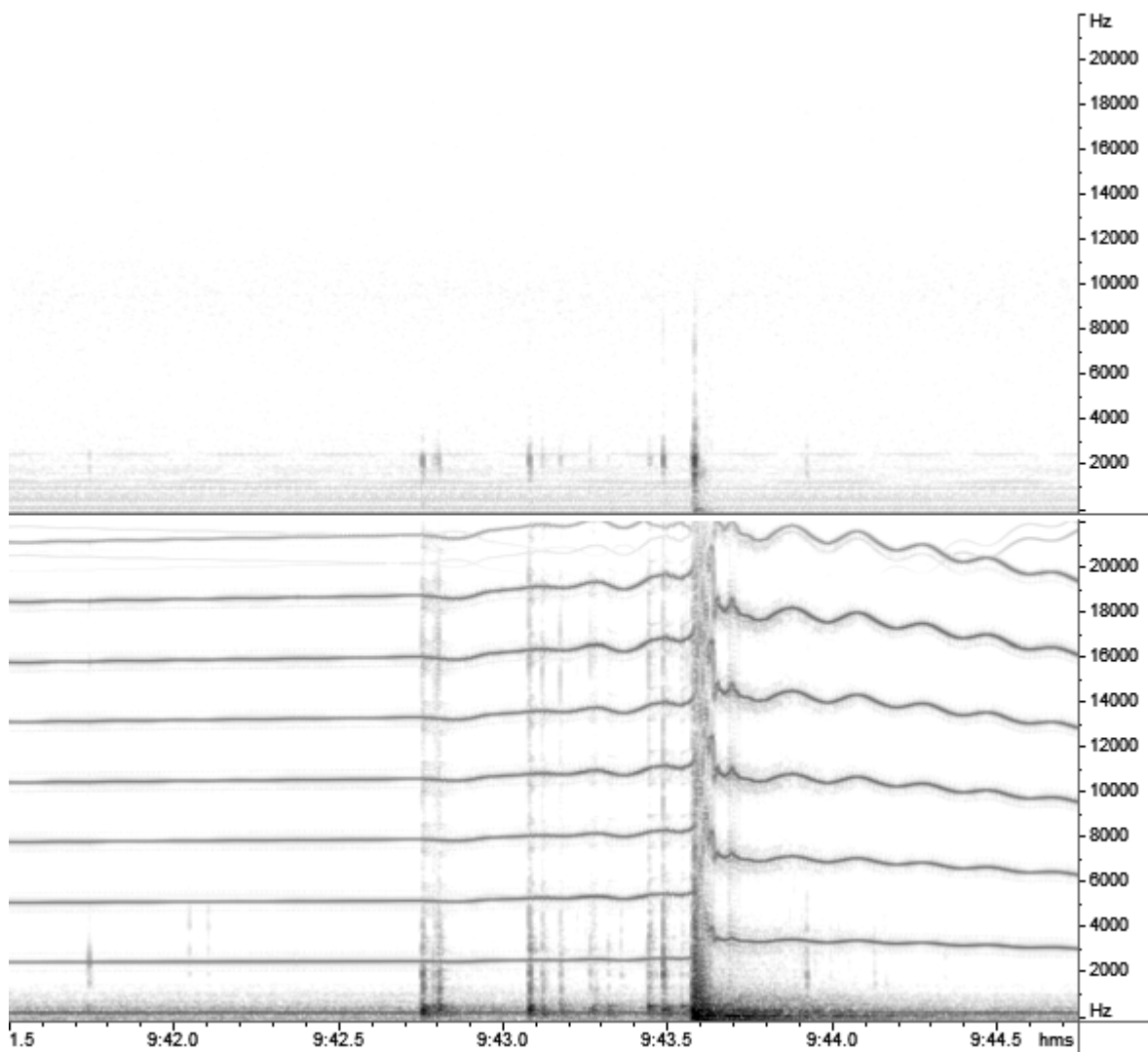
**Fig.39b** - Radiazione a 500 Hz: calo dell'ampiezza con la distanza nei vari mezzi. Si noti che l'andamento è simile ma le scale sono più ampie. La distanza di inversione si è spostata e anche la pendenza delle curve è cambiata.



**Fig.40** - Confronto tra le radiazioni di 5000 Hz (linea continua) e 500 Hz (tratteggio) al di sopra dell'inversione. Nero = roccia (R), blu = aria (A), rosso = acqua dolce (D), verde = acqua salata (S). La traslazione è dovuta in parte al cambiamento del punto di inversione e in parte al cambiamento di pendenza delle rette. L'acqua salata mostra la massima variazione.



**Fig.41** - Confronto tra gli spettri delle armoniche della radiazione a 100 Hz che attraversa i vari materiali per una distanza di 20 cm. Le curve sono condizionate da diversi fattori non compensati (ambiente, risposta strumentale, attenuazione delle armoniche) ma l'andamento è sempre quello di un passabasso in cui l'acqua salata manifesta il massimo scostamento rispetto alle curve degli altri materiali. In particolare alle basse frequenze la massima propagazione si ha in acqua salata per poi cedere il primato all'aria.

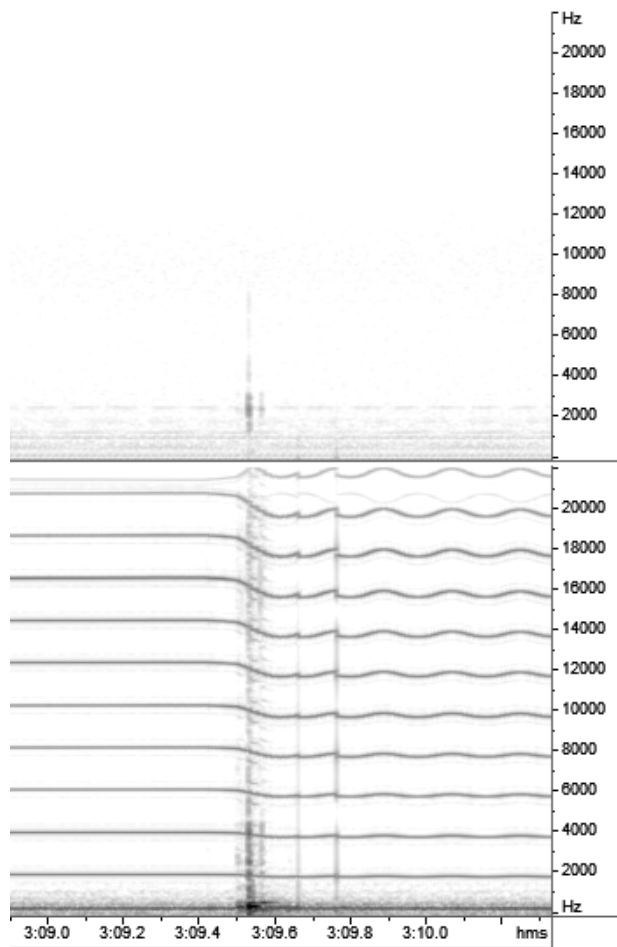
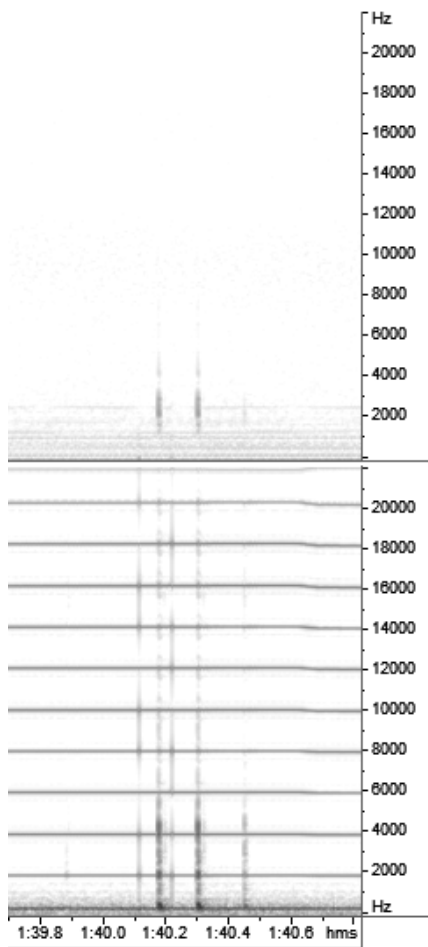
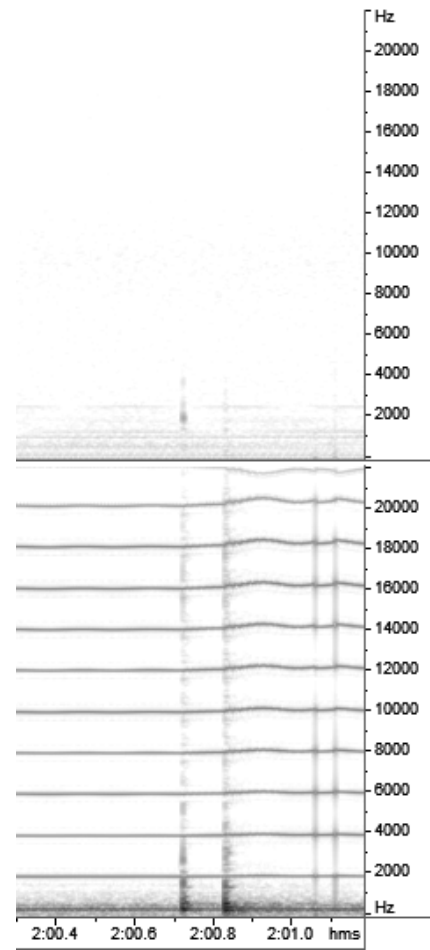
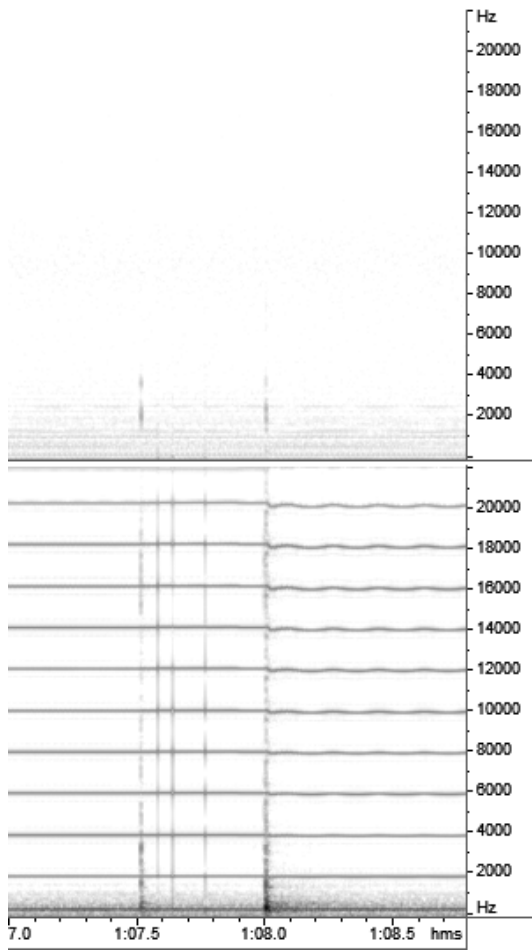


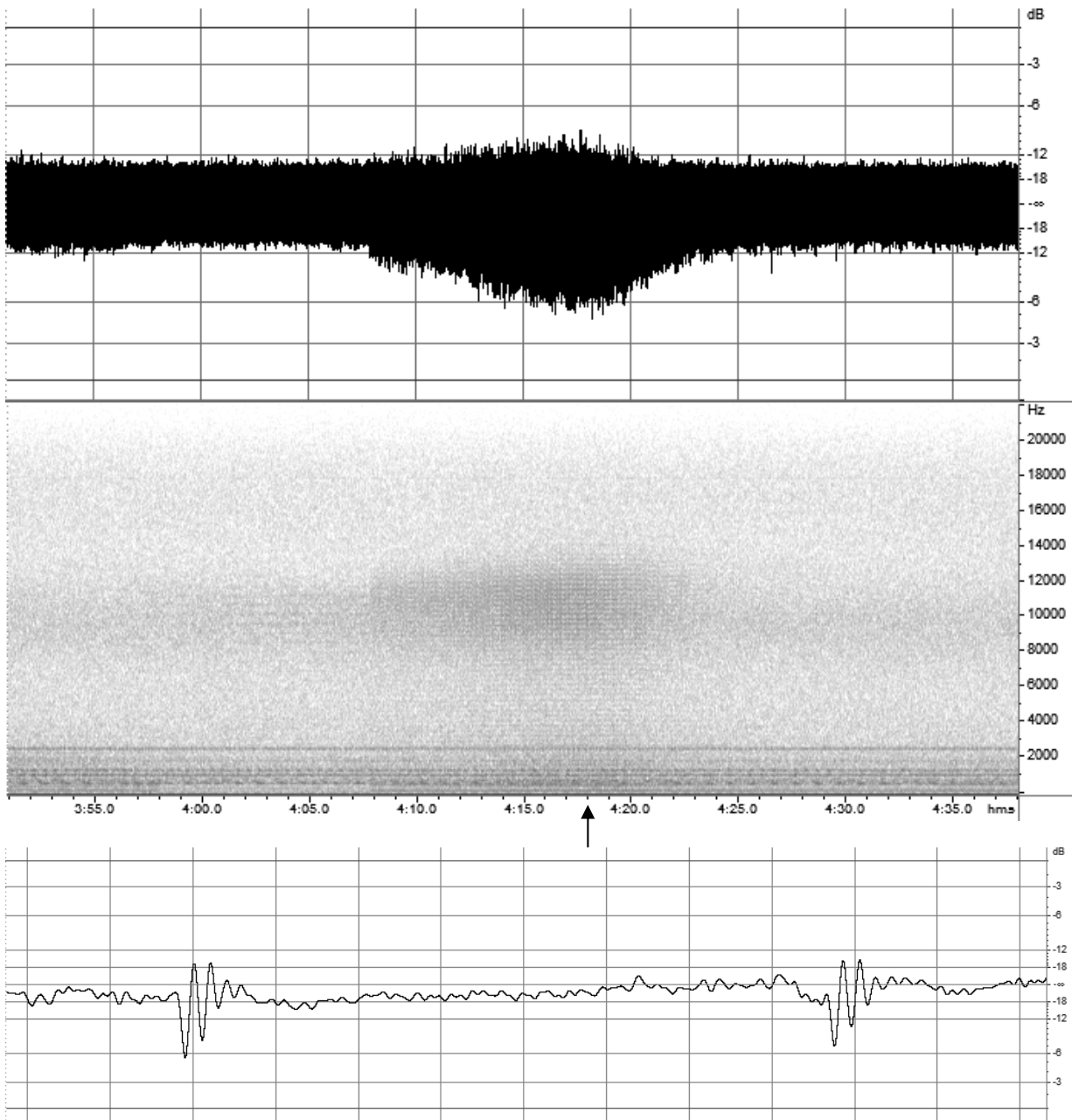
**Fig. 42a** - Sopra: Sequenza Parossistica nel campione di Calcare Massiccio (SCM4) rotto in saturazione d'acqua salata. In alto il segnale VLF e in basso il segnale Monitor. Tempi in min:sec e frequenze in Hz. Sono visibili tutti i segnali che potevano essere associati alla radiazione meccanica ma tutti sono come filtrati da un passabanda a 2,4 kHz.

**Fig. 42b** - Pagina a fianco, in alto: impulsi tratti dalla SID di un campione di Scaglia Variegata (SSC1) rotto in saturazione d'acqua salata. In alto il segnale VLF e in basso il segnale Monitor. Tempi in min:sec e frequenze in Hz. In entrambi gli episodi si osservano impulsi con picco di massima intensità centrato poco al di sotto dei 2 kHz. Tutti gli impulsi sono simili tra loro ma differenti da quelli del campione osservato in fig 42a.

**Fig. 42c** - Pagina a fianco, in basso: episodi tratti dalla SID di un campione di Corniola (SCR1) rotto in saturazione d'acqua salata. In alto il segnale VLF e in basso il segnale Monitor. Tempi in min:sec e frequenze in Hz. Il primo episodio è tratto dalla SID, il secondo è la rottura. L'impronta spettrale è ancora una volta simile tra gli impulsi di questa serie ma diversa dagli altri casi osservati. Questa volta la massima intensità è centrata a 2 kHz ma con una distribuzione più larga.







**Fig.43** - Emissione SIO in un campione di Corniola rotto in saturazione di acqua dolce (SDCR3). In alto e al centro rispettivamente l'oscillogramma lo spettrogramma a confronto. Tempi in secondi, ampiezze in dB e frequenze in Hz. Il segnale è stato amplificato digitalmente di 30 dB per evidenziare la SIO. In basso l'oscillogramma di un intervallo di 5 ms estratto nel punto indicato dalla freccia. La griglia è di 20 samples (0,5 ms) e l'ampiezza ancora in dB.

Si osserva la presenza di un episodio SIO e la somiglianza dei treni con quelli già osservati nelle prove in aria (cfr. fig.34). La frequenza media degli impulsi infatti è di 11025 Hz, il periodo di successione dei treni è di 3,6 ms (frequenza di ripetizione: 278 Hz) e la larghezza di banda del segnale è di circa 3 kHz.

### 3.2.6 Stima dell'ampiezza del segnale alla sorgente

Le misure di intensità in dB eseguite sui segnali artificiali, rapportate all'ampiezza in V della tensione applicata al dipolo sorgente mostrano che, a parità di segnale rilevato, il potenziale alla sorgente dovrà essere tanto maggiore quanto minore sarà la frattura che lo ha generato (tav.11). L'allineamento dei dati per ciascuna lunghezza L del dipolo è di tipo esponenziale. Da questo spunto è stata tratta una equazione per ciascuna curva e lo studio della loro variabilità in funzione di L ha portato alla formulazione empirica di una funzione in grado di "fittare" perfettamente tutti i dati sperimentali:

$$V = 1446,8 e^{-0,0131 L} e^{0,1215 A}$$

dove: V= potenziale alla sorgente  
L = lunghezza radiatore in mm  
A= ampiezza segnale in dB

Esplicitando questa formula nelle sue variabili è possibile ipotizzare l'andamento del fenomeno in condizioni estreme non riproducibili o verificabili sperimentalmente. Si può osservare ad esempio che la traslazione delle rette in funzione di L non segue una funzione lineare ma è ancora esponenziale, cosicché l'ampiezza prevedibile alla sorgente in funzione della sua lunghezza ha andamento asintotico (fig.44a) e non consente di raggiungere gli enormi valori di potenziale che in un primo momento si potevano ipotizzare. Sembrerebbe che al di sotto di 10 mm non si abbiano più variazioni significative. Tuttavia, alla scala reale delle fratture, il potenziale può aver facilmente raggiunto il migliaio di volt, come si vede nell'elaborazione in fig.44b. I potenziali nelle fratture reali (minori di 1 mm) sembrerebbero poter raggiungere valori abbastanza alti da giustificare non solo l'emissione EM ma anche i fenomeni luminosi che spesso vengono associati a terremoti di grande entità o alla tettonica di particolari regioni (catalogo di Galli, 1910 ed oggi valle di Hessdalen in Norvegia).

Tuttavia bisogna ancora considerare che i valori massimi di intensità si registrano alla rottura e nella Sequenza Parossistica, quando presumibilmente le fratture hanno raggiunto una notevole dimensione. La massima estensione possibile nei provini è la diagonale dei parallelepipedi (13÷14 cm). La linea tratteggiata che unisce la minima intensità sulla minima dimensione alla massima intensità sulla dimensione massima simula in prima approssimazione il processo di evoluzione dell'intensità dell'emissione in funzione della fratturazione<sup>29</sup>. Si può osservare che il potenziale massimo raggiungerebbe comunque i 300 V.

Considerando infine che la dimensione delle microfrazture avrà più o meno sempre lo stesso ordine di grandezza e che il potenziale, per lunghezze minori di 1mm, non varia in modo significativo, si potrebbe dedurre che non ci saranno differenze di scala tra i segnali monitorati in laboratorio e quelli naturali, se non per effetto della distanza e del mezzo attraversato. Però in queste osservazioni non si è tenuto conto del numero delle microfrazture e della loro estensione bidimensionale.

---

<sup>29</sup> La curva reale si potrebbe ottenere dallo studio del fenomeno dopo un'accurata classificazione e misurazione di tutti gli impulsi in tutte le prove. Si tratta però di un grande lavoro che richiederebbe un altro ciclo di studi e va oltre le finalità principali di questa ricerca.

### Corrispondenza tra ampiezza del segnale EM (dB) e potenziale alla sorgente (V)

Livello dB misurato	Potenziale (V) su antenna 12 cm	Potenziale (V) su antenna 6,7 cm	Potenziale (V) su antenna 1,5 cm
-35	4,50	-	-
-40	2,00	4,88	-
-45	1,30	2,40	4,10*
-50	0,70	1,52	2,93
-55	0,38	0,80	1,63
-60	0,19	0,45	0,88
-65	-	0,23	0,47
-70	-	-	0,26

\*) potenziale corrispondente alla lettura di 47 dB

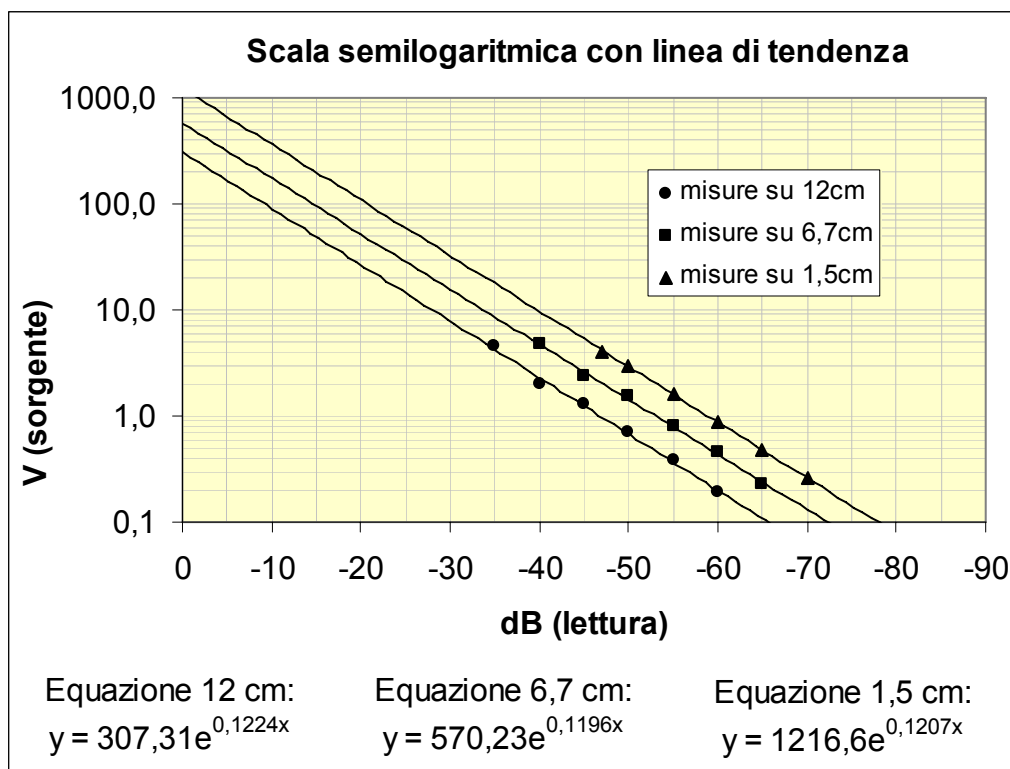
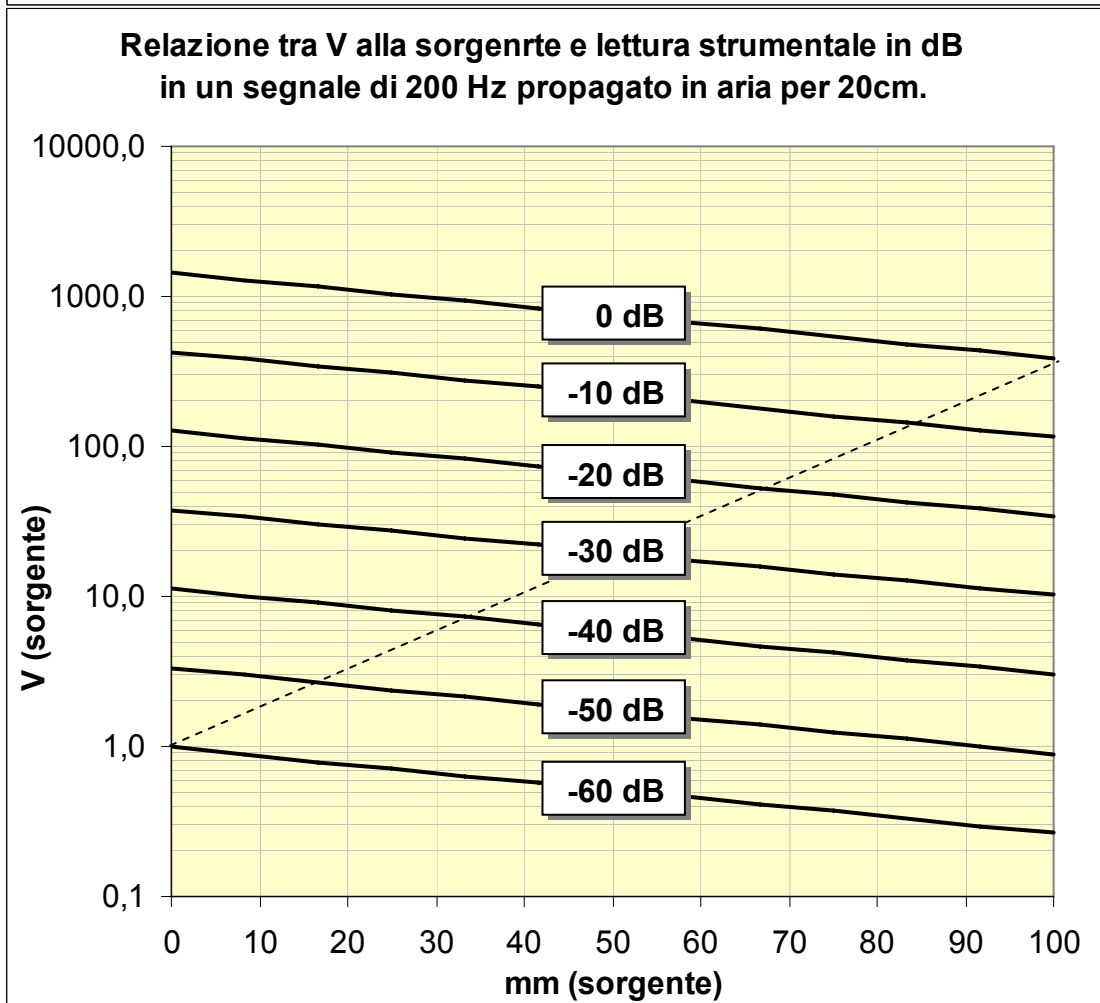
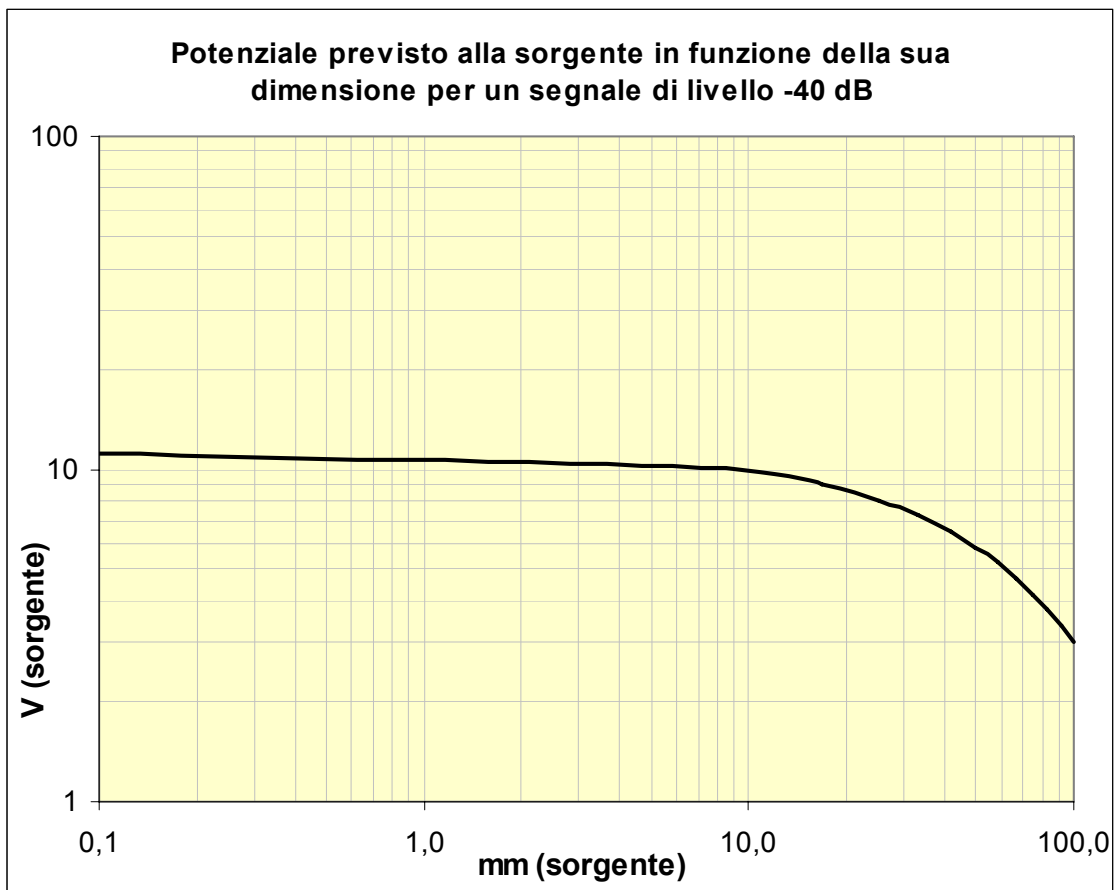


Grafico dei dati sperimentali. L'allineamento è esponenziale e in basso sono riportate le funzioni delle linee di tendenza. Da questa visione sembrerebbe molto facile superare il migliaio di Volt qualora la lunghezza della frattura fosse millimetrica.

**Fig.44 a, b.** - Grafici a destra: corrispondenza tra livello di segnale misurato e potenziale alla sorgente in funzione della dimensione della frattura. Dati teorici ricavati dalla formula empirica costruita in base ai dati sperimentali. In alto (a) l'andamento della curva riferita al livello di -40 dB mostra l'andamento asintotico della relazione tra dimensione e potenziale. In basso (b) un grafico bilogritmico mette a confronto le curve relative a diversi livelli di segnale.



### 3.3 Risultati del monitoraggio in atmosfera

L'inizio operativo del monitoraggio di segnali E-VLF in atmosfera risale all'agosto 2003. Precedentemente erano state attivate le stazioni di Frascati e Cascia per prove di collaudo dei sistemi e con settings spesso diversi da quelli operativi descritti nel paragrafo 2.3. L'attività operativa è stata suddivisa in due fasi successive. Un primo ciclo nel periodo agosto 2003 – settembre 2004 ha consentito di ottenere i primi risultati ed avere il tempo necessario per un'accurata analisi dei dati. Il secondo, dal settembre 2004 alla conclusione della tesi di dottorato (settembre 2005), è servito per raccogliere tutti i dati possibili e non perdere l'occasione di registrare qualche evento significativo prima della conclusione del dottorato di ricerca.

Nella prima fase di rilevamento le tre stazioni hanno funzionato in modo discontinuo evidenziando i limiti operativi del sistema in questa sua primitiva configurazione. La stazione di Frascati, il cui PC era collocato in una soffitta, ha risentito del caldo e nel periodo estivo, quando la temperatura ambientale ha raggiunto i 60°C ha subito danni all'HD con conseguente perdita dei dati. La stazione di Cascia, sita in una stalla a 1500 m di quota, ha sofferto del caldo ed è rimasta operativa ma insensibile per tutto il periodo in cui la temperatura ambientale si è mantenuta sotto lo zero. Proprio nel 2004 nella stessa località è stata registrata la temperatura record annuale di -28°C. La stazione di Cascia infine ha lavorato in modo sporadico. Questo era già previsto per molti motivi, tra cui l'impossibilità di assicurare la continuità dell'utenza elettrica. Per questi motivi non si è ottenuta una continua sovrapposizione dei periodi di operatività, come illustrato dallo schema della fig. 45.

I dati raccolti in questo primo ciclo consistono in tre serie di registrazioni per un totale di circa 10000 spettrogrammi che sono stati visionati uno ad uno, confrontati tra stazioni e confrontati con i dati sismici. I dati sismici sono stati raccolti via Internet da due fonti pubbliche: INGV<sup>30</sup> e IESN<sup>31</sup>.

Il confronto tra dati sismici e dati EM è stato svolto nei due sensi:

- Esame dei dati EM alla ricerca di impronte spettrali compatibili con i fenomeni osservati in laboratorio ed eventuale ricerca sui cataloghi di eventi sismici correlabili
- Selezione sui cataloghi di eventi sismici rilevanti e ricerca tra i dati EM di eventi correlabili.

Per selezionare gli eventi dai cataloghi sismici è stato realizzato un foglio di calcolo (Excel) elaborato per importare entrambi i bollettini ed uniformarne i formati. I dati ottenuti sono stati ulteriormente elaborati per ottenere liste di eventi ordinate di volta in volta secondo i requisiti richiesti (fig.46). Le caratteristiche discriminanti di queste liste sono state la magnitudo e la distanza da ciascuna delle stazioni EM. Trattandosi di radiazione EM, e non conoscendo le modalità di propagazione in ogni caso specifico, le distanze sono state calcolate in linea retta dalla profondità ipocentrale alla quota della stazione ricevente secondo la formula descritta nella tavola 12. Si tratta di una formula approssimativa che ha lo scopo di fornire valori di riferimento sufficientemente precisi da poter fare confronti tra le stazioni.

---

<sup>30</sup> Bollettino sismico INGV: <http://www.ingv.it/~roma/reti/rms/bollettino/boll.htm>

<sup>31</sup> Bollettino sismico IESN: <http://www.iesn.org/boll/quake.txt>



### Calcolo della distanza tra ipocentro e stazione date le coordinate geografiche e le quote rispetto al livello del mare:

Distanza angolare tra due punti della superficie terrestre:

$$\cos D = (\sin a) (\sin b) + (\cos a) (\cos b) (\cos P)$$

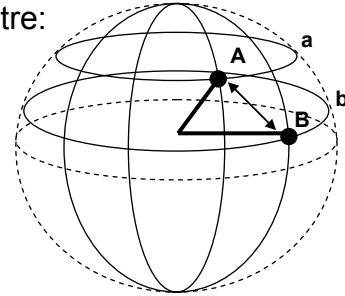
dove:

D = distanza angolare tra A e B

a = latitudine del punto A

b = latitudine del punto B

P = differenza di longitudine tra A e B



quindi la distanza chilometrica in pianta tra Epicentro e Stazione sarà circa:

$$D = \arccos [ (\sin E) (\sin S) + (\cos E) (\cos S) (\cos P) ] * 111$$

con:

D = distanza in km tra Ipocentro e Stazione

E = latitudine epicentro

S = latitudine stazione

P = differenza di longitudine tra Epicentro e Stazione

Nota: 111 km è la lunghezza media per grado lungo i meridiani e la lunghezza per grado lungo il circolo equatoriale.

### Correzione per le quote:

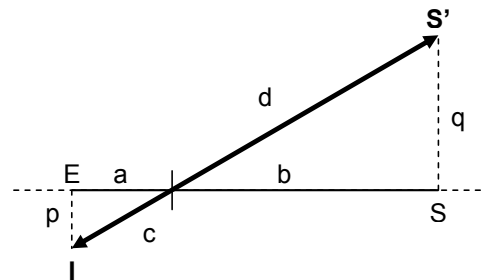
ES = distanza in pianta tra Epicentro e Stazione

IS' = distanza tra ipocentro e stazione

p = profondità dell' ipocentro

q = quota della stazione

si avrà:  $\underline{IS'} = \sqrt{(p+q)^2 + (ES)^2}$



### Formula definitiva:

$$D = \sqrt{[p+(q/1000)]^2 + (\arccos [ (\sin E) (\sin S) + (\cos E) (\cos S) (\cos P) ] * 111)^2}$$

D = distanza tra Ipocentro e Stazione [ km ]

p = profondità ipocentro [ km ]

q = quota stazione [ m ]

E = latitudine epicentro

S = latitudine stazione

P = differenza di longitudine tra Epicentro e Stazione

### Formulazione per Excel:

$$= \text{RADQ}(\text{POTENZA}(p+(q/1000);2)+\text{POTENZA}(\text{ARCCOS}(\text{SEN}(E)*\text{SEN}(S)+\text{COS}(E)*\text{COS}(S)*\text{COS}(\text{SE}(\text{Le}>\text{Ls};\text{Le}-\text{Ls};\text{Ls}-\text{Le})))^2*111;2))$$

dove, rispetto alla legenda precedente, al posto di P sono state introdotte:

Le = longitudine epicentro

Ls = longitudine stazione



### 3.3.1 Esempi di fenomeni VLF non sismici

Prima di iniziare la ricerca dei segnali di presunta origine sismica occorre conoscere il panorama della fenomenologia VLF rilevabile in atmosfera. Questo studio deriva da una lunga esperienza di monitoraggio dei segnali VLF iniziata in modo amatoriale prima ancora che diventasse il tema della tesi di laurea. E' quindi già nota una ricca casistica di impronte spettrali caratteristiche delle quali molte sono univocamente attribuibili a sorgenti note. In generale possiamo distinguere due grandi gruppi: fenomeni naturali energetici di origine atmosferica e fenomeni artificiali legati ad "utilizzatori" della rete elettrica. L'analisi spettrale è lo strumento utilizzato per la discriminazione e l'esperienza rende il lavoro più facile.

Poiché spesso mi è stato chiesto se sia possibile rilevare anche segnali estranei, e la semplice risposta affermativa è bastata a sollevare dubbi sull'efficacia del metodo EM, intendo qui riportare brevemente un piccolo elenco di ciò che si incontra nella banda radioacustica, ricordando che ciò che si conosce non può essere d'intralcio all'analisi.

La "radiazione di fondo" EM in ambiente urbano è costituita dallo spettro delle armoniche del segnale a 50 Hz emesso dalla corrente alternata della rete elettrica. La fig.47 ne mostra l'impronta e al contempo illustra il modo in cui si leggono gli spettrogrammi delle stazioni automatiche nella configurazione operativa. Si noti che in questo caso la scala delle frequenze è capovolta rispetto agli spettrogrammi del laboratorio e la larghezza di banda è stata limitata (solo graficamente) a 10 kHz.

In campagna oltre al rumore della rete elettrica (HUM) del vicino centro abitato è possibile rilevare emissioni di cromia spesso anche variegata ma che si ripetono ciclicamente in modo quasi identico (fig.49). Si tratta di disturbi industriali associati quasi sempre a motori elettrici.

In aperta campagna il rumore di fondo è caratterizzato dall'elettricità statica atmosferica "Spherics", da eventi più sporadici come le scariche dei fulmini (righe verticali) e gli "Hooks" di origine ionosferica (dalla caratteristica impronta ad uncino) ed infine eventi più rari come i famosissimi "Whistlers" (dalla caratteristica traccia parabolica). Non di rado nelle frequenze più alte è possibile leggere delle tracce monocromatiche discontinue con ritmo regolare prodotte dalla trasmissione delle stazioni radio VLF (es. stazioni Alpha). La fig.48 mostra dei *whistlers* registrati eccezionalmente<sup>32</sup> in Italia, sulle alpi Apuane, con un prototipo portatile (Gaia 2k2) del ricevitore usato in questa ricerca.

In un luogo idoneo, e con i parametri di acquisizione descritti nel paragrafo 2.3, lo spettrogramma deve apparire quasi pulito. La figura 50 mostra il panorama spettrale tipico dell'aperta campagna all'approssimarsi di un temporale e lo spettrogramma che si ottiene nelle stesse condizioni ambientali dopo aver commutato via software nella modalità di acquisizione operativa delle stazioni automatiche.

---

<sup>32</sup> Solitamente questi fenomeni si manifestano ad alte latitudini, tipicamente oltre il circolo polare artico. Si tratta di echi della radiazione EM dei fulmini che rimbalza da un polo all'altro lungo il meridiano, seguendo le linee di forza del campo magnetico terrestre.

**Fig.47 - Spettrogramma elaborato dalle stazioni automatiche.**

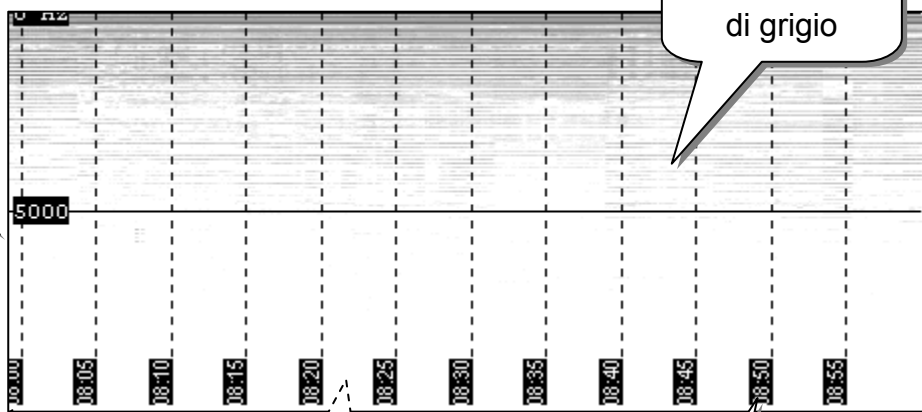
Risoluzione in frequenza: 0,7 Hz  
 Risoluzione nei tempi: 8 sec

Stazione di **Norcia**  
 Giorno **01 ott 2003**  
 Salvato alle ore **09:00 UTC**

NOR031001UTC0900.bmp

**Frequenza:**  
 banda  
 0-10'000 Hz

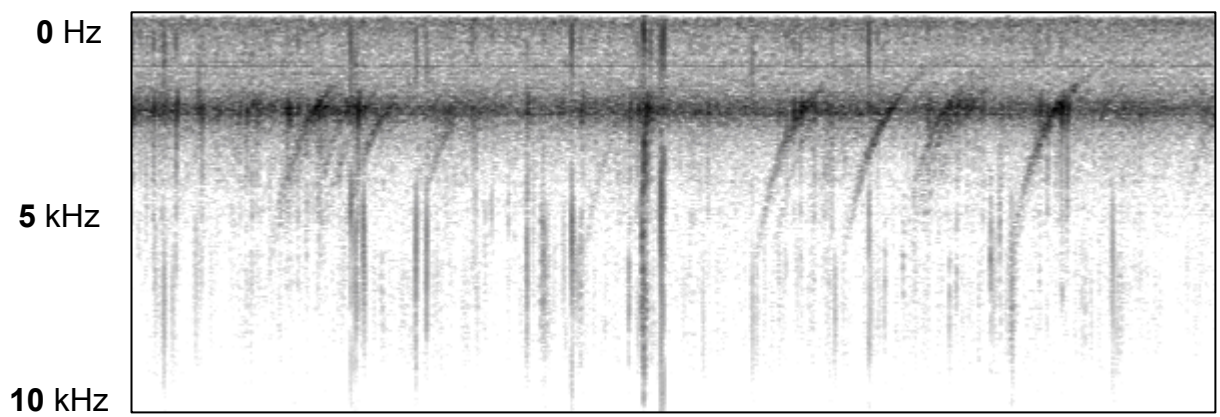
**Intensità:**  
 256 livelli  
 di grigio



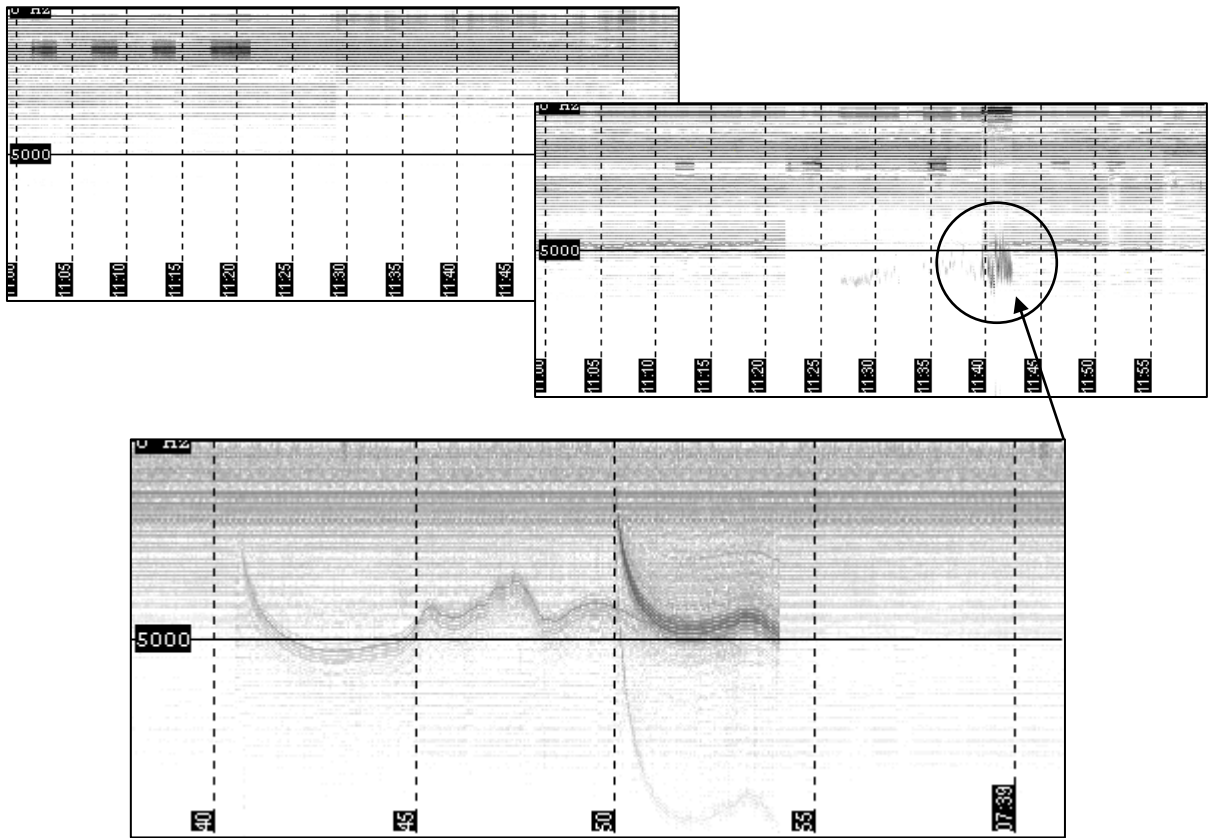
Finestra di 1 ora  
 con 2 minuti di  
 sovrapposizione

Tempo  
 marcato ogni  
 5 minuti

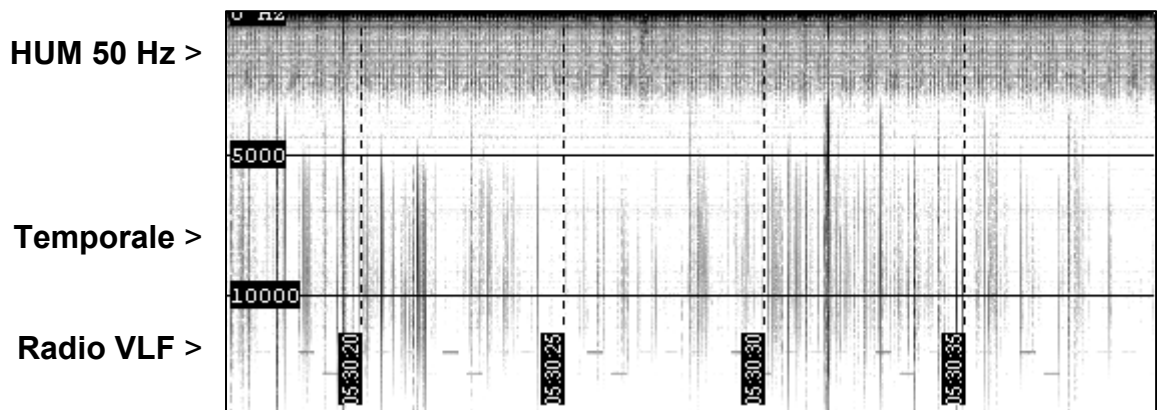
**Tempo:**  
 ora UTC



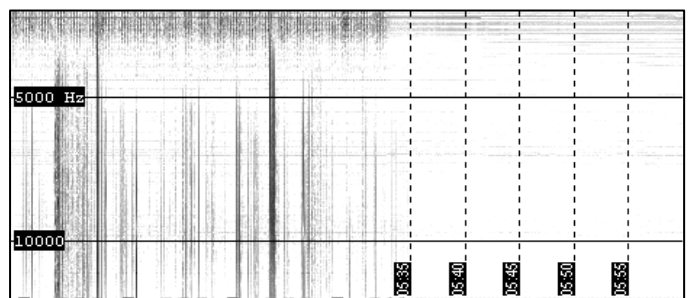
**Fig.48 - Whistlers registrati sulle Alpi Apuane. La registrazione non è perfetta perché fatta con un magnetofono tascabile (la banda bruna a circa 2 kHz è un disturbo causato dal registratore stesso). Le tracce curve sono whistlers, le due righe verticali al centro sono fulmini.**



**Fig.49** - Esempi vari di segnali artificiali in ambiente urbano. In alto due spettrogrammi con forti disturbi industriali. Nel secondo è indicata l'impronta di un'elettropompa. In basso un diagramma a più alta risoluzione nel tempo evidenzia l'impronta tipica di un motore elettrico che raggiunge il regime di lavoro.



**Fig.50** - Rumore di fondo e modalità operativa. Il grafico in alto mostra i fenomeni più consueti che si osservano dalle stazioni automatiche. La banda è stata estesa a 15 kHz per evidenziare le stazioni radio VLF. Nel grafico a fianco si può notare che passando al setting operativo (dalla freccia) scompare gran parte di questo rumore di fondo.



↑ Modalità operativa

### 3.3.2 Segnali radioacustici associabili a fenomeni sismici

La ricerca diretta dei segnali di possibile natura sismica nelle registrazioni EM si basa sulla discriminazione dei modelli osservati in laboratorio e sulle impronte spettrali di origine sconosciuta. Gli eventi sospetti devono poi trovare un riscontro nei dati sismici. Viceversa gli eventi di maggiore rilevanza selezionati dai cataloghi sismici sono stati confrontati cronologicamente con le registrazioni EM. In entrambi i sensi sono emersi soltanto tre eventi e i medesimi eventi. Inoltre si tratta in entrambi i casi di impronte compatibili con il modello SIO riscontrato in laboratorio.

La tav.13a riporta le liste degli eventi più significativi della prima fase di monitoraggio. Sono stati marcati gli eventi correlabili con i dati EM e ricordiamo che le distanze, indicate solo per le stazioni attive, sono solo indicative perché calcolate in modo approssimato. Si può osservare che nel 2003 l'evento rilevato è il primo della lista, cioè il sisma di maggiore intensità. La distanza è minore di quella dell'unico sisma di intensità paragonabile e poco diversa dalle altre. Il grafico della fig.51, ottenuto dai dati elaborati nel foglio di calcolo, mostra il confronto globale tra gli eventi sismici in ragione della magnitudo e delle distanze dalle rispettive stazioni. L'evento del 14 set si distingue nettamente dalla massa e, presumendo una parità di condizioni di ascolto, si direbbe che la magnitudo abbia influito più della distanza sul successo del suo monitoraggio. Era comunque l'evento che più ragionevolmente poteva essere rilevato. Tuttavia è stato registrato dalla stazione di Cascia (AVE) e non da quella di Frascati (FRA), almeno non con la stessa evidenza<sup>33</sup>. Norcia (CAST) invece non era ancora attiva. Nel primo ciclo del 2004 invece l'unico evento è stato registrato dalla stazione di Frascati. Non si tratta dell'episodio di maggiore intensità, né del più prossimo alle stazioni. E' stato rilevato soltanto a Frascati perché in quel periodo le altre stazioni non erano attive.

Il sisma del 14 settembre 2003 è correlato all'evento EM del 10 settembre (fig.52a) iniziato alle 12:05 UTC circa, con 106 ore (4,4 gg) di anticipo sul terremoto.

Il sisma del 3 marzo 2004 è correlato all'evento EM del 1 marzo (fig.52b) iniziato alle 07:57 UTC circa, con 62 ore (2,6 gg) di anticipo sul terremoto.

Il secondo ciclo di acquisizione (sett. 2004 – sett. 2005) per ovvi motivi di tempo<sup>34</sup> non si è potuto elaborare nel modo metodico e puntuale del precedente. Tuttavia il rapido esame degli spettrogrammi (anche questa volta circa 10000) ha evidenziato un solo segnale compatibile con il modello atteso (ancora di tipo SIO), peraltro già individuato visivamente sul monitor della stazione di Cascia a meno di un'ora dalla sua comparsa. Anche questo episodio ha avuto riscontro in un terremoto di rilevante magnitudo manifestatosi a pochi giorni di distanza: il sisma del 22 agosto 2005 (epicentro a largo di Anzio) associato all'evento EM del 18 agosto (fig.52c) iniziato alle 18:42 UTC, con un anticipo di 89 ore (3,7 gg). In questa circostanza la stazione di Norcia (CAST) era disattivata per manutenzione, la stazione di Cascia (AVE) ha registrato il segnale e la stazione di Frascati (FRA), pur attiva e più vicina all'epicentro, non ha osservato il segnale. Il precursore ha avuto brevissima durata (circa 2 minuti) e si è manifestato in una banda ampia circa 3 kHz centrata questa volta su frequenze più alte dei precedenti ma pur sempre compatibili con il modello di laboratorio.

---

<sup>33</sup> Ci sono sospetti sulla presenza del segnale nei dati di Frascati, ma la mancanza di un'evidenza paragonabile a quella della stazione di Cascia e la presenza di disturbi che avrebbero potuto causare fraintendimenti ha posto un ragionevole dubbio sull'interpretazione che, a mio avviso, non può costituire una prova scientifica.

<sup>34</sup> Ricordiamo che il periodo di autonomia delle stazioni automatiche, e quindi il periodo di ricorrenza per la manutenzione e lo scaricamento dei dati, è circa semestrale.

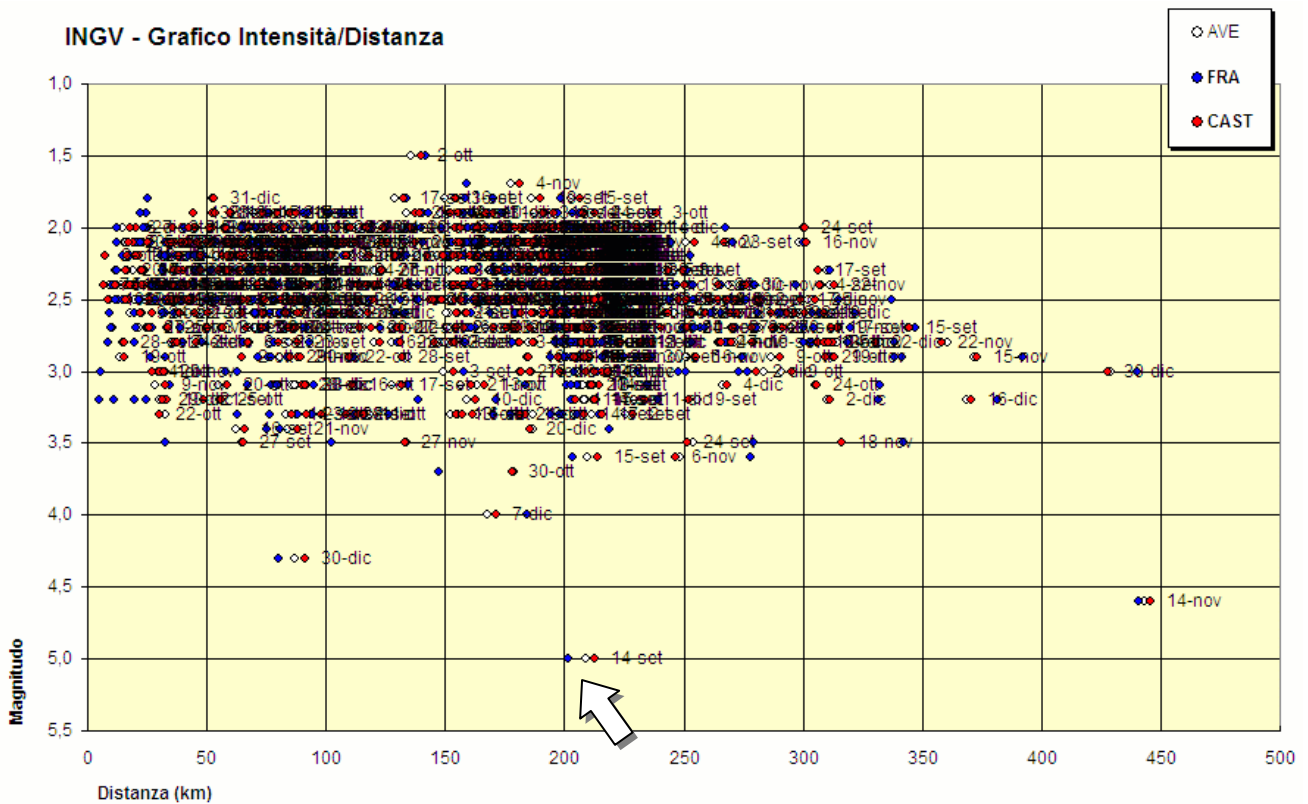
**Catalogo INGV 2003 ordinato per Mg decrescente  $\geq 4.0$**   
dal 1 set al 31 dic 2003

#	Data	Ora	Mag	Epicentro	Distanze (km)		
					FRA	AVE	CAST
	14-set	21.42	5,0	Appennino bolognese	201,7	<u>208,8</u>	-
	14-nov	00.21	4,6	Costa campana meridionale	440,8	-	-
	30-dic	05.31	4,3	Monti dei Frentani	079,9	-	091,0
	7-dic	10.20	4,0	Zona Forli'	184,4	-	-

**Catalogo INGV 2004 ordinato per Mg decrescente  $\geq 4.0$**   
dal 1 gen al 20 set

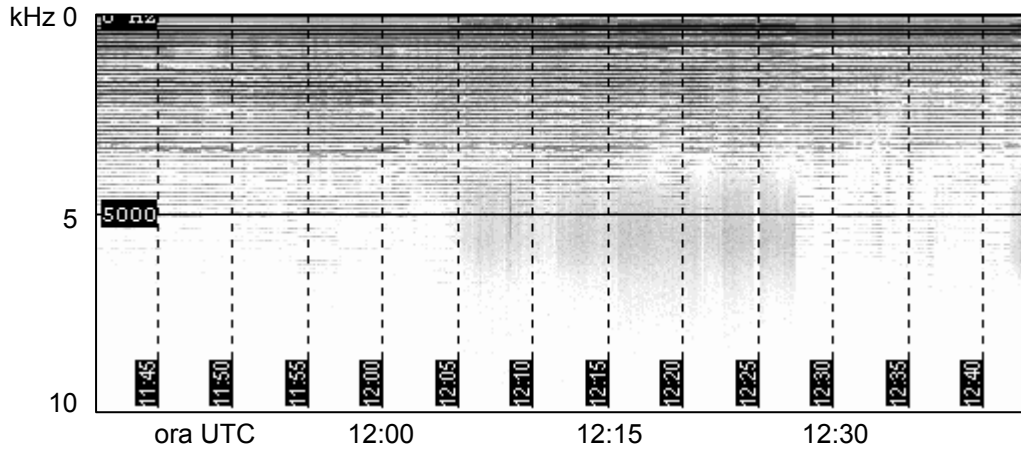
#	Data	Ora	Mag	Epicentro	Distanze (km)		
					FRA	AVE	CAST
	5-mag	13.39	5,3	Isole Lipari	361,3	-	354,6
	12-lug	13.04	5,2	Alpi Giulie	-	293,0	296,1
	3-mar	21.32	4,6	Costa calabra occidentale	<u>277,4</u>	-	-
	14-set	18.09	4,4	ISTRIA	-	298,5	296,3
	3-set	17.02	4,1	Appennino Lucano	-	153,3	155,8

INGV - Grafico Intensità/Distanza



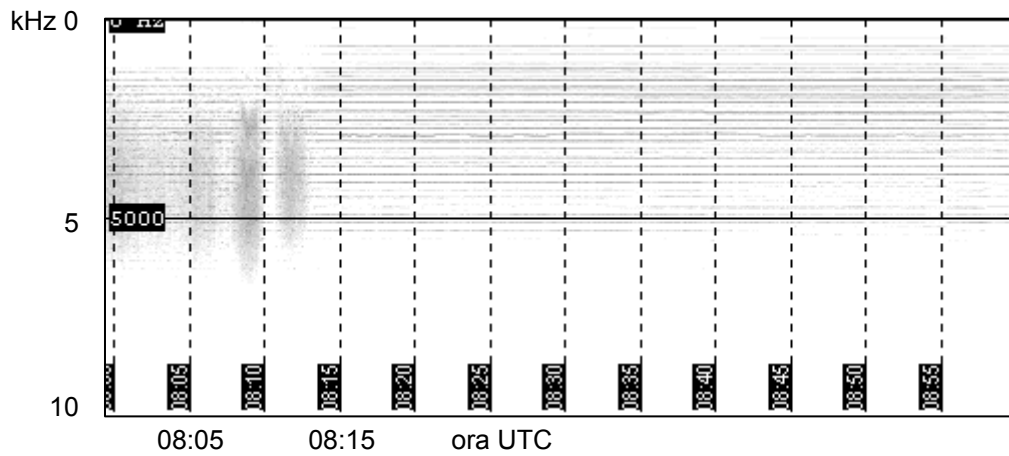
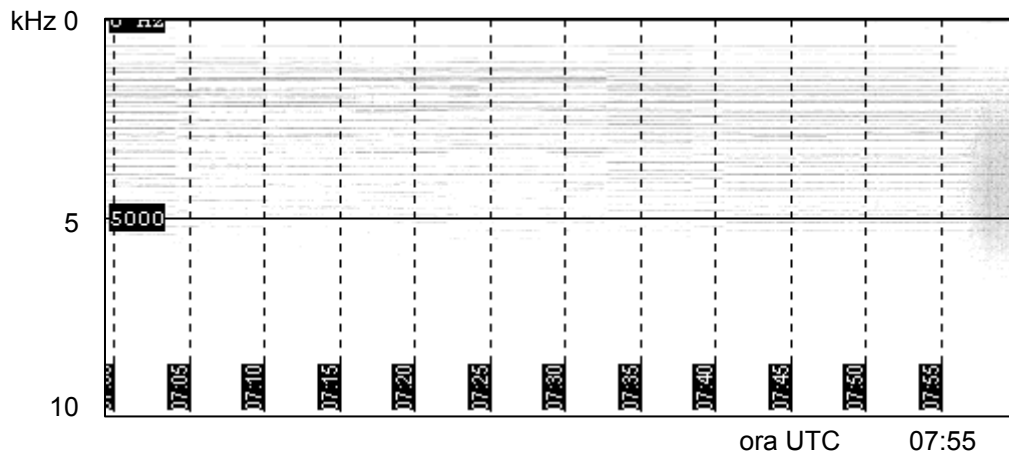
**Fig.51** – Distribuzione dei dati INGV 2003 (1set ÷ 31 dic) in ragione dell'intensità degli eventi e della distanza dalle stazioni VLF. Il sisma del 14 set, associato al precursore EM, è indicato dalla freccia.

AVE 10 set 2003

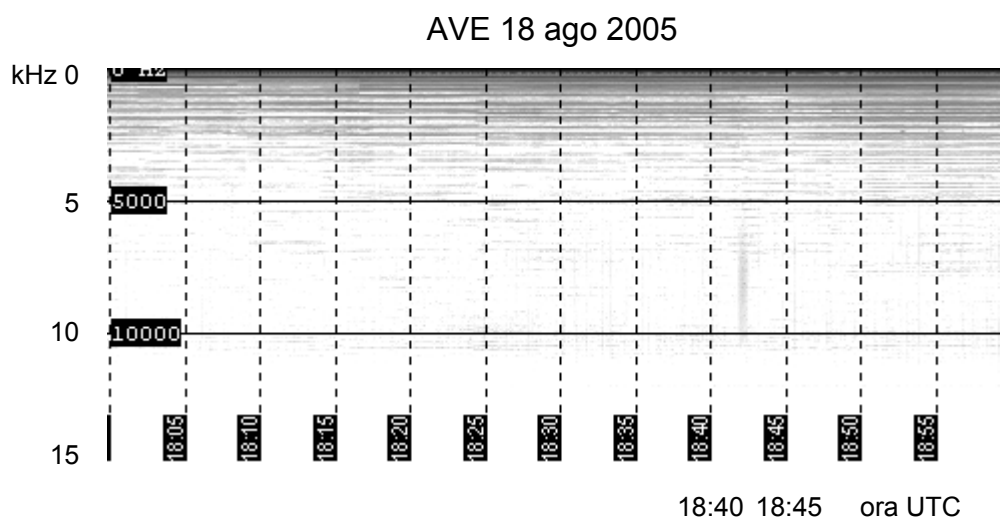


**Fig.52a** - Segnale associato al sisma del 14 settembre 2003 (Appennino Bolognese) rilevato dalla stazione di Cascia con circa 106 ore di anticipo.

FRA 01 mar 2004



**Fig.52b** - Segnale associato al sisma del 3 marzo 2003 (costa calabra occidentale) rilevato dalla stazione di Frascati con circa 62 ore di anticipo.

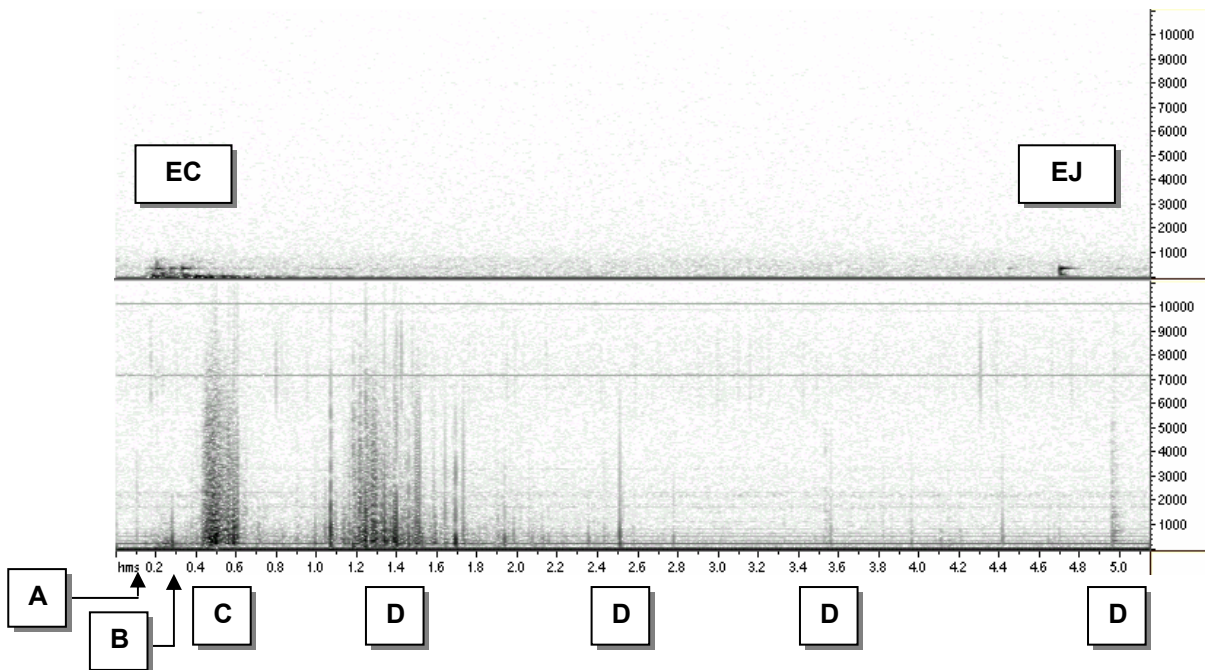


**Fig.52c** - Segnale associato al sisma del 22 agosto 2005 (mare a largo di Anzio) rilevato dalla stazione di Cascia con circa 89 ore di anticipo.

### 3.3.3 Confronto tra il segnale atmosferico e alcuni modelli noti

Tra i segnali captati “in atmosfera”, ovvero segnali irradiati in campo aperto da processi “in situ”, si possono esaminare in questo ambito anche quelli che furono registrati in una cava di calcare massiccio durante gli studi per la tesi di laurea (Nardi, 2001; Nardi e Caputo, 2003a, 2003b). La sorgente del segnale era in quel caso il processo di assestamento di un versante roccioso a seguito del crollo del fronte della cava. La parete rocciosa veniva abbattuta con il brillamento di una volata di mine inserite in una serie di pozzi allineati parallelamente alla scarpata. La figura 53a mostra la dinamica degli eventi associabili alla sequenza EM registrata in ciascuna delle 9 prove eseguite in cava. Anche in quel caso si trattò di emissioni impulsive organizzate in sequenze tipiche (fig. 53b) i cui episodi principali erano stati associati alla distensione del nuovo fronte di cava (microfratturazione) e al suo successivo assestamento (macrofratturazione) a seguito della improvvisa mancanza della pressione di confinamento esercitata dal peso del fronte abbattuto. Anche in quel caso alla microfratturazione era associata una serie pressoché equidistanziata di impulsi quasi identici tra loro (di tipo SIO), mentre la fratturazione d’assestamento era associata ad una serie irregolare di impulsi di differente periodo e forma d’onda (tipo SID). Va sottolineato il fatto che in questa esperienza, al contrario delle prove in laboratorio, lo sforzo subito dalla massa lapidea era di tipo distensivo.

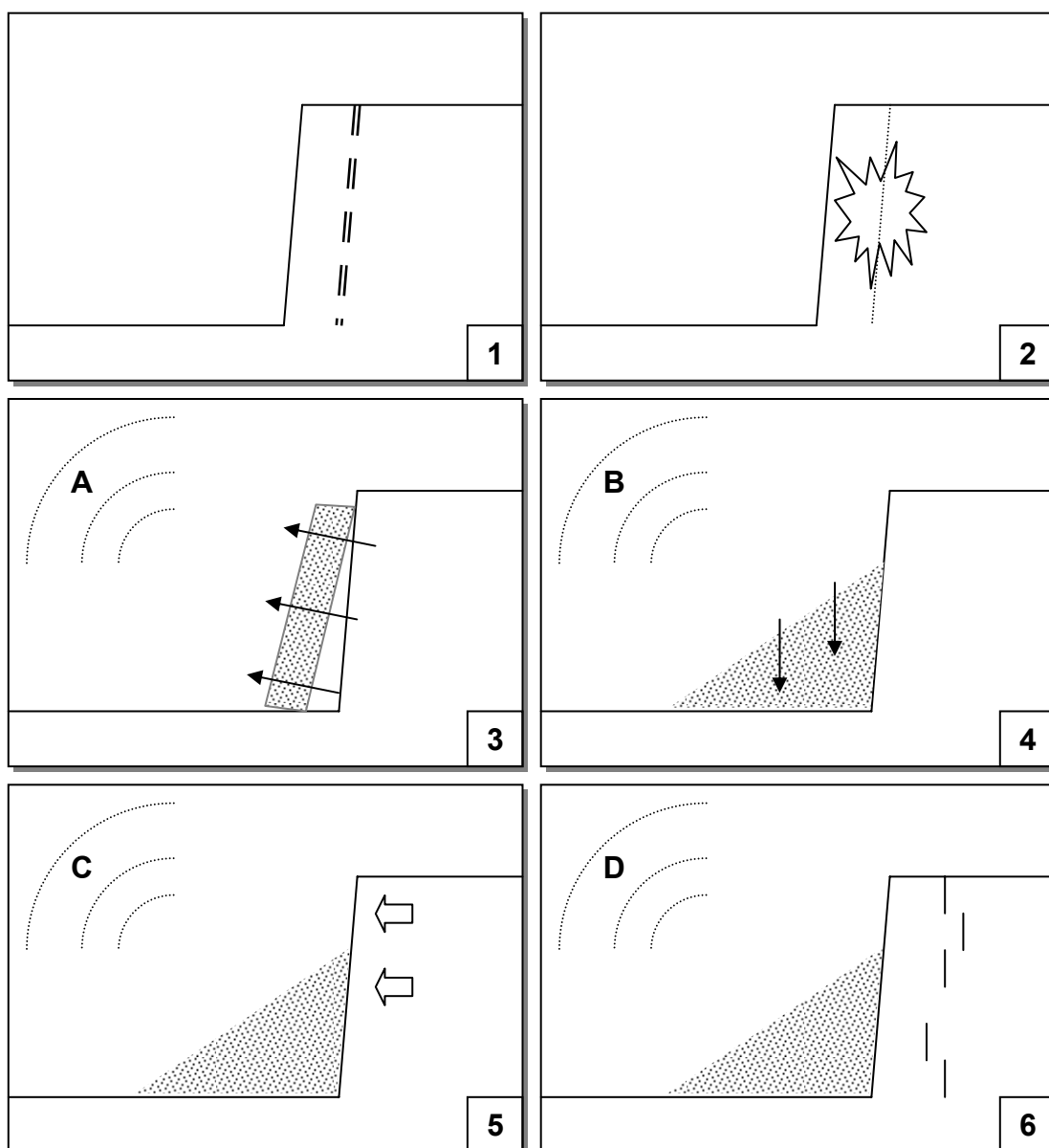
Un altro importante fenomeno osservato in cava è stata un’emissione “anomala”, ed osservata in una sola occasione, che seguì di pochi secondi l’abbattimento di un fronte confinato su ambo i lati e posizionato sul fondo della cava<sup>35</sup>. In quel caso l’esplosione fu parzialmente assorbita dalle pareti circostanti e soltanto in quel caso fu avvertita una scossa-boato nel vicino centro urbano. Immediatamente dopo la classica sequenza EM fu registrato l’episodio della fig.53c, che esalta tutte le caratteristiche oggi attribuite al modello SIO.



**Fig.53a** – Emissione EM associata all’abbattimento di un fronte di cava. In alto il segnale di pressione nell’aria; in basso il segnale VLF. Le lettere indicano gli episodi di emissione associati agli eventi descritti nella figura 53b.

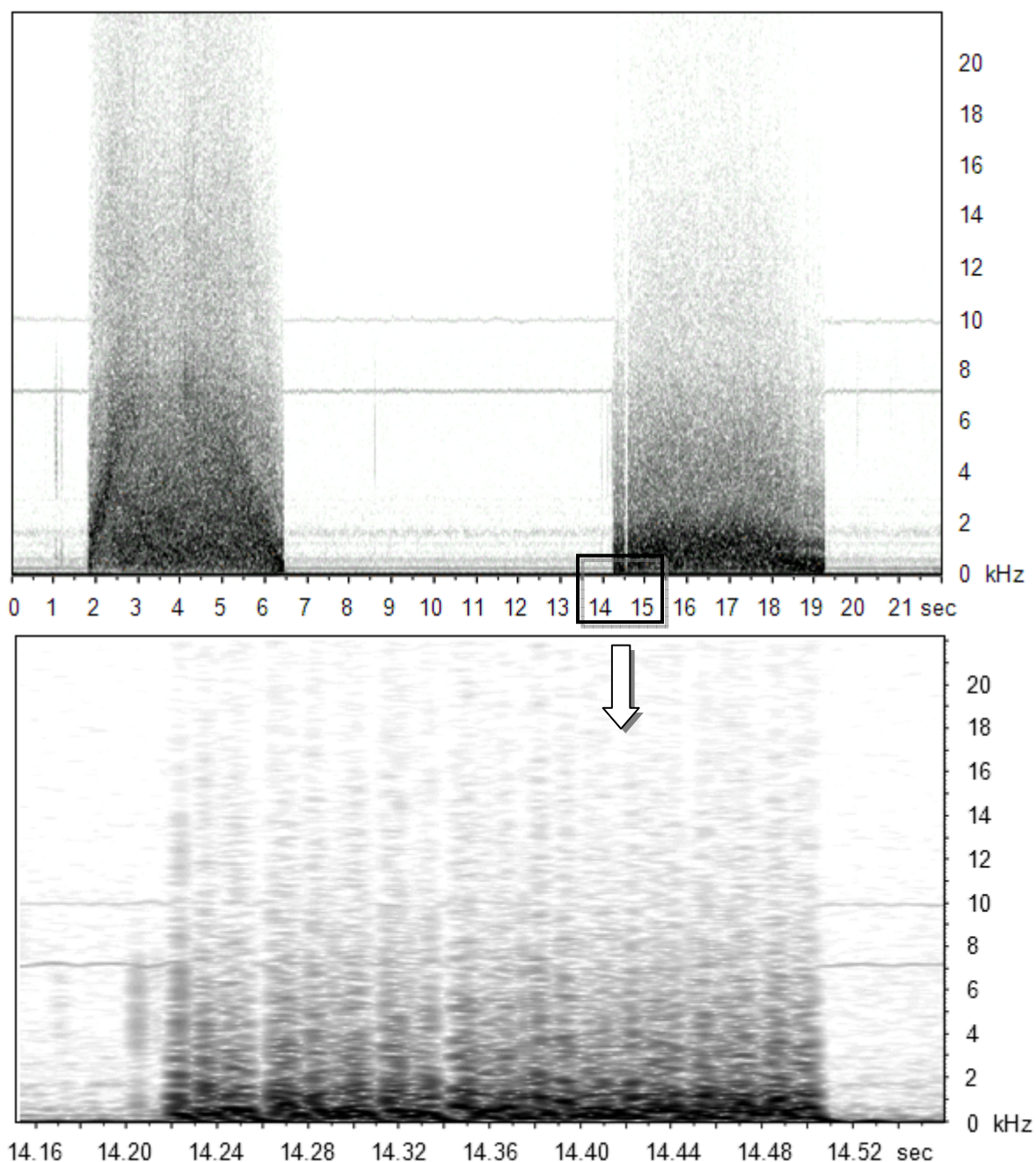
<sup>35</sup> La morfologia a gradoni della cava costituiva una sorta di imbuto al cui vertice si trovava il sito in questione.





**Fig.53b** - Dinamica degli eventi nell'abbattimento di un fronte di cava ed emissioni EM associate:

- 1) Disposizione dell'esplosivo in una serie di pozzi perforati parallelamente al fronte;
- 2) Brillamento delle mine "in volata";
- 3) Distacco del fronte. La frammentazione del materiale causa l'emissione **A**;
- 4) Crollo del fronte. In questa fase può avvenire un'ulteriore frammentazione dei blocchi di maggiori dimensioni causando l'emissione **B**;
- 5) Distensione del nuovo fronte. In questa fase si ha la microfratturazione associata all'emissione **C**;
- 6) Assestamento. Il nuovo equilibrio pensionale viene raggiunto con la fratturazione associata alle emissioni di tipo **D**. Le fratture di assestamento sono visibili anche in superficie.



**Fig.53c** - Segnale anomalo registrato in una cava di calcare pochi secondi dopo il crollo di un fronte posto in una zona profonda e senza sfogo laterale (2000). Quell'abbattimento ebbe eccezionalmente ripercussioni anche nel vicino centro abitato dove fu avvertita una scossa sismica. Questo tipo di emissione è diverso dalla sequenza impulsiva associata al crollo del fronte (SID). Nel grafico in alto si vede il fenomeno suddiviso in due episodi. In entrambi i casi la regione di massima intensità evidenzia una deriva in frequenza che sale per poi riscendere. Nel primo episodio il culmine della deriva vede un'interruzione della banda di massima intensità. Nel secondo episodio c'è una breve e netta interruzione dell'emissione. L'ingrandimento (nella scala del tempo) di questo breve intervallo evidenzia che il segnale è costituito da una successione regolare di impulsi pressoché uguali e che l'interruzione netta è dovuta all'interruzione della sequenza. Tutte queste caratteristiche sono comuni al precursore SIO rilevato in laboratorio soltanto quest'anno.

Altre importanti analogie si possono trovare nella distribuzione temporale degli eventi dei segnali di tipo SIO. Fin qui è stato detto che le stazioni automatiche non hanno registrato il segnale sorgente ma solo lo spettrogramma elaborato in tempo reale e che non sono state utili ai fini di una previsione perché i dati venivano esaminati a posteriori. In realtà il primo evento, quello del 10 settembre 2003, fu fortunatamente osservato sul monitor<sup>36</sup> proprio mentre si stava manifestando, e ciò ha consentito di interrompere la normale procedura di acquisizione per effettuare una registrazione digitale diretta del segnale sorgente. Lo studio della registrazione ha evidenziato che l'impronta dello spettrogramma era pesantemente influenzata dal rumore di fondo industriale. Filtrando il rumore medio in assenza di segnale (fig.54) si è osservato che la banda di massima emissione non si estendeva da 4 a 6 kHz, come poteva apparire dallo spettro "sporco", bensì nell'intervallo 8-10 kHz, proprio come nel segnale SIO, osservato in laboratorio soltanto nel 2004.

A questo punto abbiamo i dati digitali per confrontare da vicino un presunto precursore reale con un precursore simulato in laboratorio, almeno per quanto riguarda l'emissione SIO.

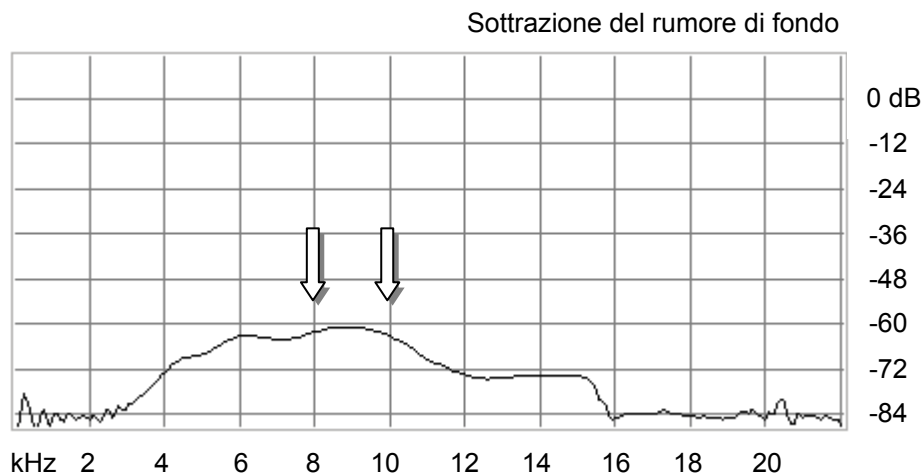
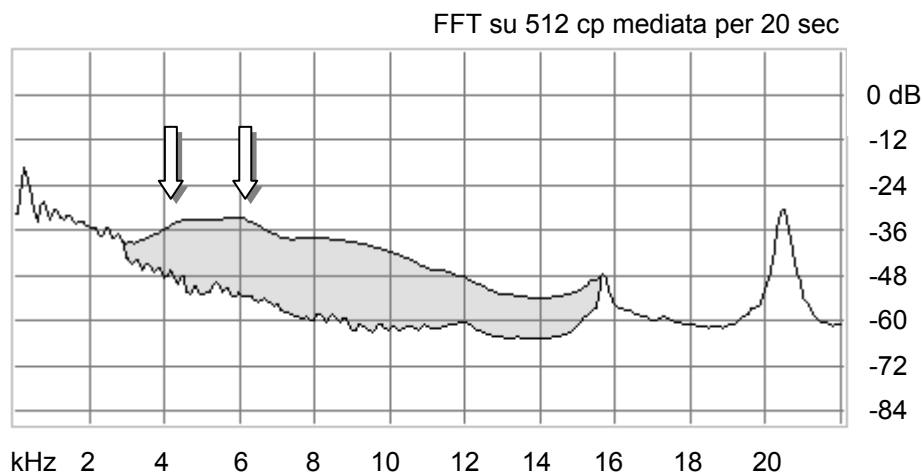
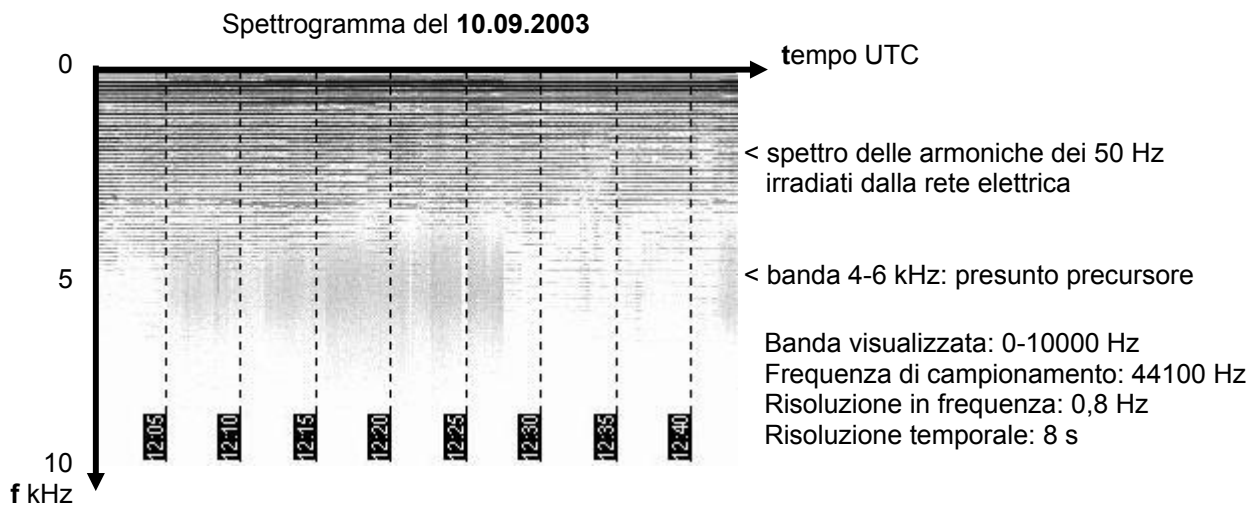
Analogamente a quanto osservato in laboratorio (cfr. par. 3.2.2) anche il precursore "atmosferico" all'analisi oscilloscopica si è rivelato costituito da episodi di ripetizioni regolari di una precisa sequenze (*treno*) di impulsi pressoché gemelli. La durata di ogni treno sembra essere la stessa in entrambi i casi, mentre il periodo di ripetizione è piuttosto simile, come evidenziato nello schema di fig.55a. La banda di massima emissione ha la stessa larghezza di circa 3 kHz e anche nel segnale atmosferico sembra seguire una lieve deriva verso le frequenze più alte. Gli episodi di emissione infine sono anch'essi paragonabili nella durata, ma su scale diverse. Sono infatti separati da episodi lunghi e "spezzati" al loro interno da episodi brevi, secondo lo schema della fig.55b.

Un analogo comportamento, ma su scala intermedia, si era verificato anche nell'episodio "anomalo" osservato in cava (cfr. fig.53c), dove uno dei due episodi era a sua volta spezzato da un intervallo piccolissimo in cui mancavano impulsi.

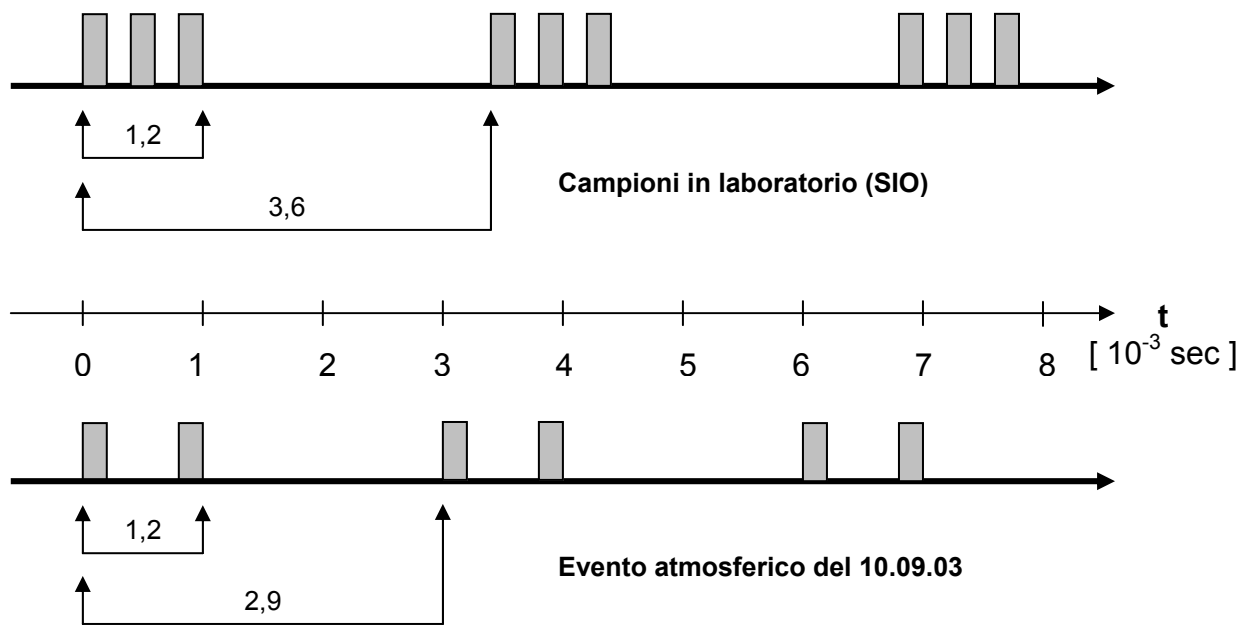
Va notato infine che la ripetizione dello stesso schema su scale diverse, ovvero uno schema di *distribuzione temporale ad invarianza di scala*, suggerisce un modello di organizzazione di tipo frattale, ma su questo aspetto torneremo nel par. 4.

---

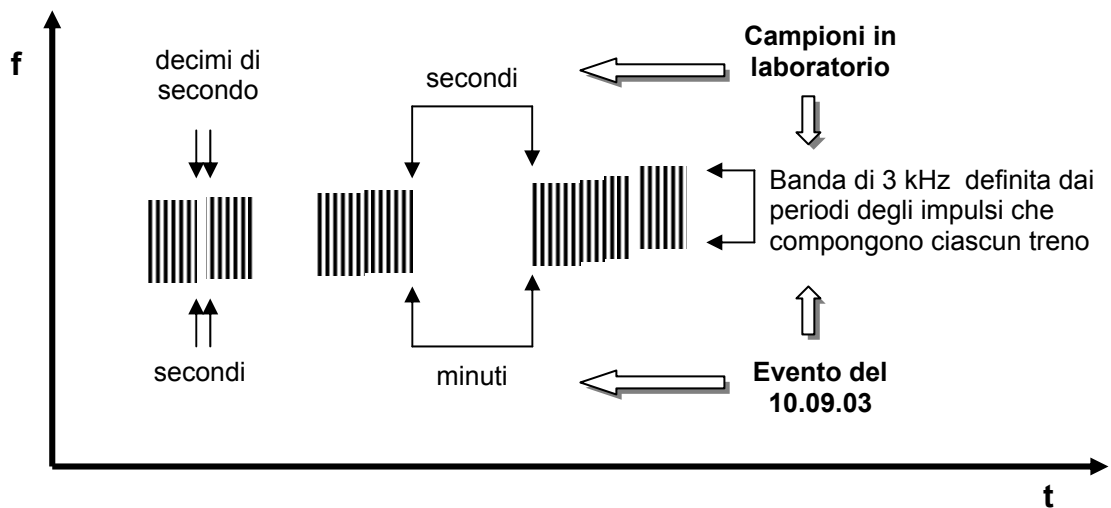
<sup>36</sup> Il sisma che ne seguì, il 10.09.2003 era quindi atteso, come pure quello del 22.08.2005 (percepito anche a Roma) il cui precursore fu scoperto sul monitor della stazione automatica meno di un'ora dopo la sua comparsa. Questa "fortuna" è dovuta al fatto che il monitor della stazione di Cascia, situato in casa, era costantemente sotto osservazione.



**Fig.54** - Filtraggio del rumore di fondo dallo spettro del precursore del 10 sett 2003. L'episodio (spetrogramma in alto) evidenziava la massima emissione nella banda 4-6 kHz. Sovrapponendo lo spettro del segnale con lo spettro del rumore mediati per 20 sec (al centro) si evidenzia una differenza (area grigia) il cui "spessore" è massimo su frequenze più alte. La sottrazione digitale del rumore dal segnale (spettro in basso) mostra che la banda di massima emissione si estende in realtà da 8 a 10 kHz.



**Fig.55a** - Confronto nella scala dei tempi tra i treni di impulsi dell'emissione SIO (sopra) e i treni dell'evento atmosferico del 10 settembre 2003 (sotto). Nel primo caso ogni treno è costituito da tre impulsi, nel secondo da due. In entrambi i casi la durata dei treni e l'intervallo di ripetizione sono pressoché uguali.



**Fig.55b** - Confronto globale tra il modello di emissione SIO rilevato in laboratorio (sopra) e l'evento rilevato in atmosfera il 10 sett 2003. Nel primo caso gli episodi di emissione (sequenze regolari di treni di impulsi) sono separati di alcuni secondi e possono essere "spezzati" al loro interno per decimi di secondo. Nel secondo caso gli episodi sono separati da intervalli lunghi fino a 10 minuti e possono essere spezzati per periodi di secondi. In entrambi i casi la banda di emissione ha larghezza di circa 3 kHz e può seguire una deriva in frequenza.



## 4.0 Interpretazione globale del fenomeno

In questa fase si tenterà, per quanto è possibile, di dare un significato ai dati raccolti nel quadro di una visione unica e completa del fenomeno di emissione EM in banda radioacustica. Si cercherà al contempo di valutare l'efficacia della tecnica utilizzata nei confronti di tale fenomeno e di individuare possibili miglioramenti ove fossero necessari.

### 4.1 Ipotesi sulla sorgente dell'emissione

Esiste già in letteratura una vasta gamma di ipotesi sui meccanismi fisici compatibili con l'emissione di segnali EM associabili al terremoto. Tuttavia tra questi non è stata ancora riconosciuta con certezza "la" sorgente dei precursori EM.

Segnali EM possono essere originati nella litosfera nei seguenti modi:

- Dislocazione di cariche nella struttura cristallina (modello "MCD": Vallianatos, 1999).
- Meccanismo elettrocinetico (Mizutani, 1976; Dobrovolsky, 1989);
- Meccanismo piezomagnetico (Nakamura, 1999);
- Trasduzione naturale M-E-EM (Nardi, 2001)
- Meccanismi legati alla microfratturazione:
  - Modello ACD (Molchanov, 1998)
  - Induzione sismomagnetica (Surkov, 1999)
  - Fratturazione in un dielettrico (Mognaschi, 2002)

Oppure potrebbero essere generati in atmosfera da un campo elettrico anomalo indotto da fenomeni litosferici e in particolare dalla liberazione di elementi radioattivi come il gas radon. In questo caso i meccanismi di emissione sono da riferire ai seguenti fenomeni:

- Onde AGW o "acustico-gravitazionali" (Chmyrev, 1999 [1]);
- Riscaldamento locale dell'atmosfera (Chmyrev, 1999 [2]).

Escluderemo dalla nostra analisi il secondo gruppo perché non riferibile a questa esperienza sperimentale. Per quanto riguarda il primo gruppo, i primi tre modelli, cioè la teoria elettrocinetica, la *Moving Charge Dislocation* o "MCD" e il meccanismo piezomagnetico, prevedono variazioni di campo statico che potrebbero indurre emissioni EM nel caso in cui i potenziali generati siano causa di correnti. Questa eventualità è considerata secondaria in tutti i modelli. La teoria elettrocinetica inoltre si basa sulla filtrazione di un fluido nella porosità formata dalle microfratture della regione epicentrale, cioè da una condizione ambientale di saturazione che dalle nostre evidenze sperimentali non è risultata necessaria alla sorgente del segnale EM ma piuttosto ne ha potuto compromettere l'intensità per problemi dovuti alla propagazione nel liquido di saturazione. Infine il modello piezomagnetico richiede la presenza di minerali ferromagnetici, anche questo un condizionamento ambientale che non ha riscontro nella nostra esperienza sperimentale in cui ogni litologia ha

manifestato l'emissione e con variabilità associata alla litologia stessa solo in funzione del comportamento meccanico del materiale.

Il quarto tipo (M-E-EM) era quello che proposi nella tesi di laurea e che nasceva dalla fusione dell'esperienza geologica con quella radiotecnica. Era stato formulato per una compatibilità con segnali ad alta frequenza prima del sisma e a bassa frequenza durante, in base alla mia esperienza diretta che precedette la tesi (Colfiorito 1997). E' però un po' macchinoso e quindi lo escluderò<sup>37</sup> come gli altri sotto la lama del *rasoio di Occam*. Dalle osservazioni sperimentali appare evidente che le emissioni EM si manifestano, sia pure con diversa modalità, su ogni tipo di roccia e in ogni condizione. La loro genesi deve essere piuttosto elementare e non può richiedere necessariamente la formazione di correnti.

L'ultimo tipo riguarda tre modelli che individuano la sorgente nell'apertura di ogni singolo "crack" e considerano, entro certi limiti, tutte le sorgenti come un insieme coerente e quindi gli effetti cumulabili in un fenomeno complessivo che interessa tutta la regione focale.

Il modello "ACD" prevede emissioni impulsive ed è quindi coerente con le nostre osservazioni sperimentali, in cui la sequenza SID era interamente riferibile ad episodi meccanici di crack. Purtroppo si basa sul fenomeno piezoelettrico che richiede una particolare composizione mineralogica della roccia. Sebbene in rocce comuni come i calcari il problema potrebbe essere risolto dalla presenza di silice in forma microcristallina (*diaspro*), le nostre osservazioni sperimentali non sembrano evidenziare un ruolo dominante in un minerale importante come il quarzo. I campioni di granito, che per la ricchezza di quarzo in fenocristalli avrebbero dovuto rappresentare la roccia più "reattiva" in assoluto, non hanno infatti mostrato un'emissione eccezionale ma piuttosto ordinaria e ancora una volta riconducibile solo alle caratteristiche di struttura e durezza del materiale.

Il modello dell'induzione sismomagnetica è legato invece all'onda acustica emessa dai crack e quindi – forse – compatibile con le frequenze riscontrate nel segnale S/O e con la sua variabilità nella banda sonica. Purtroppo la teoria deve essere ancora sviluppata proprio in relazione alle frequenze.

L'ultimo modello, presentato come *fratturazione in un dielettrico*, è forse quello più prossimo alle nostre osservazioni sperimentali, anche perché, a mio parere, si presta di volta in volta a supportare caratteristiche di altri modelli adattandosi ad un ampio panorama di fenomenologie. Inoltre non richiede la formazione di correnti ma piuttosto è direttamente legato alla dilatanza e al pianto della roccia, con tutte le implicazioni che ne possono derivare (cfr. par. 1.1). Quella che segue ne è una mia libera interpretazione che presenterò come ipotesi di meccanismo di emissione per l'interpretazione dei dati sperimentali.

Il modello di Mognaschi si basa sul presupposto che la roccia deve essere considerata genericamente come un materiale non conduttore. All'interno di un dielettrico le cariche libere eventualmente presenti non hanno mobilità e non possono migrare verso la superficie o prendere parte ad una corrente come avviene nei conduttori. Al momento della fratturazione della roccia la rottura del reticolo o la

---

<sup>37</sup> Ne allego comunque una sintesi in appendice (par. 5.3) a scopo documentaristico, non essendo un modello noto in letteratura.



dislocazione di cariche reticolari (cfr. modello MCD) genererà un potenziale elettrico le cui cariche dunque rimarranno in posto, sui lembi della frattura. L'apertura della frattura (dilatanza) e l'oscillazione della stessa a causa dell'apertura di fratture adiacenti imprime a queste cariche un moto arrestato nel primo caso (allontanamento dei lembi) e un moto oscillatorio nel secondo. Il moto oscillatorio o comunque un moto "arrestato", genera sempre un campo EM: nel secondo caso sarà ciò che in elettromagnetismo si chiama *onda smorzata*. C'è da considerare a questo proposito che il noto fenomeno del *pianto della roccia*, essendo un'oscillazione meccanica che investe l'intera massa interessata dalla microfratturazione proprio al momento della fratturazione, può costituire il vero e proprio motore di questo fenomeno. In questo scenario particolare la frequenza di emissione EM, ovvero la frequenza di oscillazione delle cariche, sarebbe da ricercare proprio nella banda in cui si manifesta il pianto della roccia. Un altro possibile effetto che si può avere in questo modello è l'azzeramento della differenza di potenziale attraverso la migrazione di elettroni liberi (scintilla) tra i lembi della frattura. Anche questo fenomeno causerebbe onde smorzate di frequenza proporzionata alla lunghezza della scintilla, ovvero alla larghezza della frattura aperta, nei limiti consentiti dal potenziale che può essersi sviluppato e dalla costante dielettrica del mezzo che riempie le fratture.

Sia le onde smorzate generate dall'apertura della frattura che quelle originate dalla scintilla tra lembi del crack rappresentano emissioni impulsive il cui periodo è legato all'ampiezza della frattura stessa. Il moto oscillatorio delle cariche sui lembi della frattura è comunque un'oscillazione smorzata dovuta ad impulsi meccanici ed eventualmente alla risonanza della frattura. Ne deriverebbero emissioni EM più complesse, tendenzialmente impulsive ma con una banda più ampia. La banda sarà condizionata inoltre dall'interazione tra la frequenza della radiazione sismoacustica e la lunghezza delle fratture.

## 4.2 Il processo di rottura

Per interpretare la dinamica dell'emissione EM alla luce del modello di sorgente è necessario ricostruire prima cosa è avvenuto meccanicamente nel campione durante le prove sperimentali (fig.56). La compressione uniassiale prevede l'applicazione dello sforzo nella sola componente verticale  $\sigma_1$  senza confinamento del campione, quindi con  $\sigma_2=\sigma_3=0$ . La teoria della rottura prevede in queste condizioni un rigonfiamento laterale del campione. Questa fase è concomitante all'allargamento delle microfratture e corrisponde alla *dilatanza* della teoria sismica. In una fase precedente si era formata una microfratturazione diffusa. Sappiamo che l'orientamento delle fratture è parallelo all'asse di massima compressione  $\sigma_1$  ed esse si aprono nella direzione di minima compressione (Rikitake, pag. 210), quindi nel nostro caso indistintamente in ogni direzione orizzontale. Sappiamo anche che all'aumentare dello sforzo gli eventi di crack aumentano a cascata e tenderanno a concentrarsi in una particolare regione di spazio dove la tensione è massima e dove in una fase successiva alcune microfratture tenderanno a fondersi in fratture di maggiori dimensioni fino a formare la superficie di scorrimento che determinerà la rottura del campione (ovvero, in scala tettonica, il terremoto). Questa regione di spazio è in teoria di una superficie doppioconica cui sarà tangente il piano di dislocazione della frattura.

Secondo la *condizione di spinta attiva* di Rankine, l'inclinazione del taglio di rottura sarà:

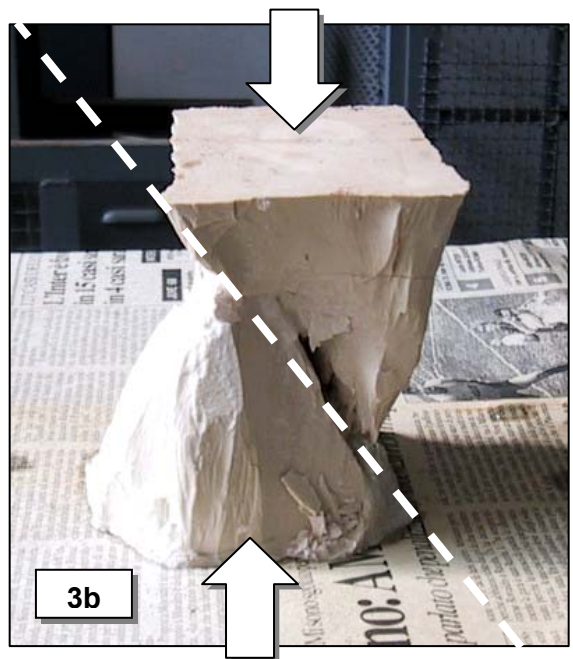
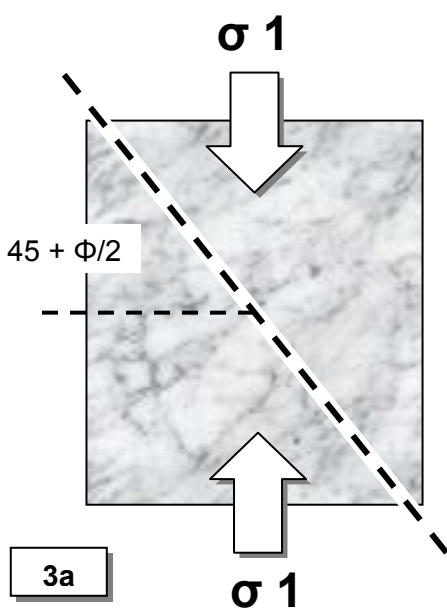
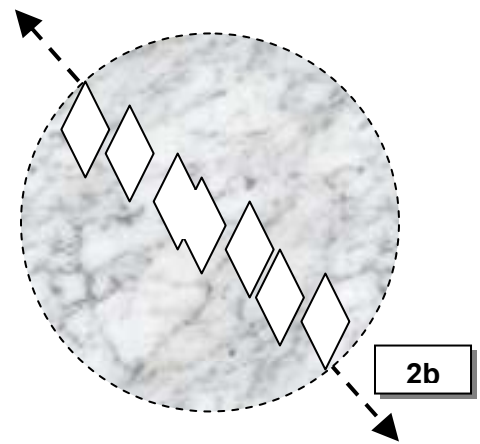
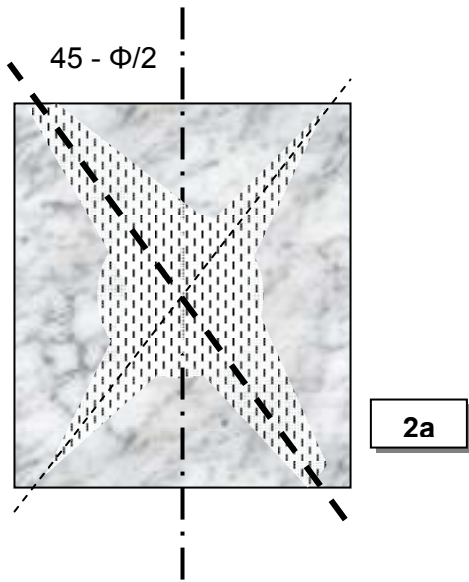
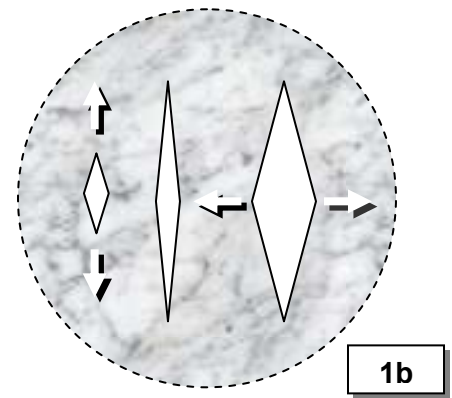
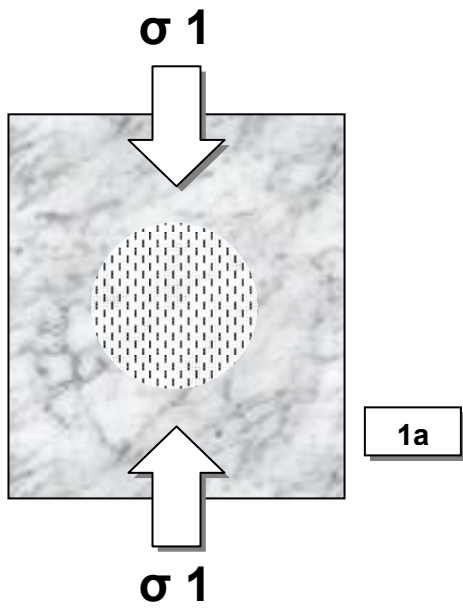
$$\alpha = 45^\circ + \Phi/2$$

dove  $\alpha$  è l'angolo rispetto al piano orizzontale e  $\Phi$  è l'angolo di attrito interno del materiale, che per le rocce può essere tipicamente  $28^\circ$ - $30^\circ$ . L'orientamento del piano intorno all'asse  $\sigma_1$  dipende invece dalla presenza di punti di debolezza nella massa lapidea sulla superficie di massima tensione (discontinuità o disomogeneità mineralogiche o strutturali). In quei punti inizierà a nuclearsi la frattura (Griffith, 1924). Per questo motivo nei nostri campioni si sono formate alla rottura delle macrofratture inclinate circa  $60^\circ$  sul piano orizzontale, ovvero circa  $30^\circ$  rispetto a  $\sigma_1$  ( $45^\circ - \Phi/2$ ), lungo le quali è avvenuto uno scorrimento di tipo "diretto" che ha segnato il limite di rottura del materiale e che simula nel campione la frattura sismogenetica. Nelle condizioni sperimentali però, a causa della mancanza di pressioni di confinamento, con la rottura avviene una vera e propria esplosione in cui gran parte della massa microfratturata attraversata dal piano contenente  $\sigma_2$  e  $\sigma_3$  può essere proiettata all'esterno in una miriade di schegge lasciando in posto un residuo più o meno coerente dalla tipica forma "a clessidra". La geometria del provino infatti ha condizionato l'orientamento delle fratture: le basi quadrate e gli angoli di frattura determinano la forma piramidale delle due masse residue nella regione circostante l'asse  $\sigma_1$ . L'energia liberata con l'esplosione del campione è l'energia che in condizioni di confinamento avrebbe causato il sima nella massa lapidea circostante.

**Fig.56** - Pagina a fianco: dinamica del processo di rottura dei campioni in laboratorio. Descrizione delle varie fasi:

- 1a) Applicazione dello sforzo uniassiale e formazione di fratture.
- 1b) Le fratture si propagano nella direzione del massimo sforzo aprendosi nella direzione del minimo sforzo (dilatanza).
- 2a) La tensione e quindi la microfratturazione si concentra in una regione con un determinato orientamento rispetto alla direzione della forza applicata.
- 2b) Le microfratture si fondono in fratture più grandi allineate nella direzione in cui la loro concentrazione è massima.
- 3a) Cedono i setti che separavano ancora le macrofratture e si crea una superficie di scorrimento analoga ad una faglia diretta. E' la rottura del campione.
- 3b) In un materiale sufficientemente rigido con la rottura si ha lo sbriciolamento (esplosione) della massa nelle direzioni perpendicolari all'asse dello sforzo applicato. Resta un residuo coerente a cui le direzioni preferenziali di cedimento e la forma geometrica originaria del campione conferiscono la caratteristica forma "a clessidra".

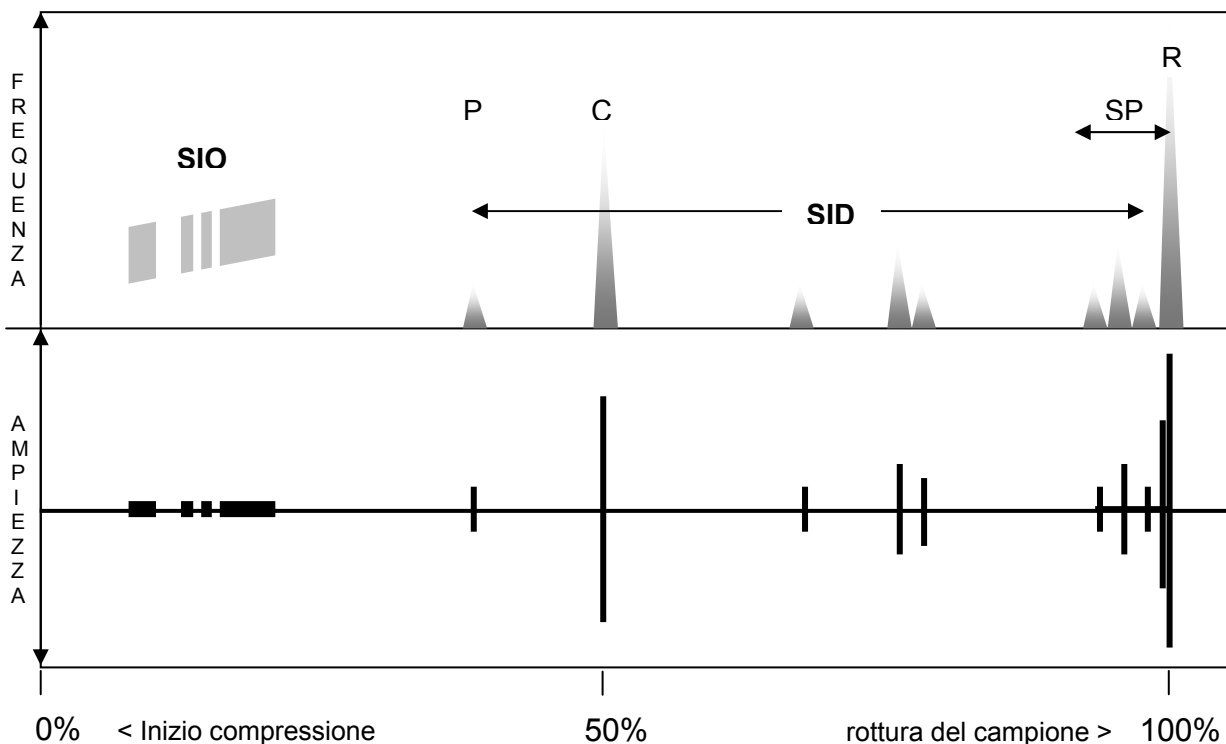
Fig.56



### 4.3 Dinamica dell'emissione in laboratorio

Tentiamo ora di interpretare l'evoluzione dell'emissione EM alla luce dei modelli previsti per la rottura meccanica e per la sorgente elettromagnetica.

Chiamiamo  $T_{100}$  il tempo necessario per rompere un campione sotto uno sforzo uniaassiale ad incremento costante e misuriamo i tempi in percentuale di  $T_{100}$ . Abbiamo visto che ogni tipo di litologia ha manifestato almeno una volta l'emissione EM e che la "reattività" della roccia dipende principalmente dalle caratteristiche meccaniche e strutturali del materiale e solo in funzione di queste dipende anche dalla litologia. Tralasciando dunque le differenze legate allo stile deformativo del materiale, che esamineremo in seguito, possiamo schematizzare la dinamica dell'emissione EM nel modello rappresentato in fig.57. Nel grafico a confronto diretto tra spettrogramma e oscillogramma distinguiamo nettamente le due tipologie di segnale per la distribuzione spettrale, per il diverso stile con cui si susseguono gli impulsi (ricordiamo che in entrambi i casi si tratta di emissioni impulsive) e per l'ampiezza nettamente inferiore della sequenza SIO rispetto alla SID.



**Fig.57** - Rappresentazione schematica ideale dell'emissione radioacustica nelle prove di rottura uniaassiale. In alto lo spettrogramma e in basso l'oscillogramma. Scale Y: frequenza (banda 20 Hz – 20 kHz) sopra; ampiezza (dinamica 60dB) sotto. Scala X: tempi espressi in percentuale del tempo necessario per portare a rottura il campione con incremento di sforzo costante (rottura = 100%). Il grafico riassume la dinamica complessiva del fenomeno di emissione. Si distinguono due tipologie di sequenze impulsive. Legenda:

SIO = sequenza impulsiva ordinata	P = primo impulso
SID = sequenza impulsiva disordinata	C = impulso centrale
SP = sequenza parossistica	R = rottura

Facendo riferimento ai tempi notiamo che la SIO si manifesta solitamente<sup>38</sup> nella prima metà del tempo di rottura e spesso prima dell'inizio della sequenza disordinata. La SID invece inizia tipicamente ad un tempo poco minore di  $T_{50}$ , che coincide con l'inizio della fratturazione evidenziata dai sensori acustici e, con l'incremento di sforzo costante, dovrebbe coincidere anche con l'inizio del fenomeno della dilatanza, che tipicamente insorge ad una tensione pari ad  $\frac{1}{2}$  di quella di rottura (Rikitake, pag. 210). Possiamo ipotizzare quindi che la SIO sia da riferire alla formazione dei cracks, ovvero alla stretta oscillazione (alta frequenza) delle cariche generate dalla fratturazione investite dalla radiazione meccanica (pianto della roccia) causata dalla fratturazione stessa. Si tratterebbe dunque di un coro di oscillazioni smorzate sulla frequenza di risonanza delle fratture. In questo stadio (fig.58-1) le fratture sono ancora chiuse e separate e non possono essere raggiunte dall'acqua di saturazione. Forse è per questo motivo che questo tipo di segnale, pur poco frequente, è risultato indipendente dalla presenza del liquido di saturazione, il cui scopo era quello di inibire l'emissione. Ciò è ancor più significativo se si considera che la SIO in aria ha sempre un'intensità nettamente inferiore alla media degli impulsi della SID. In molti casi dunque potrebbe non essere rilevabile perché troppo tenue<sup>39</sup>. A questo si affianca anche il fatto che la SIO non è mai accompagnata da una marcatura acustica<sup>40</sup>.

La fase successiva (fig.58-2) prevede l'apertura dei crack (dilatanza) e qui osserviamo l'evoluzione della SID con una progressiva intensificazione nella frequenza degli eventi e una evidente corrispondenza di ogni singolo impulso EM con un impulso meccanico ovvero con una frattura. In questa fase possiamo associare l'emissione EM all'apertura dei crack (onda smorzata dall'arresto del moto) oppure alla scarica elettrica tra i lembi del crack, qualora la distribuzione (casuale) delle cariche risultasse mediamente sbilanciata. In entrambi i casi si avrebbero frequenze più basse delle precedenti in sequenze di singoli impulsi e non più un coro di eventi coerenti. Il raggruppamento degli impulsi in "clusters", che comunque segue l'analoga distribuzione della fratturazione meccanica, andrebbe associata ad episodi enucleazione di fratture in determinate zone di debolezza strutturale del campione. La teoria sismica della dilatanza satura prevede in questa fase di espansione il richiamo di acqua all'interno delle fratture. Nelle prove effettuate in saturazione di acqua dolce abbiamo osservato un notevole impoverimento degli eventi della SID, indipendente dalla litologia e non compatibile con l'attenuazione del segnale dovuta alla propagazione nel liquido stesso. Possiamo quindi supporre che l'acqua di saturazione abbia effettivamente imbibito i vuoti delle fratture impedendo il trasferimento di cariche per scintilla (fig.58-3). Se ciò fosse vero<sup>41</sup> dovremmo attribuire a questo meccanismo una buona parte degli impulsi EM. Le prove in saturazione di acqua salata hanno invece mostrato la scomparsa quasi totale di impulsi, come ci si aspetterebbe dall'azione di un liquido conduttore che impedisce l'accumulo di potenziali elettrici sui lembi dei crack.

---

<sup>38</sup> Si sono osservate eccezioni legate all'eventualità che fratture premature scarichino parzialmente la tensione riavviando il processo di accumulo.

<sup>39</sup> In realtà ci sono stati alcuni casi in cui la sua presenza è stata inizialmente incerta oppure dichiarata nulla per l'impossibilità di interpretare segnali troppo vicini al rumore di fondo.

<sup>40</sup> Occorre ricordare che il microfono è alloggiato non sul campione ma sulla parete della vasca di saturazione.

<sup>41</sup> C'è da considerare anche l'effetto dipolare delle molecole dell'acqua, che potrebbero essersi orientate per adattamento elettrostatico alle cariche presenti sui lembi delle fratture, alternando dalla superficie della frattura verso l'interno diversi strati molecolari di orientamento opposto. Questo effetto tenderebbe a ridurre i potenziali elettrici e quindi potrebbe aver attenuato anche il secondo tipo di sorgente.

Tornando alla meccanica della rottura, la fase successiva è quella della formazione delle macrofratture per fusione progressiva dei crack. Nei campioni asciutti nel campo delle deformazioni plastiche, e proprio in prossimità di  $T_{100}$ , si osserva un episodio di massima densità e intensità dei cracks, sia meccanici che EM. Questa fase, che culmina con la rottura del campione, fu identificata già nella tesi di laurea come “sequenza parossistica” (Nardi, 2001) e corrisponde alla formazione dei piani di scorrimento della rottura. Anche in letteratura (Rikitake, pag. 208) risulta un forte incremento dei cracks a partire dal 95% della tensione di rottura.

A questo punto è interessante riesaminare le prove in saturazione di acqua salata perché i pochi segnali che si sono manifestati in questa condizione sono concentrati proprio nella sequenza parossistica. Hanno intensità maggiore di quelli osservati in acqua dolce, compatibilmente con l’ottima propagazione del segnale nel liquido conduttore. Ma la vera peculiarità di questi impulsi è quella di essere spiccatamente monocromatici (figure 42 a, b, c). Da questi elementi si potrebbe supporre che siano generati dalle sole fratture non raggiunte dal liquido inibitore, cioè da fratture “primitive” presumibilmente lontane dalla regione di aggregazione e scosse in modo impulsivo ed energico dalle macrofratture che stanno portando alla rottura. Se così fosse il picco di 2,4 kHz che caratterizza questi segnali potrebbe essere riconducibile alla risonanza della dimensione primitiva dei crack e potrebbe essere utile ai teorici per verificare l’esattezza del modello di emissione per oscillazione di cariche in un dielettrico.

La “reattività” della roccia dal punto di vista dell’emissione EM dipende dal comportamento meccanico del materiale e dalla sua disomogeneità strutturale. L’evoluzione dell’emissione EM discosta da questo comportamento essenzialmente nel numero di emissioni della sequenza disordinata, essendo questo direttamente relazionato al numero di fratture registrate acusticamente nel campione.

Materiali a matrice argillosa, che hanno assorbito lo sforzo comprimendosi quasi senza fratturarsi fino alla rottura, hanno emesso pochi segnali e qualche impulso molto marcato solo alla rottura. Materiali rigidi che hanno subito numerose fratture hanno emesso una ricca sequenza di impulsi che si infittisce avvicinandosi alla rottura. Tra questi, anche nell’ambito della medesima litologia, hanno prodotto più impulsi i campioni di maggiore disomogeneità, in accordo con la dinamica del processo di fratturazione che trova più centri di enucleazione là dove vi sono più punti di debolezza. Infine quei campioni che hanno assorbito più a lungo lo sforzo, con poche fratture e nessuna compattazione interna hanno emesso pochi impulsi nella SID primaria ma hanno concluso la prova con una fitta sequenza parossistica e un’intensa rottura corrispondente ad una forte esplosione meccanica e spesso allo sbriciolamento totale della massa.

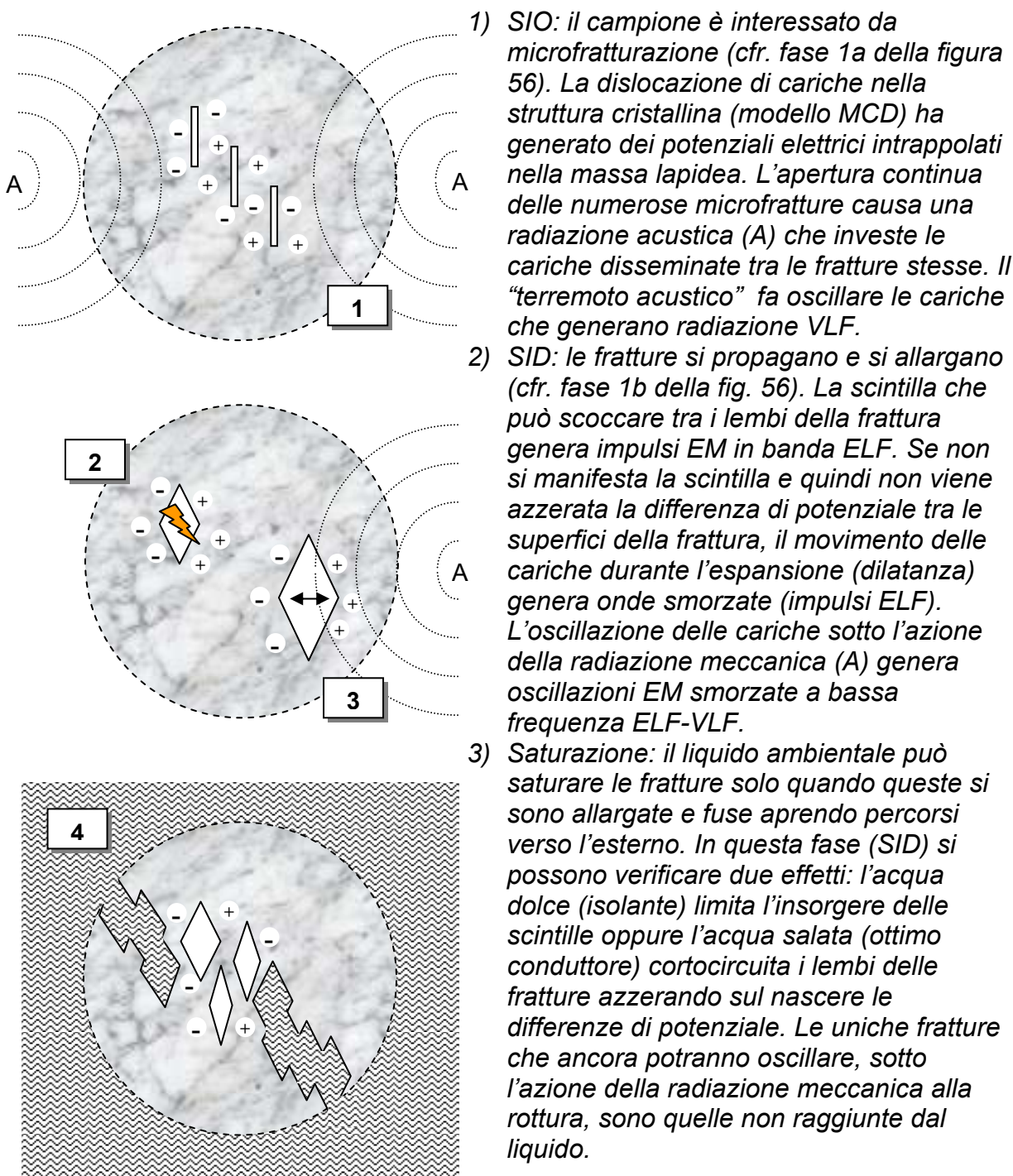
Molte prove di rottura però, indipendentemente dallo stile del campione, hanno manifestato delle analogie interessanti nella sequenza SID, che pure avevamo definito “disordinata”. Ad esempio nella scala dei tempi espressa in percentuale del tempo di rottura (fig. 57) il primo impulso non solo ricade in un tempo poco minore di  $T_{50}$  ma, apparentemente, sempre nello stesso tempo percentuale. Ricorre poi un impulso prossimo a  $T_{50}$  che spesso si distingue per la notevole intensità, spesso seconda solo all’impulso di rottura. Queste analogie sono evidentissime anche in campioni di comportamento opposto (figure 35 e 36) in quanto anche i materiali poco reattivi hanno emesso spesso solo un primo impulso poco minore di  $T_{50}$ , un secondo a  $T_{50}$ , e una sequenza di rottura. Uno primo tentativo di approfondimento eseguito

sull'intera gamma delle prove ha evidenziato il possibile sincronismo di un terzo impulso nell'imminenza della sequenza parossistica. Purtroppo, malgrado l'evidenza riscontrabile in molti dei campioni testati, non è possibile verificare con precisione su tutto il panorama dei provini perché per motivi tecnici legati alla meccanica della pressa, la marcatura di inizio prova sulle nostre registrazioni non corrisponde sempre all'effettivo avvio dello sforzo e inoltre non tutte le prove hanno potuto avvalersi di un incremento costante per l'intera durata<sup>42</sup>. Tuttavia una rapida verifica inversa, riferendo al punto di rottura i valori riscontrati nelle prove più evidenti, ha consentito di verificare anche nelle prove "discostanti" una sorprendente vicinanza di questi valori ai picchi caratteristici. Purtroppo la necessità di cronometrare tutti gli impulsi di tutte le prove non mi consente in questa sede e nei tempi disponibili di approfondire l'argomento in modo quantitativo e completo al tempo stesso. Per questo motivo non fornirò nemmeno i valori approssimativi già ottenuti. E' tuttavia uno studio da approfondire per l'ovvia conseguenza che, riconoscendo anche solo due impulsi, la distanza temporale tra il primo impulso e l'impulso di  $T_{50}$  è una percentuale esatta di  $T_{50}$  e consentirebbe la previsione della rottura senza neppure aver bisogno di conoscere il tempo di avvio dello sforzo, cioè del dato non disponibile nel caso di un sisma reale.

---

<sup>42</sup> Questi due difetti dipendeva non solo dalla mano dell'operatore ma anche dai tempi di reazione dell'impianto idraulico alla manipolazione delle valvole di controllo.

**Fig.58** - Possibili sorgenti dell'emissione EM radioacustica. Il modello parte dal presupposto che la roccia è un dielettrico ed eventuali cariche che dovessero formarsi al suo interno non hanno mobilità attraverso il materiale ma potranno soltanto oscillare con il movimento elastico del materiale stesso o propagarsi nei vuoti (esoelettroni) attraverso una scintilla elettrica. Descrizione delle varie fasi:





## 4.4 Ipotesi sull'emissione sismica

Nella tesi di laurea (Nardi, 2001) era stato osservato che la differenza di scala tra i segnali emessi in laboratorio e quelli generati dalla stessa roccia *in situ*, nell'abbattimento di fronti di cava, riguardava essenzialmente la separazione nel tempo degli impulsi, non i periodi degli impulsi stessi e quindi non lo spettro di frequenza. In quel caso si trattava di sequenze impulsive disordinate, anche se in cava erano aggregate in gruppi caratteristici e distintivi per ciascuna fase dell'evoluzione del fenomeno meccanico.

Nel monitoraggio della radiazione naturale in atmosfera è stata ora evidenziata la presenza di un tipo di segnale piuttosto simile alla SIO, cioè sulla stessa banda di frequenze, con la stessa larghezza di banda e la stessa strutturazione "cronografica" in episodi, treni e impulsi. Anche in questo caso la differenza è stata riscontrata nella scala cronografica (episodi e treni) con l'eccezione del periodo degli impulsi e quindi delle frequenze.

Su tre segnali registrati, tutti sono associabili con un anticipo di alcuni giorni a sismi di rilevante magnitudo (tav.14). Malgrado il successo apparente del 100% è chiaro che una casistica di tre casi non può rappresentare una prova molto solida. Tuttavia, ammesso che siano stati osservati in ambiente naturale dei precursori SIO, alla luce dell'evoluzione dell'emissione osservata in laboratorio ci dobbiamo porre i seguenti interrogativi:

1. Perché il segnale non è stato osservato anche sui sismi di maggiore intensità?
2. Perché non è stato osservato da tutte le stazioni?
3. Perché la SIO non è stata seguita da una SID?
4. Perché l'anticipo sul sisma è di pochi giorni?
5. Se in laboratorio ha reagito praticamente ogni tipo di roccia, perché l'ambiente naturale non è saturo di un rumore di fondo EM causato da tutti i terremoti del globo?

Sulla base delle attuali conoscenze possiamo già tentare di formulare qualche risposta, sia pure provvisoria e necessaria di verifiche.

1) La prima domanda trova facile risposta nelle osservazioni sperimentali. La SIO in laboratorio ha tipicamente un segnale molto tenue (fig.56) e quindi la sua visibilità è piuttosto critica. Nell'ambiente naturale sarà fortemente influenzata dalla distanza tra sorgente e ricevitore e dalle modalità di propagazione della radiazione E-VLF, peraltro ancora poco note.

2) Il secondo problema si pone in due dei tre casi, in cui due stazioni erano attive contemporaneamente. La risposta potrebbe essere nella diversa esposizione delle antenne, il cui diagramma di irraggiamento azimutale non è uniforme perché fortemente influenzato da fattori locali quali tetti, mura e morfologia del paesaggio<sup>43</sup>. Inoltre, a parte la dislocazione geografica, in entrambi i casi la differenza di quota era di circa 762 m e la stazione più bassa è stata quella che non ha ricevuto il segnale.

---

<sup>43</sup> Per evitare queste influenze, in particolare quelle di natura capacitiva, in radiotecnica è noto che l'antenna ideale deve essere posta ad un'altezza dal suolo maggiore di  $\lambda/2$ . Questo non è sempre possibile, specie per le bande più basse. Nel nostro caso addirittura questa altezza minima corrisponde a circa 3 km.

3) L'assenza di una sequenza impulsiva disordinata nel fenomeno rilevato in atmosfera trova facile risposta nella particolare modalità di acquisizione delle stazioni automatiche. Come è stato descritto nel par. 2.3, per garantire una lunga autonomia di immagazzinamento dei dati è stata ridotta la risoluzione temporale degli spettrogrammi elaborati automaticamente dalle stazioni. Poiché i periodi degli impulsi sono al di sotto di questa risoluzione era già chiaro che non sarebbe stato possibile risolvere i singoli episodi della SID. Tuttavia la speranza era quella di risolvere nel suo insieme la sequenza parossistica, che nel caso di un sisma avrebbe potuto avere un enorme numero di impulsi. Invece nel periodo monitorato non è stato osservato niente di sospetto in concomitanza o nell'imminenza dei fenomeni sismici. Non è difficile immaginare che la dilatazione della scala temporale nel fenomeno sismico potrebbe essere tale da separare gli impulsi di un intervallo maggiore di 8 secondi. Questo dubbio rivela una carenza nell'apparato strumentale che del resto era stato architettato per lavorare con il miglior "compromesso tecnico" tra risoluzione e autonomia e francamente è quanto di meglio si poteva realizzare nell'ambito del dottorato di ricerca e con le risorse disponibili.

4) C'è un problema che al momento non ha soluzione. In base al principio empirico della *dilatazione cronografica* dovremmo aspettarci l'insorgere della SIO con un anticipo maggiore di  $T_{50}$ , dove nel fenomeno reale  $T_{100}$  dovrebbe essere almeno il tempo di ricorrenza del sisma in una data regione. Invece due volte su due la SIO naturale ha preceduto il sisma di pochi giorni. E' vero del resto che un terremoto non scarica totalmente la tensione crostale e quindi è difficile definire il valore di  $T_{50}$ . Inoltre il problema va forse affrontato da un punto di vista non lineare, ovvero frattale. La preparazione di un sisma è certamente un sistema dinamico complesso soggetto a catastrofe e queste sequenze impulsive "disordinate", nelle quali riusciamo tuttavia ad intuire un ordine sia nelle intensità che nella distribuzione temporale, potrebbero trovare interpretazione nel principio della *criticità auto-organizzata* (CAO<sup>44</sup>).

**Tav.14**

**Riepilogo degli eventi sismici di cui si ha riscontro nello spettro VLF**

<b>Epicentro evento sismico</b>	<b>Data</b>	<b>Mg</b>	<b>Stazione ricevente</b>	<b>Distanza (Km)</b>	<b>Anticipo ore = giorni</b>	
Appennino emiliano	10/09/03	5.0	Cascia	200	106	4,4
Costa calabro occid.	03/03/04	4.6	Frascati	270	62	2,6
Mare a largo di Anzio	22/08/05	4.5	Cascia	150	89	3,7

I dati sono relativi al monitoraggio delle tre stazioni automatiche nel periodo agosto 2003 – settembre 2005. Sono stati osservati soltanto 3 segnali compatibili con i modelli osservati in laboratorio, tutti di tipo SIO e tutti associabili ad un sisma di magnitudo  $\geq 4.5$  manifestatosi a distanza di pochi giorni. La media degli anticipi è di 86 ore, equivalenti a 3,6 giorni.

<sup>44</sup> In inglese SOC: *Self-Organized Criticality*.

Questa teoria di Per Bak (1987) ha trovato una moltitudine di applicazioni nello studio dell'evoluzione dei sistemi complessi dalla biologia all'economia. Essa prevede che, indipendentemente dalle condizioni iniziali, un sistema dinamico fuori dall'equilibrio possa ad un certo punto auto-organizzarsi verso uno stato critico la cui struttura spaziale e temporale è autosimile su un ampio range di grandezze di scala. Ripete cioè a diversa scala lo stesso schema di raggruppamento (clusters) di singoli elementi. Vi si riconoscono due leggi di scala riferite rispettivamente ai tempi e alle grandezze ed è previsto che tali leggi non subiscano mai variazioni di scala passando dal fenomeno microscopico a quello macroscopico, analogamente alle nostre osservazioni sui segnali SIO. Ad esempio questo modello (Bak, 1989) è stato già identificato sia nella distribuzione dei terremoti che in quei segnali acustici studiati da Mogi (*pianto della roccia*) e correlati alla microfratturazione della roccia. A quegli stessi segnali e a quella stessa fratturazione abbiamo visto essere strettamente correlati anche i nostri impulsi EM. Molto probabilmente sarà in questa direzione che si potranno sviluppare lo studio e l'interpretazione dei precursori EM.

In questa chiave di lettura avrebbe ancor più importanza, nel monitoraggio atmosferico, la possibilità tecnica di risolvere la SID e magari di riconoscervi dei picchi caratteristici di importanza cronografica (cfr. par. 4.3), senza tuttavia rinunciare all'analisi spettrale che è lo strumento indispensabile alla discriminazione dei fenomeni.

5) L'ultimo problema richiama un dubbio che era sorto già prima di iniziare la sperimentazione, sulla base solo della bibliografia raccolta. Nella tabella esposta nel paragrafo 1.2 si può osservare che i fenomeni fin ora registrati in associazione ad eventi sismici, pur essendo per lo più in banda ULF e di natura magnetica, sono sempre associati ad eventi di magnitudo maggiore di 5. Anche nel nostro caso le magnitudo associate ai precursori sono state  $\geq 4,5$ . E' possibile che esista una soglia da superare per avere una manifestazione epigea dell'emissione EM?

Anche le recenti osservazioni di Asada et al. (2001) in banda VLF (1÷10 kHz) confermano anticipi di 1~4 gg. su sismi di Mag. 4~6.

E' certo, ed è stato osservato anche nei nostri esperimenti (cfr. par. 3.2.4), che la radiazione EM trova maggiore difficoltà di propagazione nella roccia piuttosto che nell'aria. E' noto inoltre che nell'atmosfera trova una facile guida d'onda tra litosfera e ionosfera dove viaggia per "*onda di terra*" quasi senza attenuazione. Per osservare il segnale è quindi indispensabile che riesca a superare la litosfera perché una volta iniettato in atmosfera con sufficiente energia il problema della ricezione dipenderebbe solo dalla distanza e dall'esposizione dell'antenna. E' dunque plausibile l'esistenza di un *limite critico di energia* legato all'attenuazione nella litosfera e al rendimento del meccanismo di trasformazione dell'energia "tettonica" (meccanica) in energia elettromagnetica, qualunque esso sia. L'energia in gioco nel volume focale deve riuscire a generare un segnale in grado di attraversare la litosfera e questo successo è necessariamente legato ad una soglia di magnitudo del sisma in preparazione. Se questa caratteristica fosse reale rappresenterebbe un aspetto vantaggioso nell'applicazione di questo metodo alla previsione sismica. Considerando che la media mondiale senza selezione di grandezza è di un evento ogni 30 sec, se ogni terremoto del globo fosse preceduto da un segnale EM, probabilmente si percepirebbe soltanto un continuo e poco utile *noise* radio.

Ma al di là di ciò che riguarda le osservazioni dirette, ci sono ancora delle questioni teoriche che si possono porre sul fenomeno dell'emissione EM di origine sismica.

I nostri esperimenti sono stati eseguiti a temperatura ambiente e in condizioni di confinamento a pressione atmosferica. Ci si può chiedere quindi come il fenomeno osservato in laboratorio possa essere influenzato dalle reali condizioni di temperatura e pressione presenti nella litosfera. Gli aspetti da considerare sono due: il meccanismo di emissione e la propagazione del segnale EM nella roccia.

Per quanto riguarda il processo di emissione, assumendo che sia quello descritto nel par. 4.3, la prima condizione necessaria, e ovviamente condivisa con le condizioni ambientali della sorgente sismica, è che permanga la struttura cristallina. In secondo luogo, in base a quanto osservato, i gradienti di temperatura e pressione potrebbero influire sull'emissione in relazione alla loro influenza sulla permeabilità dei liquidi nella roccia. In terza analisi entra in gioco il chimismo dei fluidi in relazione alla resistività elettrica.

La propagazione della radiazione EM attraverso un mezzo è invece limitata dalla sua finita conduttività. L'attenuazione del campo elettrico con la profondità della sorgente ( $z$ ) si può calcolare in base alla formula (1) della tavola 15. Essa è funzione della frequenza (come abbiamo anche osservato sperimentalmente: cfr. par. 3.2.5) e dalla resistività del mezzo. La resistività di un materiale (tav. 15/2) esprime la resistenza che un suo campione di lunghezza e sezione unitaria offre al passaggio della corrente. Si possono considerare tre ordini di grandezza per la resistività dei materiali, cui corrispondono conduttori metallici ( $\mu\Omega\text{m}$ ), conduttori elettrolitici ( $\Omega\text{m}$ ) e isolanti ( $\text{M}\Omega\text{m}$ ). Ma la resistività varia con la temperatura e il valore nominale di un materiale viene indicato alla temperatura di  $20^\circ\text{C}$ . La funzione che la lega alla temperatura non è la stessa per tutti i materiali. Analizziamo alcuni casi estremi: nei conduttori il suo basso valore cresce linearmente con la temperatura, negli isolanti il suo altissimo valore decresce non linearmente al crescere della temperatura, in alcuni materiali speciali decresce fortemente in vicinanza dello 0 assoluto (metalli) o a temperature comunque inferiori a  $-100^\circ\text{C}$  (ceramiche). Questi ultimi due casi si riferiscono ai così detti "superconduttori".

Per quanto riguarda le rocce in generale il problema è complesso e dipende da molteplici fattori. La resistività elettrica della roccia è tipicamente dell'ordine di  $10^{10} \Omega\text{m}$  e diminuisce all'aumentare della temperatura ma se la roccia fonde la resistività dei minerali fusi diminuisce bruscamente fino ad  $1 \Omega\text{m}$ . Ma indipendentemente dalla temperatura, più alto è il contenuto in fluidi di una roccia e più bassa è la sua resistività ed anche un fluido ad alta temperatura è meno resistivo di uno a bassa temperatura. Dunque in generale la roccia è sempre influenzata dalla temperatura ma la sua resistività è fortemente dipendente dalla presenza di acqua.

Nei modelli geofisici la roccia è comunemente considerata come un mezzo omogeneo e dielettrico (isolante) e la sua resistività può variare in funzione della permeabilità poiché il vero mezzo conduttore (per la presenza di elettroliti) sono i fluidi che possono imbibirne le fratture. La resistività dei fluidi infatti può risultare più bassa della roccia di molti ordini di grandezza.

A temperature inferiori a  $300^\circ\text{C}$  la resistività elettrica delle rocce è controllata principalmente dai seguenti fattori (Manno, 2001): la resistività dei fluidi eventualmente contenuti nelle porosità, il grado di porosità, il grado di saturazione delle porosità, l'ampiezza dei pori comunicanti, l'interconnessione tra i pori. Sempre secondo Manno, a parità di porosità, la variabilità di altri parametri come la granulometria, la mineralogia e il grado di alterazione della roccia, non influisce sull'andamento della resistività in funzione dello sforzo meccanico applicato.

Sembrerebbe dunque che i gradienti di  $T$  e  $P$  possano influire sulla resistività in funzione di quanto possono influire sulla porosità nel caso della pressione e sulla

permeabilità nel caso della temperatura. L'aumento della temperatura infatti riduce la viscosità dell'acqua oltre ad aumentare la mobilità ionica, favorendo in definitiva la riduzione della resistività del fluido.

## Tav. 15

### (1) Attenuazione dell'intensità del campo elettrico

$$E/E_0 = \exp[-2 \times 10^{-3} z \sqrt{f/\rho}] \quad (\text{Telford et al., 1976})$$

dove:  $E_0$  = intensità del campo elettrico alla sorgente  
 $z$  = spessore del mezzo attraversato  
 $\rho$  = resistività del mezzo

### (2) Resistività in un conduttore (a parità di temperatura)

$$\rho = R A / L \quad [\Omega m]$$

dove:  $R$  = resistenza elettrica del conduttore  $[\Omega]$   
 $A$  = area della sezione del conduttore  $[m^2]$   
 $L$  = lunghezza del conduttore  $[m]$

### (3) Legame empirico tra la resistività della roccia e la sua saturazione

espressione di Archie (1942) per la roccia totalmente satura:

$$\rho_R \approx \rho_F \phi^{-m}$$

dove:  $\rho_R$  = resistività della roccia  
 $\rho_F$  = resistività del fluido  
 $\phi$  = rapporto tra volume "vuoto" e volume totale  
 $m$  = indice di valore variabile tra 1,5~2

espressione di Archie (1942) per la roccia parzialmente satura:

$$\rho_R \approx \rho_F \phi^{-m} S^{-n}$$

dove:  $S$  = frazione di saturazione  
 $n$  = indice di saturazione, di valore  $\approx 2$

### (4) Resistività dei fluidi in funzione della temperatura

$$\rho_F(t) = \rho_{18^\circ C} / [1 + \alpha (t - 18)]$$

con:  $\alpha \approx 0,025$

Secondo Archie (1942) è possibile mettere in relazione la resistività della roccia con la sua porosità e la resistività del fluido interstiziale attraverso una formulazione empirica (tav.15/3). Anche la resistività dei fluidi si riduce con la temperatura a causa della maggiore mobilità degli ioni. La funzione (4) nella tavola 15 esprime in modo approssimato questa funzione.

Rispetto a queste condizioni generali c'è da considerare il contributo che potrebbe avere, in assenza di saturazione, la presenza nella roccia di minerali conduttori (metallici) come ad esempio la componente femica dei graniti.

Negli strati più superficiali inoltre le argille umide possono avere un ruolo importante nella propagazione a causa del doppio strato elettrico che le molecole dell'acqua formano intorno alle particelle di argilla e dei fenomeni di scambio cationico che possono rappresentare un percorso conduttivo. Stesso discorso vale per gli specchi d'acqua salata che costituiscono conduttori superficiali.

In conclusione bisogna considerare che la resistività del mezzo non ha nel nostro caso il ruolo fondamentale che gioca nelle applicazioni geofisiche basate sulle correnti elettriche, perché la radiazione EM non ha bisogno di un mezzo di supporto per propagarsi. Un mezzo non conduttore può soltanto causare attenuazione. Di conseguenza la propagazione EM, rispetto alla roccia a temperatura ambiente, potrà soltanto migliorare in funzione della temperatura per  $T > 300^{\circ}\text{C}$  o migliorare in funzione della saturazione per le temperature inferiori. Inoltre potrebbe migliorare in funzione di  $P$  all'approssimarsi del sisma a causa della dilatanza satura. L'efficienza del meccanismo di emissione potrebbe al contrario risultare attenuata in presenza di saturazione, con conseguente ulteriore attenuazione al crescere di  $T$  per la migliore fluidità dei liquidi. Può inoltre essere attenuata dall'aumento di  $P$  nell'imminenza di un sisma se si considera lo scenario della dilatanza satura.

Un'ultima considerazione generale si può fare a proposito della possibilità di individuare la posizione della sorgente del segnale, quindi del volume focale in cui si prepara il sisma. E' noto che qualsiasi tipo di antenna manifesta una scarsa direttività su frequenze così basse e la massima discriminazione azimutale che potrei immaginare avrebbe bisogno di un'antenna magnetica (un grosso induttore su nucleo ferromagnetico con alto rapporto lunghezza/sezione) che comunque indicherebbe una direzione di massima e mai un verso. Però proprio la bassissima frequenza di questa radiazione implica l'insolito vantaggio di corrispondere ad una notevole lunghezza d'onda. Nella banda compresa tra 1 e 12 kHz le lunghezze d'onda delle oscillazioni variano rispettivamente dai 300 ai 25 km, sono quindi dello stesso ordine di grandezza delle distanze tra l'ipocentro e le eventuali stazioni riceventi. Quindi, nell'ipotesi che esista una rete di monitoraggio, ci saranno sempre una frequenza e una stazione tali che il segnale EM per raggiungere la stazione avrà compiuto una sola oscillazione o una frazione di oscillazione. Confrontando ad una data frequenza la differenza di fase con cui il segnale ha investito un certo numero di stazioni poste alla distanza compatibile, dovrebbe essere possibile stabilire le rispettive distanze metriche dalla sorgente. Si tratterebbe di un metodo per certi versi analogo a quello usato in sismologia con i tempi di arrivo dell'onda sismica.

## 5.0 Appendice

### 5.1 Linee guida per l'approfondimento di questo filone di ricerca

Questo lavoro ha fatto luce su alcuni aspetti del fenomeno di emissione EM ma ha aperto nuovi interrogativi. Ha proposto una metodologia di studio ma ne ha evidenziato alcuni limiti. Non è l'inizio e non sarà la fine della ricerca sui precursori EM, ma è un passo che apre nuovi sviluppi in direzioni ancora inesplorate in cui qualunque osservazione potrà essere qualcosa di nuovo e quindi necessaria.

Da questa esperienza si possono trarre alcune indicazioni su quelli che dovrebbero essere gli elementi essenziali ad un ulteriore sviluppo:

- Verifica dell'esistenza di sincronie nella distribuzione temporale degli impulsi delle prove già effettuate ed eventuale esecuzione di ulteriori esperimenti in cui si dovrà avere particolare cura nella costanza dell'incremento di sforzo e nella marcatura dell'effettivo istante di applicazione dello sforzo.
- Verifica della possibilità di interpretare i fenomeni attraverso il paradigma proposto dal modello della *criticità auto-organizzata*.
- Verifica dell'esistenza in natura di una SID (sequenza "disordinata") analoga al modello sperimentale, attraverso la messa a punto di un dispositivo di acquisizione idoneo alla risoluzione dei singoli impulsi. Le soluzioni tecniche sono molteplici e in molti casi intercompatibili:
  - Adeguamento del setting di analisi del software;
  - Adeguamento della memoria di massa;
  - Impiego di schede sonore di ultima generazione che consentono un campionamento alla frequenza di 126 kHz;
  - Impiego di schede di acquisizione speciali ad alta frequenza di campionamento;
  - Impiego di un software "intelligente" in grado di riconoscere ed immagazzinare soltanto il segnale utile. Questo software sarà un passo indispensabile anche per un futuro impiego delle stazioni automatiche nel monitoraggio "preventivo" del precursore EM. Esiste già il "know-how" sulla fenomenologia necessario per l'istruzione di un algoritmo in grado di distinguere i potenziali precursori da ogni altro segnale del panorama radio E-VLF.
- Allestimento di una vera rete di monitoraggio (almeno una maglia) e verifica della possibilità di stimare una distanza ipocentrale con l'integrazione di un dispositivo di monitoraggio della differenza di fase dei segnali ricevuti nelle diverse stazioni.

L'eventuale rilevamento in atmosfera di una emissione naturale di tipo SID potrebbe essere la chiave fondamentale per uno sviluppo della ricerca orientato alla previsione dei fenomeni sismici. In base alle osservazioni fatte in laboratorio la SID ha intensità molto maggiore della SIO e forse proprio per questo è stata osservata con sistematicità. Inoltre la sua evoluzione si protrae nel tempo fino a culminare nel momento della rottura. L'osservazione in atmosfera di un'emissione SID con analogo comportamento, cioè culminante in concomitanza del terremoto, potrebbe consentire una stima più precisa della sua imminenza e rappresenterebbe certamente una prova inoppugnabile dell'associazione tra questi segnali EM e gli eventi sismici.

## 5.2 Riflessioni sulle implicazioni etiche e sociologiche della possibilità di prevedere un sisma

Quello che è stato presentato in questa ricerca è un nuovo approccio allo studio della previsione del terremoto. Soltanto il tempo e il lavoro potranno, forse, vedere un domani l'efficacia di questo o di altri metodi. E' tuttavia interessante e probabilmente anche necessario prendere in considerazione da subito quali effetti potrebbe avere nella società la possibilità di predire un terremoto, a prescindere dal metodo che verrà impiegato.

Fino ad oggi mi pare che gli sforzi maggiori (almeno in Italia) siano stati destinati alla *prevenzione* più che alla *previsione*. Per prevenzione intendo quegli studi destinati alla previsione del danno, alla previsione delle risorse da destinare in caso di danno e alla costruzione antisismica, là dove è prevedibile che il destino arrecherà un danno. Un po' meno si fa per prevedere l'evento, limitando così il danno. Prevedere l'evento infatti significa la possibilità di spegnere in tempo le catene di montaggio, sospendere temporaneamente l'erogazione di gas e corrente elettrica, sospendere le attività nei luoghi pubblici e non ultimo distribuire sul territorio il personale e le attrezzature di primo soccorso *prima* della necessità del soccorso.

E' indubbia l'importanza della costruzione antisismica, dunque l'individuazione delle zone a rischio e quindi ancora un'accurata microzonazione sismica del territorio. Però è anche vero che tra gli "addetti ai lavori" si paventa anche la sola idea astratta della previsione sismica come se si trattasse di una perversione diabolica. Se ne parla sottovoce, si prendono le distanze, si nasconde il lavoro come un male incurabile. Previsione = perversione. Perché?

Quando dopo ogni terremoto significativo viene intervistato in TV qualche responsabile della sorveglianza sismica, sentiamo ripetere sempre la stessa frase: "Non si può prevedere il terremoto". L'affermazione naturalmente è corretta ma... cosa significa? Sappiamo che non si può fare o non sappiamo come fare? La realtà è la seconda, ma la verità - forse - è addirittura una terza: *non si deve fare*.

Diciamo la verità: la previsione implica una responsabilità tremenda, il cui potere distruttivo si avvicina a quello del sisma stesso. Immaginiamo per un attimo di conoscere un metodo abbastanza attendibile e di aver formulato una previsione abbastanza realistica, diciamo al livello delle previsioni meteo (e nella più rosea prospettiva forse non si potrà mai andare oltre). Immaginiamo quindi che il col. Giuliacci diffondesse ufficialmente la previsione in TV: "*Mari localmente mossi, brevi rovesci sparsi, nebbia in val Padana e... terremoto a Roma*". La sola notizia del terremoto a Roma scatenerebbe l'effetto emotivo di una magnitudo 5, la reazione immediata della popolazione potrebbe avere l'effetto, anche materiale<sup>45</sup>, di una magnitudo 6. L'eventuale insuccesso della previsione poi raggiungerebbe una magnitudo 7 che scuoterebbe tutto il Paese travolgendo l'intero apparato scientifico e statale a partire dal governo fino al povero Giuliacci. Tuttavia, il sapere e non aver agito, sarebbe stato corretto se poi il sisma fosse avvenuto davvero? Anche in questo caso si avrebbe una magnitudo 7 dal governo fino a Giuliacci.

Con questo piccolo show abbiamo avuto un'idea di quali sono i veri problemi della previsione, al di là delle difficoltà scientifiche: il corretto uso dell'informazione, la gestione dell'emergenza e la garanzia del successo. Tutto sommato è più

---

<sup>45</sup> Basti pensare a cosa avvenne negli Stati Uniti con la trasmissione radiofonica di Orson Welles "La guerra dei Mondi". Un'inezia in confronto.



“politicamente corretto” un terremoto imprevisto che una falsa previsione o una mancata previsione.

E' probabilmente per questo stesso motivo che il rapporto tra scienziati e appassionati di scienza in questo campo non è idilliaco come in altri. L'astronomia ad esempio trova un ampio seguito negli astrofili, che svolgono come attività amatoriale un lavoro spesso ad altissimo livello che non di rado fornisce importanti contributi alla scienza. E' il caso delle comete, che oggigiorno vengono scoperte in maggior numero dai satelliti infrarossi, ma subito dopo dagli astrofili (specie australiani e giapponesi) e in ultimo, spesso per caso, dagli astronomi. Quasi ogni cometa ha un nome bizzarro come “Iras-Iraki-Alcoch” perché scoperta contemporaneamente da un satellite, da un astrofilo giapponese e da uno australiano. Ma il passaggio di una cometa è un evento straordinario che tutti attendono con interesse e meraviglia. Non è così col terremoto. Chi vorrebbe dare il proprio nome al terremoto di Avezzano? Quale ente istituzionale confermerebbe un allarme? Ma soprattutto, chi altri potrebbe studiare una previsione? Nel nostro paese esistono molti appassionati di questo campo e perfino una rete nazionale amatoriale dal nome un po' difficile da pronunciare (IESN) ma ben distribuita almeno tra il nord e il centro. Tra esperti di discipline parallele (elettrotecnici, radioamatori, astrofili) ci sono molte persone in grado persino di progettare apparecchiature di vario genere e comunque moltissima gente che dopo un lavoro “insospettabile” come l'avvocato o il negoziante si dedica alla manutenzione di una stazione sismica e all'elaborazione dei dati. Esiste dunque una fonte di dati sismici autonoma ed autosufficiente. Ma ad un convegno di questa associazione amatoriale al quale ero spettatore e dove spettatori ed ospiti erano anche rappresentanti degli equivalenti organi istituzionali, ricordo che prima di dar inizio agli interventi fu dichiarato esplicitamente che il loro lavoro non si prefiggeva di prevedere il terremoto e in alcun modo avrebbe favorito la diffusione di allarmismi. Quasi fosse proprio questo, malgrado la loro incredibile competenza ed efficienza, il requisito principale per ottenere il giusto riconoscimento da parte delle Autorità istituzionali. E qui torniamo al problema principale: paradossalmente nei paesi ad alto *rischio sismico* esiste anche un *rischio della previsione sismica*.

A chi dunque è consentito di studiare i metodi di previsione? Chi destina fondi a questo scopo? E quanti in Italia ci stanno realmente lavorando?

Ma facciamo finta per un attimo che il mondo sia perfetto, la ricerca sincera e le risorse disponibili. Immaginiamo che sia stato finalmente trovato un metodo attendibile per predire un sisma. Immaginiamo un metodo non a corto o medio termine ma basato su una dinamica di eventi in modo tale da poter raffinare progressivamente l'approssimazione fino a raggiungere la totale certezza al momento stesso del sisma. Immaginiamo quindi di poterci trovare, all'approssimarsi dell'evento, in grado di formulare una previsione attendibile con l'approssimazione di 24/48 ore, diciamo come una previsione meteo. Cosa cambierebbe ora nel mondo?

A tutta prima non cambierebbe nulla, perché anche un metodo attendibile non sarebbe sfruttabile se la popolazione non fosse pronta a questa novità. E' un problema di educazione civica: la popolazione non è preparata a convivere con un fenomeno distruttivo nella consapevolezza della sua imminenza. Farò un esempio poco serio ma efficace.

Quando avvenne la prima scossa di Colfiorito (26 set 1997, Mg 5.3) mi trovavo a Roma, all'Università, nell'edificio di Chimica Nuova in attesa di essere chiamato per l'esame. Ero seduto sul primo gradino delle scale al secondo piano quando

improvvisamente sembrò di stare in barca: un'onda dolce e leggera cullava l'intero edificio. Deciso che doveva trattarsi di un terremoto, scrutai il corridoio per vedere se gli esami procedevano. In quel momento alle mie spalle un fiume di gente venne giù di corsa dal piano superiore, travolgendomi. Di sopra c'era un convegno in corso. Passò una buona mezz'ora prima che qualcuno iniziasse a risalire e tra questi un'inserviente (credo) che avevo visto scendere affannosamente avvinghiata al corrimano e che ora arrancava sullo stesso corrimano scrutando il soffitto con sospetto. Vedendomi ancora lì mi guardò negli occhi sconvolta e mi disse: «Sei ancora qui? Come sei pallido... sei rimasto impietrito dal terrore!»

Per quanto strano possa sembrare quello era ed è il mio colore naturale, specie nell'imminenza di un esame. La scossa era lenta, l'onda lunghissima, segno che l'epicentro era lontano. Fu breve, e nel tempo necessario a rendersene conto era già terminata. L'intensità MCS sarà stata al massimo di 3. L'edificio era visibilmente in cemento armato ed io ero lontano dalle finestre. Sarei anche sceso se non avessi avuto un esame da fare. L'unico vero pericolo che ho affrontato è stato quello di trovarmi sulla via di fuga dell'evacuazione selvaggia.

E pure ci sono luoghi dove il terremoto è di casa e le popolazioni ci convivono come si può fare con la grandine. In un paese come Norcia (PG), dove tutto ciò che poteva crollare lo ha già fatto e dove tutti hanno già visto almeno una volta le suppellettili schizzare fuori dagli armadi<sup>46</sup>, una scossa anche del 5° grado MCS può suscitare più o meno questa reazione:

- *Ma cos'era, il terremoto?*
- *Si.*
- *Che ore sono?*
- *Le 3 e 10.*
- *Buona notte.*
- *Buona notte.*

Meglio non pensare agli effetti che avrebbe un 5° MCS a Roma, specie se di notte. A parte il fatto che moltissimi edifici si tengono in piedi soltanto perché sono fermi, niente resisterebbe all'isteria della gente. Figuriamoci ad avvisarli un giorno prima. Quest'ultimo piccolo show era uno specchio molto realistico delle differenze culturali che vanno superate per essere preparati all'eventualità di una previsione, anche se naturalmente il problema non va mai sottovalutato.

Torniamo ora ad una riflessione più seria su come potrebbe essere gestita l'emergenza nella possibilità di prevedere l'evento. Prima di tutto l'uso dell'informazione andrebbe messo a frutto gradualmente, iniziando a piccola scala con sperimentazioni nei piccoli centri, come Norcia, dove tutto è più controllabile e la popolazione è più "matura" nei confronti dell'evento. Anche in questo caso, almeno in una prima fase, non sarebbe opportuno diffondere allarmismi. Gli organi statali competenti dovrebbero lavorare a stretto contatto con le autorità locali (il sindaco e i carabinieri) senza pubblicità, come in un'operazione antidroga. La prima fase potrebbe essere quella di un'*assistenza latente*: casualmente, il giorno stabilito, la Protezione Civile sarà in esercitazione, magari sul posto. Le caserme più vicine si troveranno in stato di "prontezza operativa" per esercitazione. L'ospedale locale avrà ottimizzato i turni garantendo la presenza di tutto il personale, causa visita attesa di autorità della protezione civile. Infine tutti i mezzi dei Carabinieri si troveranno già distribuiti sul territorio, pronti a far rapporto via radio sulla situazione locale. Nessun

---

<sup>46</sup> Per tradizione la parete di fondo degli armadi si fissa al muro con fil di ferro e stop. Dove ci sono stoviglie gli sportelli si tengono chiusi a chiave e i ripiani sono inclinati verso l'interno.

allarme dunque ma una prevenzione nel luogo giusto al momento giusto. Se non accadesse nulla, nulla sarebbe successo agli occhi della popolazione, all'infuori del Sindaco e del Comandante dei CC. Ma immaginiamo che il terremoto abbia luogo. Una volta che una popolazione non incline al panico sia divenuta anche consapevole di poter contare su una tempestiva assistenza a tutti i livelli, il problema del terremoto si limita al rischio di trovarsi in luoghi o situazioni inopportuni nel momento critico. E' necessario cioè sapere quando avverrà.

In una seconda fase dunque si potrebbe passare all'*assistenza informata*. Anche se un è po' utopico, immaginiamo cosa potrebbe accadere in un mondo perfetto.

Circolari (fax) negli enti pubblici informano il personale dell'eventualità di una temporanea sospensione del lavoro a causa dell'evento atteso per il giorno seguente. L'allarme, come tutti ormai sapranno, non è immediato ma relativo alle 24/48 ore dal giorno indicato. I locali potranno essere chiusi, ma forse più vantaggiosamente si potrà ottimizzarne le attività. Le scuole ad esempio potrebbero restare aperte ma portare i ragazzi in cortile per le attività ginniche. Questa sarebbe un'importante risorsa per la comunità. Gli ospedali provvederanno ad avere le autoambulanze già pronte alla partenza e tutti i posti letto disponibili già pronti all'accoglienza. I degenti saranno stati trasferiti in località non allertate o in locali sicuri dove il personale è preparato all'eventuale evacuazione. L'evacuazione deve essere l'ultima risorsa, prevista in casi specifici (es. degenti) e solo in ultima analisi, in caso di estrema gravità, potrà essere estesa a porzioni della popolazione ritenute maggiormente a rischio. L'evento atteso infatti potrebbe risolversi in una scossa che non produce alcun danno alle strutture. Nei casi più gravi sarà sufficiente che la popolazione si trovi temporaneamente all'aperto e una volta passata la scossa, anche distruttiva, riceverà la necessaria assistenza sul luogo. Nell'imminenza del sisma le attività industriali dovranno sospendere anche le lavorazioni automatizzate (meglio produrre meno che perdere il prodotto). Nei giorni precedenti le autorità territoriali (polizia municipale e carabinieri) potrebbero avere il compito di notificare ufficialmente tutte le attività industriali (l'equivalente delle circolari statali). Successivamente, nell'imminenza del sisma, dovranno distribuire i propri mezzi radiomobili sul territorio. Al momento del sisma saranno proprio queste pattuglie, con la loro conoscenza capillare del territorio e delle sue peculiarità, a notificare in tempo reale gli altri organi della Protezione Civile sulla situazione locale, magari con l'ausilio dei radioamatori locali<sup>47</sup> per infittire la rete di monitoraggio. Il soccorso sarà così fornito in modo mirato e proporzionato dalle forze di intervento della Protezione Civile.

Rimane infine il problema dell'informazione al privato cittadino, per la quale, oltre ai mass media, esistono già localmente mezzi efficacissimi: il comune, le parrocchie e le radio locali. La notizia diffusa da radio e TV è già un monito ma molto più si potrebbe fare se il cittadino avesse la sicurezza di essere informato sul momento dell'imminenza del sisma, il momento cioè in cui non dovrà trovarsi sotto un tetto o a percorrere viadotti e gallerie. Questa è la vera libertà dalla paura. La popolazione si

---

<sup>47</sup> La potenziale risorsa rappresentata dai radioamatori in questo tipo di eventi catastrofici è sistematicamente sottovalutata. Ogni radioamatore è un operatore già presente sul posto e a conoscenza dei problemi del territorio, dotato delle apparecchiature necessarie a formare una prima rete di informazione e tecnicamente in grado di farle funzionare anche in condizioni critiche (mancanza di alimentazione e di antenna). La competenza tecnica è certificata da un Esame di Stato, l'identità da un nominativo rilasciato dal Ministero delle Poste e la fattiva utilità dipenderebbe soltanto dalla preventiva organizzazione di una rete informativa di emergenza nei ruoli della protezione civile.

troverà già allettata e quindi non “impegnata”, ma la vera sicurezza sarebbe quella di sentir suonare le campane della torre civica e i campanili delle parrocchie quando gli organi scientifici e organizzativi, grazie ad una estemporanea rete di monitoraggio sismico in loco, avranno potuto stabilire che si è nell'imminenza dell'evento. “Imminenza”, beninteso, nel senso anche di un'ora o mezzora ma mai sinonimo di fretta. Allora accadrebbe che semplicemente tutta la popolazione si radunerà in strada, senza la necessità di correre, portando al seguito una normale radiolina FM portatile. Qui aspetterà l'evento come una grandinata che può rovinare il raccolto arrecando un danno finanziario ma mai uccidere la gente. La completa informazione sulla situazione, sull'eventuale fine dell'emergenza e sulle disposizioni della Protezione Civile potrà essere fornita dalle radio private (es. Radio Subasio per l'Umbria) grazie alla loro copertura totale del territorio e alla praticità delle radioline portatili “FM” che sono diffusissime<sup>48</sup> e non richiedono l'uso di corrente di rete. L'erogazione della corrente elettrica, come del gas e, in un primo momento, anche dell'acqua corrente, sarà stata infatti sospesa dalla Protezione Civile nei tempi ritenuti opportuni.

Quando questo sarà possibile in un piccola città come Norcia, allora si potrà gradualmente espandere a centri urbani più grandi, di pari passo con la risonanza della notizia sui mass media e quindi con la crescita della consapevolezza nazionale della possibilità di affrontare un sisma semplicemente “aspettando che passi”. Non sarà più un confronto epico tra lo Stato e il Danno, in cui il cittadino è solo succube. Sarebbe ogni singolo cittadino ad affrontare il “suo” terremoto, assistito dallo Stato per limitare al massimo il danno.

Naturalmente questo è un quadro ideale e fantascientifico, ma le risorse necessarie per affrontare l'emergenza in questo modo non sono diverse da quelle già disponibili e dal punto di vista dei costi forse anche minori di quelle attualmente necessarie. Inoltre in alcuni paesi come il Giappone è anche plausibile che tutto ciò possa davvero verificarsi nel modo ideale. Il problema è soprattutto culturale.

Per ritornare con i piedi per terra possiamo considerare che esistono già oggi alcuni metodi matematici molto elaborati, come il CN e l'M8, in grado di formulare previsioni dall'elaborazione dei dati sismici. Il problema è che la previsione circoscrive aree troppo estese indicando margini di tempo troppo ampi. Il “troppo” va riferito al dispendio richiesto da un intervento di soccorso preventivo, che non sarebbe mai mirato e puntuale come quello che abbiamo immaginato prima. Tuttavia sembrerebbero metodi promettenti e del resto per il momento tutto ciò che si può fare è tentare di risolvere almeno il problema scientifico della previsione, sperando che gli organi politico-scientifici siano abbastanza illuminati da favorire almeno questo passo.

---

<sup>48</sup> Un ruolo tecnicamente più efficiente potrebbero averlo le trasmissioni RAI in Onda Media, ricevibili con le radioline dotate della banda comunemente nota come “AM”. Le Onde Medie infatti non richiedono l'uso dell'antenna estraibile e la bassa frequenza della radiazione consente una penetrazione degli ostacoli tale da raggiungere senza problemi un superstite intrappolato tra le macerie. Purtroppo l'uso della stereofonia nella banda FM ha ridotto notevolmente la diffusione della banda AM, che negli anni '70 era popolarissima. La stessa RAI ha ormai ridotto le sue trasmissioni al solo programma di Radio Uno, riducendo anche il numero dei trasmettitori e la loro potenza. Molto spesso oggi non si sa neppure di avere una seconda banda a disposizione. In questo tipo di applicazione resta tuttavia una risorsa di grande importanza strategica, anche perché, per la propria natura, è utilizzata quasi esclusivamente dalle emittenti di stato.

### 5.3 Ipotesi di trasduzione naturale della radiazione meccanica in elettromagnetica (MEEM)

Si tratta del modello proposto nella tesi di laurea (Nardi, 2001) come alternativo a quello di Mognaschi. L'alternativa consisteva nel non considerare la roccia come un *dielettrico* e nel racchiudere in sé i precedenti tentativi di giustificare l'esistenza delle *correnti telluriche* con il fenomeno piezoelettrico (es. teoria del metodo VAN) con una chiave forse più vicina alla geologia e alla radiotecnica<sup>49</sup>.

Il presupposto di questo modello è quello di riconoscere all'interno della roccia una differenziazione mineralogica a causa della quale essa può essere vista genericamente come una pasta di fondo dielettrica in cui è dispersa una bassa percentuale di elementi conduttori e una pur minima percentuale di elementi attivi (piezoelettrici)<sup>50</sup>. Gli elementi attivi, sotto l'azione di una sollecitazione meccanica, generano cariche che alimentano una corrente che percorre all'interno del dielettrico dei circuiti caotici di tipo sia conduttivo che capacitivo (nelle discontinuità tra i cristalli conduttivi). Queste correnti tenderanno necessariamente ad azzerare la differenza di potenziale attraversando i vari cristalli attivi con circuiti chiusi (*loop*). L'onda elastica ha due fasi opposte. Il materiale è quindi investito da uno sforzo di compressione succeduto da uno sforzo di trazione. I cristalli piezoelettrici sono indotti a generare nella seconda fase un potenziale opposto al primo e la corrente che ne deriva percorrerà nella seconda fase lo stesso circuito in senso opposto. Si è generata così una corrente alternata in un loop.

A questo punto, per quanto poteva apparire surreale, nella roccia sarà accaduto ciò che in elettronica consente di emettere segnali radio. La frequenza della radiazione EM sarà quella dell'onda elastica, ovvero quella del pianto della roccia, se sarà questa la radiazione meccanica che lo ha generato. In questo caso ancora una volta il fenomeno sarebbe una trasposizione elettromagnetica del pianto della roccia e ne manterrebbe le qualità di precursore (cfr. par.1.1) a meno di una condizione ambientale indispensabile che è la composizione mineralogica della massa lapidea. Condizione comunque talmente generica da rispondere largamente al panorama litologico e certamente meno restrittiva di quelle richieste da altri modelli come il VAN. Come minerale piezoelettrico si potrebbe invocare in luogo del quarzo o della tormalina, la silice microcristallina dei diaspri presenti nei calcari.

Dal punto di vista tecnico si pone il problema del rendimento del circuito, sia per la lunghezza degli induttori che per la doppia trasformazione di energia dall'oscillazione meccanica a quella elettrica e ancora da questa in oscillazione elettromagnetica (M-E-EM). Va considerato però che i circuiti hanno andamento caotico tridimensionale e possono risultare piuttosto sviluppati, relativamente al microcosmo mineralogico. Per quanto riguarda il rendimento in generale c'è da considerare che le energie in gioco sono quelle tettoniche che vediamo sprigionarsi nei terremoti. Per quanto si voglia immaginare piccola la percentuale di energia geotettonica trasformata in segnale EM, per una sorgente radio sarebbe comunque moltissima. Non vanno trascurati infine l'alta capacità di penetrazione nei solidi delle frequenze ELF-VLF, l'entità del volume interessato e l'immenso numero di loop che vi si innescherebbe. Queste considerazioni comunque, fatte le debite variazioni, sono necessarie anche agli altri modelli.

---

<sup>49</sup> Semplicemente è la concezione che può averne un geologo radioamatore.

<sup>50</sup> Quarzo, diaspri microcristallini nei calcari, tormalina, ecc.

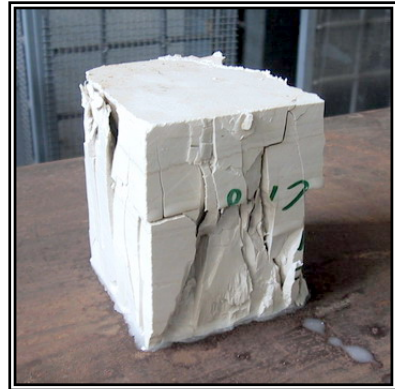
## 5.4 Alcuni esempi di provini rotti per compressione uniassiale



Calcare Massiccio



Calcare Massiccio



Calcare Massiccio



Corniola



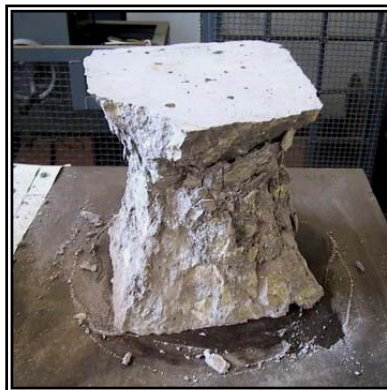
Calcare cristallino



Arenaria Argillosa



Porfido



Calcestruzzo



Graniglia (calcestruzzo)



Granito



Granito (residuo di esplosione)



Gabbro (residuo di esplosione)

## 5.5 Bande radio: suddivisione dello spettro

Lunghezza d'onda (m)	Banda di frequenze	Sigla <sup>51</sup> italiana	Sigla <sup>52</sup> internaz.	Nome <sup>53</sup> comune
-	3 – 30 Hz	-	ULF	-
-	30 – 300 Hz	-	ELF	-
> 100 km	300 – 3.000 Hz	-	VF	-
100.000 – 10.000	3 – 30 kHz	OLL	VLF	-
10.000 – 1.000	30 – 300 kHz	OL	LF	Onde Lunghe (LW)
1000 – 100	300 – 3.000 kHz	OM	MF	Onde Medie (MW o “AM”)
100 – 10	3 – 30 MHz	OC	HF	Onde Corte (SW)
10 – 1	30 – 300 MHz	OCC	VHF	“FM”
01 – 0,1	300 – 3.000 MHz	-	UHF	“TV”
0,1 – 0,01	3 – 30 GHz	-	SHF	“Sat”
0,01 – 0,001	30 – 300 GHz	-	EHF	-

<sup>51</sup> utilizzata sulle vecchie radio di fabbricazione italiana è ormai quasi in disuso perché le serigrafie dei prodotti di larga diffusione sono convenzionalmente in inglese e di rado sono tradotte nella lingua del paese di destinazione.

<sup>52</sup> L'utilizzazione nel campo delle radiocomunicazioni è in realtà limitata alle Onde Lunghe. Per questo motivo al di sotto delle LF non esiste una nomenclatura univoca. Qui è riportata quella utilizzata in questa ricerca ma ne esistono almeno altre due versioni. Soltanto di recente le bande al di sotto dei 30 kHz hanno suscitato un interesse legislativo a causa dei problemi relativi all'elettrosmog.

<sup>53</sup> Nome comune attribuito alle corrispondenti bande di radiodiffusione. La banda delle Onde Medie è spesso impropriamente chiamata “AM” poiché questo è il tipo di modulazione che tipicamente vi si adotta. Per lo stesso motivo sugli apparecchi domestici si usa chiamare impropriamente “FM” la banda di radiodiffusione privata che è localizzata nella gamma delle VHF. Anche “TV” e “Sat” identificano le applicazioni più note delle rispettive bande di frequenza.

## 5.6 Riepilogo dei parametri di analisi dei segnali

### In laboratorio:

Frequenza di campionamento:	44100 Hz
FFT su campioni:	512
Periodo FFT:	$(512 \cdot 1/44100) = 0,01161$ sec
Risoluzione FFT:	$(1/0,01161) = 86,10$ Hz

### In campagna:

Frequenza di campionamento:	44100 Hz
FFT su campioni:	65536
Periodo FFT:	$(65536/44100) = 1,486$ sec
Risoluzione FFT:	$(1/1,486) = 0,67$ Hz
Print della media delle FFT:	ogni 8 sec
N° di FFT mediate:	$(8/1,486 = 5,38) = 5$

In laboratorio il fenomeno è stato studiato con un'alta risoluzione nei tempi e una risoluzione nelle frequenze bassa ma compatibile con il sistema di rilevamento. In campagna invece, per poter registrare dati per tempi lunghi, è stato necessario salvare i valori medi di FFT raccolti in un periodo di 8 secondi. In un certo senso in campagna è stato registrato un campionamento delle FFT.

## 5.7 Glossario dei termini tecnici e delle abbreviazioni

**AM:** *Modulazione d'Ampiezza.*

**AGC:** acronimo inglese di *Controllo Automatico di Guadagno*. Circuito elettronico che amplifica o attenua automaticamente il segnale per livellarne le variazioni di intensità entro limiti ristretti.

**EM:** abbreviazione di *elettromagnetico*.

**Estensimetro:** dispositivo per la rilevazione della deformazione lineare.

**FM:** *Modulazione di Frequenza.*

**Jack:** spinotto coassiale comunemente usato per segnali audio mono o stereo.

**LINE:** ingresso audio (jack) di una scheda sonora riservato al segnale preamplificato. Questo tipo di ingresso solitamente non è provvisto di AGC oppure ha la possibilità di escluderlo.

**MIC:** ingresso audio (jack) di una scheda sonora riservato al segnale proveniente da un microfono. Questo tipo di ingresso solitamente è preamplificato e provvisto di AGC.

**Mixaggio:** miscelazione di canali audio.

**Radiantistico:** relativo all'attività del radioamatore.

**SC:** abbreviazione di *Sound Card* (scheda sonora).

**SID:** *Sequenza Impulsiva Disordinata.*

**SIO:** *Sequenza Impulsiva Ordinata.*

**Soundcard:** hardware che consente ai PC la gestione del suono (scheda sonora).

**SP:** *Sequenza Parossistica.*

**Straingauge:** sensore per misure estensimetriche.



## Bibliografia

- AKINAGA Y., HAYAKAWA M., LIU J.Y., YUMOTO K. E HATTORI K. (2001): *A precursory ULF signature for the Chi-Chi earthquake in Taiwan*, Natural Hazards and Earth System Sciences, 1:33-36, 2001.
- ARCHIE G.E. (1942): *The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics*, Trans. Am. Inst. Min. Metall. Eng., 146, pp. 54-62.
- ASADA T., BABA H., KAWAZOE M., SUGIURA M. (2001): *An attempt to delineate very low frequency electromagnetic signals associated with earthquakes*, Terrapub, EPS, Vol. 53, N. 1, pp. 55-62, 2001.
- BAK P., TANG C. (1989): *Earthquakes as a self-organized critical phenomenon*, Journal of Geophysical Research, Vol. 94, N. B11, pp. 15.635-15.637.
- BELLA F., BIAGI P.F., CAPUTO M., DELLA MONICA G., ERMINI A., PETTINELLI V. E SGRIGNA V. (1993): *Ground tilt variations detected in the Central Appennines in the period 1986-1989 and their correlation with seismicity*, Nuovo Cimento 16C, 303-311, 1993
- BELLA F., BIAGI P.F., CAPUTO M., COZZI E., DELLA MONICA G., ERMINI A., PLASTINO W., SGRIGNA V. (1998): *Field strength variations of LF radio waves prior to earthquakes in central Italy*, Physics of the Planetari Interiors, 105, 279-286, 1998.
- BIAGI P. F., PICCOLO R., ERMINI A., MARTELLUCCI S., BELLUCCI C., HAYAKAWA M., CAPOZZI V. E KINGSLEY S. P. (2001): *Possibile earthquake precursors revealed by LF radio signals*, Natural Hazards and Earth System Sciences, 1:99-104, 2001.
- CAPUTO M. (1987): *Sismologia e segnali precursori dei terremoti*, Ed. Calderini, 1987.
- CAPUTO M.: *Teoria ed analisi numerica e spettrale*, dispense del corso di Sismologia 1998 – Dipartimento di Fisica, Università di Roma “La Sapienza”.
- CASATI P. (1987): *Scienze della Terra*, vol. 2, CLUP 1987.
- CHMYREV V.M., SOROKIN M.V., POKHOTELOV O.A. (1999) [1]: *Theory of small scale plasma density inhomogeneities and ULF/ELF magnetic field oscillations excited in the ionosphere prior to earthquakes*, Ed. M.Hayakawa pp. 759-776, Terrapub, 1999.
- CHMYREV V.M., SOROKIN M.V. (1999) [2]: *Modification of the ionosphere by seismic related electric field*, Ed. M.Hayakawa pp. 805-818, Terrapub, 1999.
- DOBROVOLSKY I.P., GERSHENZON N.I., GOKHBERG M.B. (1989): *Theory of electrokinetic effects occurring at the final stage in the preparation of a tectonic earthquake*, Phys. Earth Planet. Inter. 57, 144-156, 1989.
- EFTAXIAS K., KAPIRIS P., POLYGIANNAKIS J., PERATZAKIS A., KOPANAS J., ANTONOPULOS G. E RIGAS D. (2003): *Experience of short term earthquake precursors with VLF-VHF electromagnetic emissions*, Natural Hazards and Earth System Sciences, 3:217-228, 2003.
- FUKUMOTO Y., HAYAKAWA M. E YASUDA H. (2001): *Investigation of over-horizon VHF radio Signals associated with earthquakes*, Natural Hazards and Earth System Sciences, 1:107-112, 2002.
- GALLI I. (1910): *Raccolta e classificazione di fenomeni luminosi osservati nei terremoti*. Boll. Soc. Ital. Sismologia, 14.
- GLADYECHEV ET AL. (2001): *Study of electromagnetic emissions associated with seismic activity in Kamchatka region*, Natural Hazards and Earth System Sciences, 1:127-136, 2001.
- GRIFFITH A. (1924): *Teory of rupture*, Proc. 1<sup>DT</sup> Int. Cong. App. Mech., Delft.

- ISMAGULIOV V.S., KOPYTENKO Y.A., HATTORI K. E MAYAKAWA M. (2002) *Variations of phase velocity and gradient values of ULF disturbances connected with the Izu strong earthquakes*, Natural Hazards and Earth System Sciences, 3:211-215, 2002.
- KARAKELIAN D., BEROZA G.C., KLEMPERER S.L. E FRASER-SMITH (2000): *Analysis of ultra-low frequency electromagnetic field measurements associated with the 1999 M7.1 Hector Mine earthquake sequence*, BSSA special section on the Hector Mine Earthquake in California.
- KARAKELIAN D., KLEMPERER S.R., THOMPSON J.A. E FRASER-SMITH A.C. (- -): *Results from Electromagnetic monitoring of the Mw 5.1 San Juan Bautista, California earthquake of 12 august 1998*, (rif. mancante).
- LAMBE T.W, WHITMAN R.V. (1979): *Meccanica dei terreni*, Dario Flaccovio, 1979.
- MANNO R. (2001): *Propagazione delle onde radio su terreni sismici*, tesi di laurea in Fisica, Università di Roma "La Sapienza", 2001.
- MIZUTANI H., ISHIDO T., YOKOKURA T., HONISHI S. (1976): *Electrokinetic phenomena associated with earthquakes*, Geophysical Institute, University of Tokyo, Hongo, Tokyo, Japan, 1976.
- MOGI K. (1962): *Study of the elastic shocks caused by the fracture of heterogeneous materials and its relation to earthquake phenomena*, Bull. Earthquake Res. Inst., Univ. Tokyo, 40: 125-173.
- MOGNASCHI E.R. & ZEZZA U. (2000): *Detection of electromagnetic emission from fracture of rocks and building stones under stress*, Atti del "5<sup>th</sup> International Congress on Restoration of Architectural Heritage", Firenze, 17 set. 2000, pp. 553-562.
- MOGNASCHI E.R. (2002): *On the possible origin, propagation and detectability of electromagnetic precursors of earthquakes*, Atti Ticinesi di Scienze della Terra, vol.43, 111-118, 2002.
- MOLCHANOV O., HAYAKAWA M. (1994): *Generation of ULF seismogenic electromagnetic emission: a natural consequence of microfracturing process*, Ed. M.Hayakawa pp. 537-563, Terrapub, 1994.
- MOLCHANOV O., HAYAKAWA M. (1998): *On the generation mechanism of ULF seismogenic electromagnetic emissions*, Phys. Earth Planet. Inter. 105, 201-209, 1998.
- MOLCHANOV O., SCHEKOTOV A., FETOROV E., BELYAEV G. E GORDEEV E. (2002): *Presismic ULF electromagnetic effect from observation at Kamchatka*, Natural Hazards and Earth System Sciences, 3:203-209, 2002.
- NAKAMURA N., NAGAHAMA H. (1999): *Geomagnetic field perturbation and fault creep motion: a new tectonomagnetic model*, Ed. M.Hayakawa pp. 307-323, Terrapub, 1999.
- NAGAO T., ENOMOTO Y., FUJINAWA Y., HATA M., HAYAKAWA M., HUANG Q., IZUTSU J., KUSHIDA Y., MAEDA, K., OIKE K., UYEDA S., E YOSHINO T. (2002): *Electromagnetic anomalies associated with 1995 Kobe earthquake*, J. geodynamics, 33, 4-5, 349-359, 2002.
- NARDI A. (2001): *Evidenze di emissioni elettromagnetiche naturali in rocce sottoposte a sollecitazione meccanica. Un possibile precursore sismico?* Tesi di laurea in Scienze Geologiche, Università di Roma "La Sapienza", 2001.
- NARDI A., CAPUTO M. (2003 a): *Evidence for electromagnetic emission during rock loading and fracture*, 6th Workshop on Non-Linear Dynamics and Earthquake Prediction – ICTP Trieste, 29 sett. 2003.

- Nardi A., Caputo M. (2003 b): *Evidence for electromagnetic emission during rock loading and fracture*, 22° Convegno Nazionale GNGTS – Roma, 18-20 nov. 2003.
- OHTA K., UMEDA K., WATANABE N. E HAYAKAWA M. (2001): *ULF/ELF emissions observed in Japan, possibly associated with the Chi-Chi earthquake in Taiwan*, Natural Hazards and Earth System Sciences, 1:37-42, 2001.
- POPOV L.N., KRAKOVETZKIY Y.K., GOCHBERG M.B., PILIPENKO V.A. (1989): *Terrogenic effects in the ionosphere: a review*, Phys. Earth Planet. Inter. 57, 115-128, 1989.
- RABINOWICZ ERNEST (1977): *Exoelectrons* – Proc. of Mechanical Engineering M.I.T. Boston, Vol. 236 n.1 gen 1977.
- RIKITAKE T. (1986): *Previsione dei terremoti*, Libreria Dario Flaccovio editrice, 1986.
- SCHOLZ C.H., SYKES L.R. E AGGARWAL Y.P. (1973): *Earthquake prediction: a physical basis*, Science, 181: 803-809.
- SERWAY R.A. (I): *Fisica per Scienze ed Ingegneria*, volume primo, EdiSES, 1987.
- SERWAY R.A. (II): *Fisica per Scienze ed Ingegneria*, volume secondo, EdiSES, 2000.
- SMIRNOVA N., HAYAKAWA M., GOTOH K. E VOLOBUEV B. (2001): *Scaling characteristics of geomagnetic ULF fields at the Guam sismoactive area and their dynamics in relation to the earthquakes*, Natural Hazards and Earth System Sciences, 1:119-126, 2001.
- SOLERTI A. (1889): *I terremoti di Ferrara*. Tipografia Estense, Ferrara, 1889.
- STAVRAKAS I., ANASTASIADIS C., TRIANTIS D. E VALLIANATOS F. (2003): *Piezo stimulated currents in marble samples: Precursory and concurrent-with-failure signals*, Natural Hazards and Earth System Sciences, 3: 1-5, 2003.
- SURKOV V. (1999): *ULF electromagnetic perturbations resulting from the fracture and dilatancy in the earthquake preparation zone*, Ed. M.Hayakawa pp. 371-382, Terrapub, 1999.
- TELFORD W.M., GELDART L.P., SHERIFF R.E., KEYS D.A. (1976): *Applied Geophysics*, Cambridge University Press 1976, pag. 860.
- VALLIANATOS F., TZANIS A. (1999): *A model for the generation of precursory electronic and magnetic fields associated with the deformations rate of the earthquake focus*, Ed. M.Hayakawa pp. 287-305, Terrapub, 1999.

## Pagine WEB

- ISTITUTO NAZIONALE DI GEOFISICA E VULCANOLOGIA: [ <http://www.ingv.it> ],  
*Bollettino sismico INGV*: [ <http://www.ingv.it/~roma/reti/rms/bollettino/boll.htm> ].
- ITALIAN EXPERIMENTAL SEISMIC NETWORK: [ <http://www.iesn.org> ],  
*Bollettino sismico IESN*: [ <http://www.iesn.org/boll/quake.txt> ].



## Ringraziamenti

A causa dell'interdisciplinarietà dell'argomento e delle sfavorevoli condizioni in cui è iniziato il lavoro, è appropriato dire, senza timore di cadere nella retorica, che questa ricerca non sarebbe mai stata possibile senza la collaborazione spontanea e preziosissima di numerose persone, alle quali si deve un sincero ringraziamento.

Si ringrazia l'Istituto Sperimentale delle Ferrovie dello Stato nella persona del dott. Vittorio Misano, direttore del Laboratorio Terre di Piazza Ippolito Nievo (ex sede) in Roma, per aver collaborato alla ricerca con la disponibilità dei laboratori e in particolare della pressa da 500 t che è stato lo strumento più importante della nostra ricerca. Ringraziamo inoltre il tecnico Giovèdi e i geologi Giuliani e Ruscio per la professionalità prestata nelle fasi più delicate della lavorazione e il tecnico dell'officina meccanica che ci ha fornito la lastra d'acciaio che ha perfezionato la funzionalità della nostra vasca di saturazione.

Si ringrazia l'ing. Salvatore Perno, responsabile del Laboratorio Prove Materiali del Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica dell'Università di Roma "La Sapienza" (via Eudossiana) ed il tecnico che ci ha assistito in laboratorio, per averci consentito di effettuare la taratura del nostro prototipo di estensimetro capacitivo con la strumentazione di altissima precisione di cui dispongono.

Ringrazio personalmente il Prof. Michele Caputo del Dipartimento di Fisica dell'università di Roma "La Sapienza" per la costante attenzione e la preziosa collaborazione prestate a questo filone di ricerca fin da quando, quasi otto anni fa, fu il suo insegnamento a far sì che la piccola idea di un radioamatore si trasformasse in una ricerca scientifica, poi divenuta una tesi di laurea ed ora una tesi di dottorato.

Devo inoltre ringraziare i professori C. Chiarabba, C. Doglioni e S. Lucchesi del DST della Sapienza per aver reso materialmente possibile lo svolgimento di uno studio che per motivi indipendenti dalla mia volontà non era iniziato nelle migliori condizioni di lavoro. Inoltre, col senno di poi, sento di dover ringraziare il prof. Lucchesi per essere riuscito a farmi cambiare idea quando ero assolutamente certo che l'unico modo per proseguire seriamente la ricerca fosse quello di abbandonare il dottorato.

Si ringrazia la rete sismica amatoriale IESN [ [www.iesn.org](http://www.iesn.org) ] nelle persone di Pierottavio Ottaviani e Francesco Nucera. In particolare ad Ottaviani si deve la disponibilità del sito di Castelluccio di Norcia (PG), già sede di una stazione della rete IESN, dove è stata installata la più alta in quota delle nostre antenne VLF.

Ringrazio Benedetto Pillonca (mio zio materno) per la disponibilità del sito di Frascati (RM) dove è stata installata la nostra prima stazione automatica. Con volontà e fiducia ne ha sorvegliato costantemente l'attività fin quasi al giorno della sua improvvisa scomparsa. Ringrazio inoltre il mio amico fisico dott. Rodolfo Manno per la consulenza professionale e per il materiale bibliografico che ebbi occasione di scambiare con lui ai tempi in cui entrambi preparavamo la tesi di laurea. Ancora oggi, dopo anni e malgrado la sua tragica scomparsa, mi è stato di grande aiuto.

Alla memoria di entrambi è dedicato questo lavoro, se mai qualcosa di buono e di utile esso potrà offrire alla comunità scientifica e agli appassionati di questo campo.