

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI ROMA "LA SAPIENZA"  
FACOLTÀ DI SCIENZE MM.FF.NN  
CORSO DI LAUREA IN SCIENZE GEOLOGICHE

TESI DI LAUREA

**EVIDENZE DI EMISSIONI  
ELETTROMAGNETICHE IN ROCCE  
SOTTOPOSTE A SOLLECITAZIONE  
MECCANICA. UN POSSIBILE  
PRECURSORE SISMICO?**

RELATORE:

PROF. GIUSEPPE DE NATALE (OSS. VESUVIANO, NAPOLI)

CORRELATORI:

PROF. MICHELE CAPUTO (DIPARTIMENTO DI FISICA, ROMA1)

PROF. GABRIELE SCARASCIA MUGNOZZA (DIP. SCIENZE DELLA TERRA, ROMA1)

CANDIDATO:  
ADRIANO NARDI  
MATR: 11081973

**ANNO ACCADEMICO 1999-2000**



**Prima Tesina (Fotogeologia):**

*“Su particolari forme della superficie di Marte che evidenziano la presenza di acqua liquida sul pianeta”*

Relatore: prof. Alessandro Biasini

**Seconda Tesina (Paleontologia):**

*“Analisi dei metodi matematici per la discriminazione dei trackmakers”*

Relatore: prof. Umberto Nicosia



# SOMMARIO

|   |           |
|---|-----------|
| <b>RIASSUNTO</b>  | <b>7</b>  |
| <b>1 - PREMESSE E MOTIVAZIONI DI QUESTA RICERCA</b>                         | <b>9</b>  |
| 1.1 - Lo spunto iniziale  | 9         |
| 1.2 - La radiazione naturale in banda E/VLF                                 | 14        |
| 1.2.1 - Inquadramento della gamma di frequenza su cui opera il radiogeofono | 14        |
| 1.2.2 - "Radio Natura"  | 15        |
| 1.3 - Origine dei segnali   | 16        |
| 1.3.1 - L'ipotesi radiosismica  | 17        |
| 1.3.2 - Altre possibilità: il modello "Mognaschi"                           | 23        |
| 1.4 - L'ipotesi radiosismica nell'ambito dei fenomeni precursori            | 24        |
| 1.4.1 - I precursori sismici  | 24        |
| 1.4.2 - La teoria della dilatanza   | 26        |
| 1.4.3 - Dilatanza non satura ed alcuni aspetti paradossali                  | 33        |
| 1.4.4 - Dilatanza rivisitata  | 35        |
| 1.4.5 - Il vantaggio del metodo radiosismico                                | 36        |
| 1.4.6 - Confronto con il metodo VAN   | 38        |
| 1.5 - Lo stato attuale delle conoscenze                                     | 42        |
| <b>2 - APPARECCHIATURE E TECNICHE UTILIZZATE</b>                            | <b>49</b> |
| 2.1 - Il ricevitore (radiogeofono) "GAIA-4"                                 | 49        |
| 2.2 - Il sistema acquisizione dei dati                                      | 54        |
| 2.3 - Procedura di analisi dei dati   | 57        |
| 2.3.1 - Attrezzatura  | 58        |
| 2.3.2 - Procedura   | 60        |
| 2.4 - Cenni di teoria   | 67        |
| 2.4.1 - Natura e caratteristiche dei segnali                                | 67        |
| 2.4.2 - Il campionamento digitale   | 75        |
| 2.4.3 - Analisi spettrale   | 80        |
| <b>3 - SPERIMENTAZIONE</b>  | <b>95</b> |
| 3.1 - Sperimentazione in sito: esplosione di mine in volata                 | 96        |
| 3.1.1 - Scopo e descrizione dell'esperimento                                | 97        |
| 3.1.2 - Procedura e modalità di registrazione                               | 105       |
| 3.1.3 - Risultati   | 109       |
| 3.2 - Indagini in laboratorio: rottura per compressione uniassiale          | 126       |
| 3.2.1 - Scopo e descrizione dell'esperimento                                | 127       |
| 3.2.2 - Procedura e modalità di registrazione                               | 130       |
| 3.2.3 - Risultati   | 148       |

|  |            |
|--|------------|
| <b>4 - OSSERVAZIONI GENERALI</b>                               | <b>165</b> |
| 4.1 - Distribuzione spettrale e forma d'onda                   | 165        |
| 4.2 - Sequenze tipo  | 171        |
| 4.3 - Relazione con l'esperimento di Mognaschi                 | 176        |
| 4.4 - Conferme dirette   | 178        |
| 4.5 - Conclusioni  | 182        |
| <b>5 - BIBLIOGRAFIA</b>  | <b>185</b> |
| <b>6 - APPENDICE</b>   | <b>187</b> |
| 6.1 - Schema a blocchi del sistema di acquisizione dei dati    | 187        |
| 6.2 - Analisi dei segnali: formulario e riepilogo dei termini  | 188        |
| 6.3 - Software e hardware: glossario dei termini e delle sigle | 192        |
| 6.4 - Bande radio: suddivisione dello spettro radio            | 194        |

## Riassunto

In questa tesi si intende presentare i risultati di una sperimentazione condotta sia in laboratorio che su rocce in sito, tendente a dimostrare l'esistenza di emissioni radio a bassissima frequenza (bande ELF, VF, VLF) in associazione alla sollecitazione meccanica di masse litoidi. Questo effetto supporta l'ipotesi che ha motivato sia la costruzione dell'apparecchio utilizzato nella rilevazione dei segnali che la tesi stessa: la possibilità di individuare nei segnali radiosismici un fenomeno precursore attendibile. L'effetto però si può estendere al monitoraggio della stabilità di versanti rocciosi (eventuale previsione di frane) e ad altre applicazioni geologiche di monitoraggio e prospezione.

Il metodo consiste nello studio della radiazione elettromagnetica naturale in banda acustica (20 Hz – 20 kHz) in quanto questa si adatta più facilmente all'ordinaria disponibilità dei mezzi hardware e software. Ciò lo rende particolarmente accessibile a basso costo. Il fenomeno all'origine di queste emissioni può avere diversi modelli di interpretazione. Qui si farà riferimento in particolare a quello proposto dal candidato, senza tuttavia trascurare altre possibilità. Il rilevatore, chiamato "radiogeofono", è stato costruito dal candidato appositamente per questo scopo. La sperimentazione in sito si è svolta in una cava di *calcarea massiccio* su fronti abbattuti da volate di mine. La sperimentazione in laboratorio si è svolta su campioni di varie litologie (*calc.massiccio*, *calcarea a rudiste*, *scaglia variegata*, *porfido*) sottoposti a compressione uniassiale. Oltre al radiogeofono sono stati impiegati sensori aerei e apparecchiature radio convenzionali per monitorare: onda acustica, onda di pressione, emissioni elettromagnetiche nelle bande HF e UHF.

Le registrazioni analogiche sono state convertite in campionamenti digitali per poter essere sottoposte a processi software di filtraggio ed analisi numerica (oscillogrammi e spettrogrammi).

Sono stati rilevati segnali emessi dalla roccia associabili alla variazione dello stato tensionale e alla successiva fratturazione sia in condizione di distensione (esperimenti in cava) che di compressione (esperimenti in laboratorio). E' stato verificato che in banda E-VLF i segnali premonitori della rottura si possono rilevare sistematicamente. Tali emissioni hanno un'intensità massima in banda radioacustica che decresce all'aumentare della frequenza diventando quindi molto bassa sulle bande radiofoniche di maggiore utilizzazione. Il meccanismo di emissione, qualunque esso sia, si è dimostrato più o meno efficiente in funzione del tipo di roccia e delle condizioni di sforzo che la portano alla rottura.

Lo studio delle emissioni elettromagnetiche naturali in banda ELF e VLF si è dimostrato dunque un metodo particolarmente promettente al fine di prevedere un sisma o comunque la rottura di una massa litoide.



# 1 - PREMESSE E MOTIVAZIONI DI QUESTA RICERCA

## 1.1 - LO SPUNTO INIZIALE

Lo studio presentato in questa tesi, l'apparecchiatura usata e l'idea stessa di associare il terremoto a segnali elettromagnetici derivano quasi casualmente da un proposito iniziale completamente estraneo: quello di costruire un radiotelescopio amatoriale. Ai tempi del liceo pensai infatti di fondere le mie due grandi passioni (l'astronomia e la radio) nel tentativo di costruire un radiotelescopio che fosse tecnicamente alla portata di un radioamatore e soddisfacente almeno per un astrofilo.

Il primo problema che mi posi fu quello della frequenza. Conoscendo bene la ripartizione dei servizi radio su tutto lo spettro, appariva evidente che tutte le bande facilmente accessibili (LF, MF, HF, VHF) erano sature di stazioni operanti con regolarità mentre al contrario le bande ancora abbastanza "pulite" come la UHF (erano gli anni '80) le EHF e SHF richiedevano una tecnologia al di fuori della mia portata. Non ero in grado infatti di realizzare un circuito sufficientemente stabile su frequenze superiori alla banda VHF. Iniziai così a studiare la possibilità di utilizzare l'estremo inferiore dello spettro, partendo dalle LF in giù (<300 kHz).

La cosa divenne particolarmente attraente quando pensai di utilizzare frequenze talmente basse da corrispondere, come ordine di grandezza, allo spettro acustico. In questo range ( 20 Hz – 20 kHz ) si presentava infatti la possibilità di udire direttamente l'onda elettromagnetica senza la necessità di un rivelatore!

Ascoltare l'onda pura, quella cioè che solitamente era l'onda "portante", mi appariva come l'estrema realizzazione dello spirito radiantistico. Al contrario l'idea in sé fu criticata da tutti i radioamatori con cui ebbi modo di consultarmi, come se fosse assurda o addirittura ridicola.

In realtà funzionò fin dal primo tentativo, anche se non me ne accorsi subito<sup>1</sup>.

Intanto però studiavo le basse frequenze impiegando anche un ricevitore multibanda. In particolare mi appassionai ai fulmini e fu proprio in questo contesto che casualmente intercettai un radiodisturbo generato, in cucina, dall'accendino dei fornelli a gas. Con il meccanismo di quell'accendino, usato nei modi più bizzarri e impropri, riuscii a simulare ogni tipo di scarica che avevo potuto classificare nello studio dei fulmini. Non conoscevo il fenomeno piezoelettrico ma naturalmente non ci volle molto a capire che quell'oggetto non funzionava a batteria.

Così mi posi subito quella domanda alla quale solo ora tento di rispondere: se schiacciare una "pietruzza" poteva generare una scintilla e un segnale elettromagnetico, perché un terremoto non avrebbe potuto fare altrettanto? Qui iniziò il sospetto che un terremoto si potesse ascoltare in radio e soprattutto in quello strano ricevitore. Più tardi, nel corso degli studi universitari, rivalutai l'ipotesi constatando che ogni disciplina (mineralogia, petrografia, geofisica) sembrava fornire qualche spunto e qualche indizio favorevole. Iniziò allora a comporsi l'ipotesi "radiosismica" (cfr. par.1.3) secondo la quale le vibrazioni meccaniche che precedono la rottura ("pianto della roccia") potevano produrre radiazione EM di frequenza pressoché

---

<sup>1</sup> Ricevevo soltanto un forte ronzio di "alternata". Non immaginavo che la corrente di rete potesse emettere un segnale fortissimo e in un primo tempo fui convinto che il disturbo provenisse dall'alimentatore, per quanto l'avessi stabilizzato e filtrato in modo esagerato.

acustica. Fu allora che il radiotelescopio “Prometeo” si tramutò in “Gaia”, un apparecchio che ho definito *radiogeofono*.

Ancora più tardi, nel corso della mia ricerca personale, trovai in Internet alcuni studi del prof. Michele Caputo ed altri (cfr. par.1.5, “Geofisica della terra solida“) e andai a visitare il professore nel suo ufficio del D.F. (La Sapienza, Roma) per avere informazioni più dettagliate sull’argomento. Pensavo infatti che i tre effetti evidenziati in quelle ricerche (variazioni del campo elettrico e magnetico, segnali sismoacustici) potessero essere tre aspetti di un unico fenomeno, quello radiosismico. Il professore si mostrò subito molto disponibile, curioso e soprattutto paziente (non è facile per chi studia Geologia esprimersi in modo adeguato su questi argomenti) tanto che l’idea non fu presa con scetticismo. Al contrario, constatato che disponevo già di un’apparecchiatura idonea, mi fu proposto di collaborare in una tesi di laurea.

Successivamente, proprio su indicazione del prof. Caputo, contattai il prof. Vittorio Sgrigna (D.F. Roma 3) che, occupandosi della radiazione di Cerenkov come precursore sismico, mi illustrò la sua ipotesi sull’emissione EM per cause sismiche, sostanzialmente conforme a quella del prof. Mognaschi (cfr. par.1.3.2). Sgrigna però si rivelò piuttosto scettico sul mio progetto, prevalentemente per due ragioni:

- Riteneva che tale radiazione, disperdendosi su tutto lo spettro, non potesse essere irradiata con sufficiente potenza. Mi fece notare infatti che una stazione radio concentra tutta la sua energia su una banda strettissima.
- Non riteneva possibile che le radiazioni U/E/VLF potessero permeare la litosfera abbastanza facilmente da poter raggiungerne la superficie a causa di motivi “di

cui avevano già discusso in precedenza” (e che io probabilmente non potevo capire).

Questo incontro fu piuttosto scoraggiante ma non abbastanza da farmi desistere. Sapevo per esperienza che le stazioni radio tedesche in LF si potevano agevolmente ascoltare da Roma per onda di terra (attraversando l’orizzonte e le Alpi) e che la potenza massima di queste stazioni era dell’ordine delle centinaia di kW.

- Anche se il meccanismo di trasformazione delle vibrazioni meccaniche in radiazione EM avesse avuto un bassissimo rendimento, l’energia erogata da un fenomeno sismico non era forse abbastanza elevata da poter competere con una “Rundfunk” ?
- A parità di energia, se in banda LF le radiocomunicazioni coprono centinaia di km per onda di terra, come potrebbero non coprirne 80 (il massimo richiesto per la litosfera) radiazioni che notoriamente sono più penetranti ?

Infatti (in generale) la capacità di penetrare gli ostacoli aumenta con la lunghezza d’onda e raggiunge i livelli massimi proprio su queste bande. Inoltre in ULF si verifica una risonanza con l’atmosfera terrestre (frequenza di Schumann) tale che la radiazione può teoricamente circolare all’infinito senza subire alcuna attenuazione. Tutto ciò avrebbe favorito la ricezione anche a grande distanza dall’ipocentro.

Inoltre avevo dalla mia l’esperienza di un amico radioamatore che mi contattò dopo aver letto in Internet delle mie ricerche. Questi era il prof. Mognaschi, (D.F. Univ. di Pavia) che, indipendentemente, aveva già condotto con successo esperimenti in

banda OM. Questo mi diede la convinzione che a maggior ragione si potevano ottenere i risultati sperati sulle frequenze “radioacustiche”.

La prospettiva di una tesi di argomento geofisico con un fisico come relatore appariva folle da un lato, ma anche l’opportunità unica e inattesa di poter sviluppare la mia ricerca nel modo più appropriato. L’obiettivo di registrare in condizioni strettamente controllate segnali ufficialmente inesistenti appariva una scommessa sulla quale non era il caso di giocare la tesi di laurea, ma allo stesso tempo l’esperienza del prof. Mognaschi sulle Onde Medie dava valido supporto alle aspettative. Fu così che da un radiotelescopio amatoriale e un’idea strampalata (derivante dall’associazione di nozioni acquisite dalle fonti più disparate e spesso estranee al corso di laurea) nacque questa tesi di geologia, nella quale io stesso non saprei riconoscere il confine tra geologia, fisica e radiantismo.

## **1.2 - LA RADIAZIONE NATURALE IN BANDA E/VLF**

### **1.2.1 - INQUADRAMENTO DELLA GAMMA DI FREQUENZA SU CUI OPERA IL RADIOGEOFONO**

Le trasmissioni di radiodiffusione internazionale (stazioni Broadcastings) e tutti i servizi in fonia terminano nella banda delle onde lunghe (OL, 30-300 kHz) in quanto la modulazione di frequenze più basse richiederebbe una larghezza di banda eccessiva. Frequenze al di sotto di questa banda si impiegano esclusivamente per la trasmissione di messaggi in CW (morse), RTTY (telescrivente) e FAX. Si tratta di agenzie di stampa, stazioni meteorologiche, stazioni di tempo e frequenza campione, radiofari per la navigazione e stazioni militari di vario genere.

In Europa il traffico civile termina in VLF con la stazione campione inglese GBR su 19,5 kHz. Al di sotto sarebbero ancora autorizzate trasmissioni per la radionavigazione fino ai 9 kHz. Sotto questa soglia, e per tutti i paesi, l'utilizzazione è libera e non riservata ad alcun servizio particolare. Di fatto sotto i 9 kHz non si riceve alcun segnale artificiale se non, raramente, stazioni militari non ufficialmente riconosciute. Presumibilmente si tratta di segnali inviati da terra ai sottomarini in immersione (Norad e stazioni Cutler, USA). Si dice che in ULF gli USA riescano a comunicare in CW fin nelle profondità abissali per onda diretta e senza l'interferenza dei fenomeni ionosferici.

Nella fig.1 sono raffrontati gli spettri elettromagnetico e acustico in relazione alla copertura del Radiogefono nelle varie modalità operative.

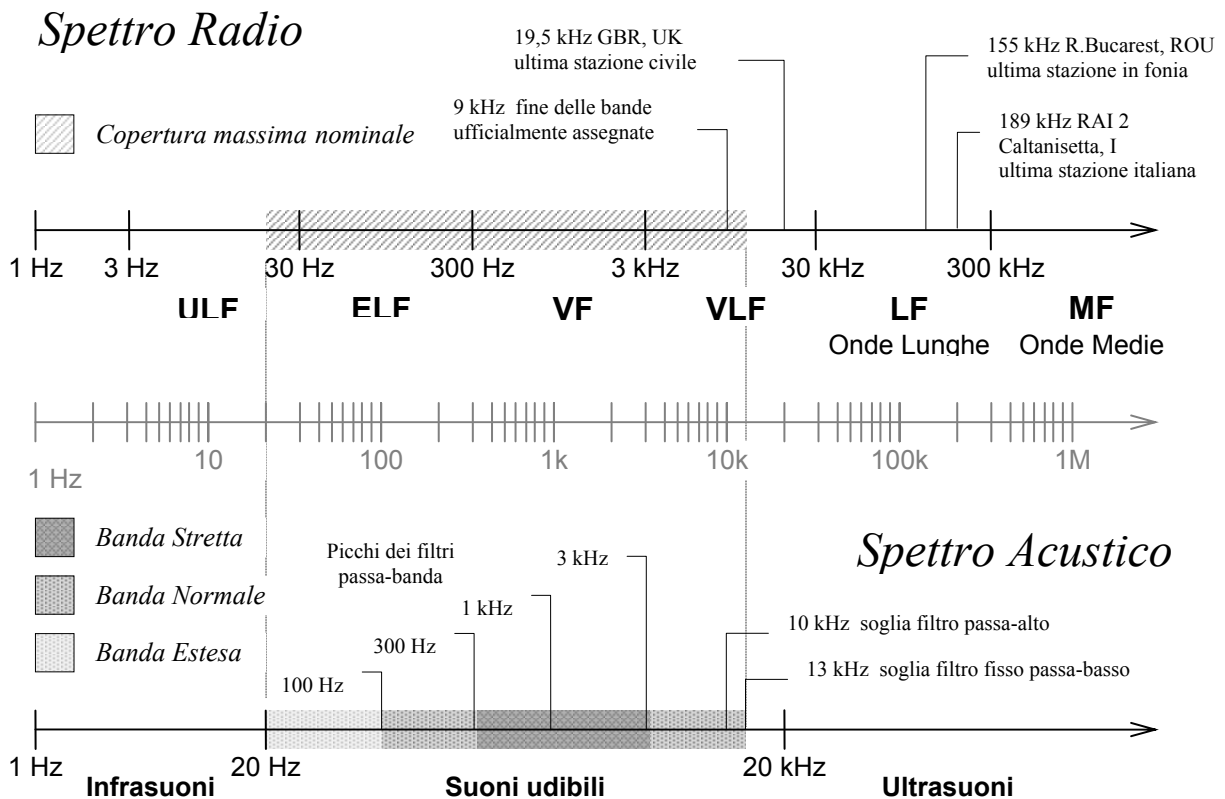


Fig.1 - Corrispondenza dello spettro radio a bassissima frequenza con lo spettro delle frequenze acustiche. Le oscillazioni sono di natura diversa ma interessano la medesima gamma di frequenze. In questo schema sono indicate anche la copertura del radiogeofono e le sue varie modalità operative.

### 1.2.2 - “RADIO NATURA”

Se le bande al di sotto dei 9 kHz sono ufficialmente “non utilizzate” nelle radiocomunicazioni, esiste tuttavia in tutto il mondo un certo numero di “ascoltatori” che monitorizzano le basse frequenze alla ricerca di suoni particolari emessi dai fenomeni naturali. Si tratta di alcuni radioamatori-ricercatori, appassionati di quella sorprendente emittente che viene chiamata *Radio Natura*. Esiste un’ampia fenomenologia, classificata per lo più in modo qualitativo. I segnali isolati hanno solitamente nomi onomatopeici o metaforici per descrivere i suoni o le loro impronte

spettrali. Anche i radioamatori infatti sono soliti studiare gli spettri di queste emissioni attraverso programmi molto diffusi come SpectroGram<sup>2</sup>.

Tra i fenomeni più diffusi ricordiamo i “fischi” (whistlers) generati dai fulmini, gli “uncini” (hook) legati all’attività ionosferica, i “cori” (corus) legati spesso alle aurore polari, i “soffi” (hiss) che spesso sono associabili a fenomeni sismici e la “statica” (sferics) causata dall’elettricità statica ambientale.

L’attività dei radioamatori non si limita certo all’ascolto contemplativo ma esistono organizzazioni più o meno grandi che pianificano campagne di ricerca. I segnali vengono sistematicamente registrati, analizzati e correlati con l’obiettivo di identificarne le caratteristiche tipologiche, il fenomeno di origine e (questo non manca mai) le modalità di propagazione<sup>3</sup>.

### **1.3 - ORIGINE DEI SEGNALI**

Perché un terremoto dovrebbe generare segnali elettromagnetici?

Quella che segue, e che chiamai “teoria radiosismica”, è l’ipotesi sulla quale ho basato l’approccio radiantistico<sup>4</sup> alla sismologia. Non è ne’ l’unica, ne’ la migliore delle possibili spiegazioni sull’origine di segnali “radiosismici”. E’ semplicemente

---

<sup>2</sup> Sembra tuttavia che il mondo della fisica tende ad ignorare queste testimonianze e a rifiutarsi di concepire la possibilità che qualcuno “non fisico” possa parlare di frequenze e di spettri.

<sup>3</sup> Praticamente esiste già una rete mondiale di stazioni radiosismiche, a costo zero, gestita da personale tecnicamente competente e la cui organizzazione è già latente. Basterebbe soltanto prenderla in considerazione.

<sup>4</sup> Relativo all’attività di radioamatore.



quella che più facilmente può essere concepita da un radioamatore studente di geologia. I risultati di questa tesi non dovranno necessariamente confermare questa ipotesi. Lo scopo della tesi del resto non è quello di spiegare la natura delle emissioni ma solo di provarne l'esistenza e le potenzialità.

### **1.3.1 - L'IPOTESI RADIOSISMICA**

Ciò che ora si tenterà di dimostrare è che il fenomeno sismico può essere legato in due tempi all'emissione di onde elettromagnetiche a bassissima frequenza da parte di tutto il volume roccioso interessato al fenomeno stesso. Si avranno emissioni radio su frequenze acustiche e ultrasoniche prima del terremoto ed acustiche ma prevalentemente infrasoniche durante la scossa.

Per semplicità si consideri inizialmente il caso di un terremoto in atto ed il solo effetto delle onde P. L'onda sismica produrrà una variazione di volume che si propaga nella litosfera. La roccia interessata, indipendentemente dalla sua natura, può essere vista come una miscela di cristalli che possiedono caratteristiche fisiche diverse secondo la specie mineralogica.<sup>3</sup>

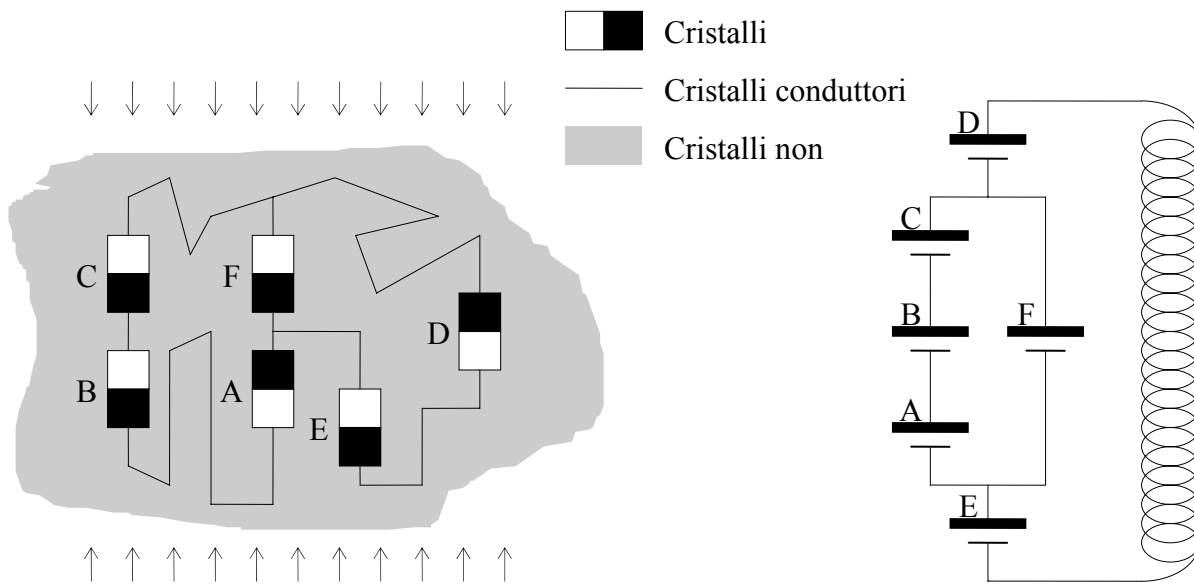
---

<sup>3</sup> Comunemente si ritiene il materiale roccioso intrinsecamente non conduttore ma se ne considera la conducibilità in relazione alla quantità di acqua che lo permea. Questa visione invece valuta le caratteristiche dei singoli minerali e la conducibilità della roccia ne risulta indipendente dalla presenza di acqua. Nei materiali lapidei l'acqua non permea realmente il volume, cioè non riempie innumerevoli interstizi come nelle sabbie, ma circola esclusivamente all'interno di fratture localizzate. Anche un materiale altamente permeabile è in realtà "asciutto" nella maggior parte del suo volume e dunque la conducibilità "mineralogica" non è condizionata dalla presenza dell'acqua.

Prendiamo in esame un modello di roccia (abbastanza realistico) in cui la maggior parte dei minerali manifesti scarsa conducibilità elettrica, una certa parte abbia una buona conducibilità e soltanto una minima parte presenti proprietà piezoelettriche<sup>4</sup>.

L'onda P produrrà in questa miscela alternativamente una compressione e una dilatazione. Durante la fase compressiva i minerali piezoelettrici produrranno accumulazioni di cariche opposte sulle superfici opposte delle facce ortogonali agli assi binari<sup>5</sup>. Queste differenze di carica verranno compensate da un flusso di elettroni attraverso i cristalli conduttori (che saranno pochi e sparsi a caso) in un circuito lungo e tortuoso che tenderà ad azzerare la differenza richiudendosi su sé stesso.

Il risultato può essere visto come un circuito elettrico in cui numerose batterie siano collegate in serie e in parallelo lungo un percorso casuale fino a che il circuito non riesca a chiudersi scaricandole (fig.2).

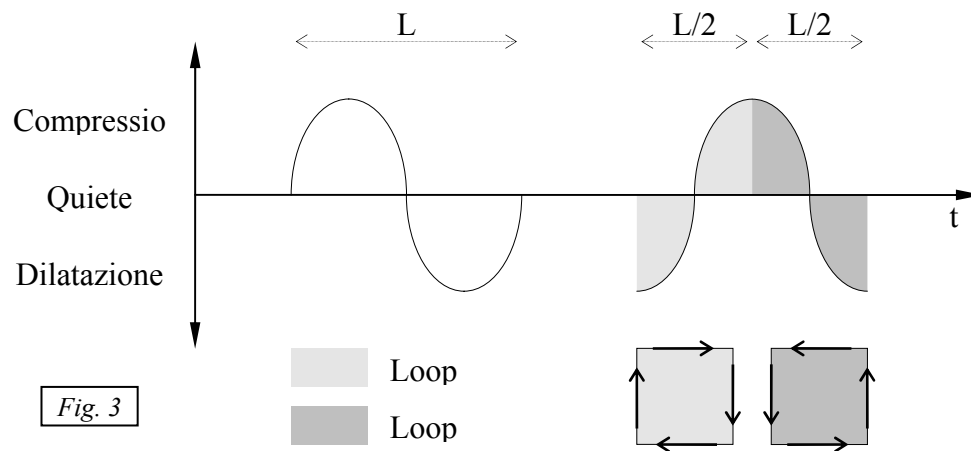


*Fig.2 - Rappresentazione simbolica del meccanismo radiosismico: in una roccia sottoposta a compressione (a sinistra) i minerali conduttori immersi in una pasta di fondo nonconduttiva formano circuiti caotici che collegano i cristalli piezoelettrici che causano la tensione elettrica. Il fenomeno è rappresentabile con un circuito elettronico (a destra) nel quale ad ogni ciclo compressione-distensione si invertirà la polarità delle batterie.*

<sup>4</sup> Il miglior candidato tra i cristalli piezoelettrici è naturalmente il quarzo ma considerando che teoricamente hanno questa proprietà quasi tutti i cristalli acentrici (20 classi cristallografiche su 32, cfr. Mottana pag. 316) c'è da ritenere che molte specie mineralogiche (es. la tormalina) possano sostituire o coadiuvare il ruolo del quarzo.

<sup>5</sup> L'effetto piezoelettrico si esplica con modalità dipendenti dalle caratteristiche geometriche del cristallo (cfr. Mottana, pag. 316).

La successiva fase distensiva troverà una situazione ormai neutra ed agirà dilatando i cristalli e causando di nuovo la formazione di cariche ma di segno opposto alle precedenti. Un nuovo flusso si innescherà così nel circuito precedente ma in senso inverso fino ad azzerare di nuovo la differenza di carica. In sintesi il terremoto avrà prodotto all'interno della roccia numerosi loop percorsi da corrente alternata con la stessa frequenza dell'onda sismica che li ha innescati (fig.3).



*Fig.3 - Successione dei cicli compressione-distensione in relazione con il verso dei radioloop (naturalmente l'associazione di un determinato stato tensionale con un determinato verso è casuale).*

Considerando che i cristalli piezoelettrici sono poco abbondanti e che il percorso elettrico che li collega non è lineare ma caotico, la lunghezza dei loop sarà molto maggiore del perimetro minimo che unisce i cristalli attivi interessati. Ma questi loop, essendo percorsi da corrente alternata, produrranno un campo elettromagnetico con l'emissione di onde alla stessa frequenza della corrente che lo ha indotto.

Considerando che le lunghezze d'onda in gioco sono dell'ordine del km, si può ritenere che il rendimento di questi loop come emettitori di segnale elettromagnetico non sia davvero ottimale. Tuttavia c'è da considerare l'enorme numero di elementi

attivi e la vasta estensione del volume attivo (tutto il volume focale per i fenomeni precursori e successivamente tutto il volume di litosfera interessato dal sisma) nonché l'enorme energia sprigionata dal fenomeno tettonico. Anche un bassissimo rendimento potrebbe essere significativo.

In conclusione si potrebbe ritenere che una scossa di terremoto possa indurre nella litosfera l'emissione di segnale elettromagnetico di frequenza uguale a quella dell'onda sismica per un processo concatenato di trasferimento di energia da oscillazioni meccaniche ad oscillazioni elettriche ad oscillazioni elettromagnetiche.

Tutto il volume di roccia interessato dalla scossa sismica diverrà un'unica antenna formata dalla somma di numerosissimi radioloop. Ogni ciclo compressione-decompressione produrrà un segnale della medesima frequenza man mano che si propaga e dunque si avrà un centro di emissione elettromagnetica (ipocentro) che si trasformerà in una superficie di emissione (fronte dell'onda sismica) producendo un segnale radio fino all'esaurimento dell'energia disponibile per la trasformazione.

Nel caso delle onde S si può ipotizzare un processo analogo prodotto però dalla triboelettricità.

Applicato alle vibrazioni acustiche del "pianto della roccia", questo meccanismo si presta anche ad ipotizzare l'esistenza di segnali radio precedenti alla scossa e dovuti all'accumulo delle tensioni nel volume focale. In questo caso l'emissione avverrebbe esclusivamente nell'ipocentro, avrebbe una frequenza molto più elevata e, rientrando nel range delle audiofrequenze, sarebbe resa direttamente udibile dal Radiogeofono.

Se la vibrazione meccanica del "pianto", a causa della sua alta frequenza, subisce un'attenuazione troppo elevata prima di raggiungere la superficie, la corrispondente onda elettromagnetica dovrebbe invece permeare la roccia con la medesima efficacia dell'onda radiosismica, preannunciando l'imminente rottura. Così come con un geofono è possibile prevedere la rottura della volta in una miniera, il radiogeofono potrebbe essere in grado di prevedere il cedimento del materiale nel volume focale.

Si pone a questo punto il problema della permeabilità della roccia alle onde radio.

Per quanto riguarda il segnale prodotto simultaneamente alla scossa sismica, il problema può essere facilmente superato considerando che la stessa superficie topografica emetterà segnali direttamente nell'atmosfera e qui, incanalati tra la ionosfera e il suolo secondo la modalità di propagazione diretta delle VLF, dovrebbe poter raggiungere notevoli distanze se non addirittura compiere diversi giri del globo<sup>6</sup>.

Per quanto riguarda invece i segnali generati dal "pianto della roccia", è di supporto il fatto che in Onde Lunghe (LF) le stazioni di radiodiffusione tedesche si possono ascoltare fin nel centro Italia e senza evanescenze poiché le LF non possono beneficiare come le Onde Medie di una componente riflessa nella ionosfera. Queste trasmissioni che arrivano per onda diretta hanno dovuto necessariamente attraversare le Alpi oltre che l'orizzonte ottico.

---

<sup>6</sup> Le emissioni elettromagnetiche in banda E/VLF attraversano l'atmosfera terrestre incanalate tra il suolo e la ionosfera subendo una bassissima attenuazione che anzi si riduce con la frequenza fino a che, in banda ULF, in corrispondenza della "frequenza di Schumann" (10 Hz circa) è perfettamente in risonanza con l'atmosfera stessa e teoricamente può propagarsi in un ciclo infinito senza subire alcuna attenuazione.

Del resto è provato che la radiazione elettromagnetica, che già in Onde Corte ha una discreta capacità di penetrazione, aumenta questa proprietà all'aumentare della lunghezza d'onda al punto che (anche questo è ormai certo) gli USA utilizzano almeno le ELF per le comunicazioni unilaterali terra-nave con i sottomarini durante l'immersione, con copertura mondiale. Come ho già accennato, aleggia poi la leggenda che in ULF non esistano limiti di profondità<sup>7</sup>.

L'ipotesi che lo stress tettonico produca emissioni elettromagnetiche prima e dopo un evento sismico lascia prevedere la possibilità di rilevare con il radiogeofono almeno due tipi di segnale caratteristico.

Segnali presismici potrebbero interessare l'intera gamma coperta dal ricevitore (spettro acustico) con la preferenza delle frequenze più alte. Inoltre la massima sensibilità dell'udito umano, nonché quella dello stesso ricevitore, risultano entrambe intorno ad 1 kHz. C'è da aspettarsi dunque che la massima intensità del segnale presismico sia rilevabile nella parte più alta dello spettro utile. Al contrario il segnale direttamente associato alla scossa sismica dovrebbe limitarsi alle frequenze più basse con la massima intensità al di sotto della soglia udibile dei 30 Hz.

---

<sup>7</sup> Si parla di “leggende” in quanto, data la natura stessa delle onde radio, al di sotto dei 9 KHz non esistono ufficialmente utilizzazioni a scopo di radiocomunicazione, ne' studi in tale direzione (Cfr. par. 1.2.1)

### 1.3.2 - ALTRE POSSIBILITÀ: IL MODELLO “MOGNASCHI”

Come si era già accennato, esistono altre possibili spiegazioni per le emissioni elettromagnetiche associate allo stress meccanico. Queste si basano su microfratture che precedono la rottura e ricorrono alla generazione di cariche elettriche libere o di esoelettroni. Questo fenomeno sarebbe stato già osservato nei metalli (es. Rabinowicz 1977)<sup>8</sup> tuttavia, proprio nell’ambito di questa tesi, è stato compresso un segmento di binario per rilevare il rumore di fondo della pressa (cfr. par. “Accorgimenti particolari”, pag.137) senza arrivare alla rottura ma pur sempre senza rilevare alcun segnale premonitore.

Tra le ipotesi che associano microfratture a cariche elettriche merita particolare attenzione quella proposta dal prof. Mognaschi<sup>9</sup> (fisico ma anche radioamatore) che non ricorre ai fenomeni piezoelettrici ma direttamente alle microfratture che, rompendo legami chimici, causerebbero uno sbilanciamento nella distribuzione delle cariche. Se il materiale non è conduttore, cariche libere si troverebbero separate dalla frattura creando un campo elettrico che può generare una microscarica tra i due lembi con conseguente emissione elettromagnetica. Questo effetto si può verificare molto semplicemente srotolando di scatto del nastro isolante. Si formeranno delle piccole scintille nei punti di distacco che si potranno rilevare con apparecchi radio.

Questa ipotesi può essere considerata una valida alternativa a quella da noi presentata oppure può essere ad essa associata in un fenomeno più vario e complesso. Il nostro contributo si limita alla presentazione di questi spunti delegando ai teorici lo sviluppo di una soluzione definitiva.

---

<sup>8</sup> Exoelectrons, M.I.T. Boston 1997

<sup>9</sup> “Segnali radio che precedono eventi sismici” (1997), successivamente ripreso in “Precursori elettromagnetici dei sismi” (1998).

## **1.4 - L'IPOTESI RADIOSISMICA NELL'AMBITO DEI FENOMENI PRECURSORI**

### **1.4.1 - I PRECURSORI SISMICI**

Sono già noti molti tipi di fenomeni che occasionalmente possono rappresentare un premonitore per un sisma imminente. Molti di questi hanno carattere soggettivo e/o rara incidenza, al punto da rappresentare quasi una leggenda. Tra di essi ricordiamo il comportamento anomalo degli animali (famoso il caso dei pesci gatto), la perdita di forza nei magneti, fenomeni luminosi, rombi e boati nell'aria.

Altri fenomeni invece sono più frequenti e/o consentono rigorose misurazioni quantitative e rappresentano 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");

Prima di prendere in esame caso per caso e di verificare le cause e l'attendibilità di questi fenomeni è opportuno però fare una considerazione generale sul fenomeno precursore ideale.



Il precursore ideale è un fenomeno che deve rispondere a tre requisiti fondamentali: deve essere oggettivo, sistematico e legato al sisma con necessità:

- ❖ OGGETTIVITA': il fenomeno deve essere misurabile e quantificabile.
- ❖ SISTEMATICITA': il fenomeno deve verificarsi sempre, ogni qual volta sta per verificarsi un sisma.
- ❖ NECESSITA': il fenomeno deve sempre essere seguito da un sisma. Non deve mai verificarsi indipendentemente.

I fenomeni precursori noti fino ad oggi non possiedono mai tutti e tre i requisiti richiesti e la loro attendibilità deve essere quindi avvalorata da un'associazione di fenomenologie diverse, il più possibile numerosa.

Sempre in linea generale, occorre notare inoltre che il fenomeno premonitore così definito rappresenta semplicemente una previsione generica. L'ideale sarebbe infatti che le sue caratteristiche potessero in qualche modo fornire elementi per descrivere il sisma associato. Devono cioè suggerire un "*dove*", un "*quando*" e un "*quanto*".

Nessuno dei fenomeni conosciuti è in grado, sia pure occasionalmente, di rispondere a queste incognite in modo soddisfacente.

## 1.4.2 - LA TEORIA DELLA DILATANZA

Il fenomeno descritto dalla “teoria della dilatanza” è probabilmente la chiave del problema. La dilatanza è infatti associabile a tutti i fenomeni sopra elencati e può essere la causa prima anche delle emissioni radiosismiche, qualunque ne sia il reale meccanismo generatore (ipotesi dei “radioloop” o ipotesi di Mognaschi).

E' stato dimostrato in laboratorio<sup>10</sup> 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<sup>11</sup> 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<sup>12</sup>, 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, in prima analisi, è abbastanza realistico in quanto riproducibile in laboratorio e riferibile a tutti i premonitori precedentemente elencati. E' inoltre in accordo con la teoria di Griffith<sup>13</sup> che prevede la rottura come conseguenza dello sviluppo ed estensione di microfratture in corrispondenza di discontinuità di natura petrografico-mineralogica all'interno della roccia.

---

<sup>10</sup> Caputo: “Sismologia e segnali precursori...”, pag.80

<sup>11</sup> Rikitake: “Previsione dei terremoti”, pag.210

<sup>12</sup> Caputo, op.cit. pag.80; Rikitake, op. cit. pag.213

<sup>13</sup> Griffith (1924): “Teory of rupture”

Però non esiste una versione univoca di questa teoria e inoltre, dal punto di vista geologico, non ci appare totalmente realistica in questa versione. Ma prima di esaminare criticamente questo meccanismo, vediamo finalmente in dettaglio la dinamica dei precursori a cui abbiamo fatto accenno, interpretandoli alla luce della teoria della dilatanza in condizioni sature:

**VARIAZIONE DEL LIVELLO DI FALDA**<sup>14</sup>: una locale repentina variazione del livello piezometrico delle falde o della portata delle sorgenti può essere ricondotta al richiamo di fluidi all'interno dei vuoti prodotti dalla dilatanza nel volume roccioso.

In Cina il monitoraggio automatico e manuale del livello dell'acqua nei pozzi è uno dei più importanti strumenti di previsione (Coe 1971)<sup>15</sup>.

**VARIAZIONE DELLA CONCENTRAZIONE DI GAS RADON**: il Radon 222 è un gas radioattivo (e quindi facilmente individuabile) che deriva da una fase del decadimento dell'Uranio 238. Questo gas emanato dalle rocce che in piccola percentuale contengono anche Uranio può raggiungere la superficie attraverso la circolazione delle acque sotterranee, ma deve farlo molto velocemente, perché il tempo di decadimento del Radon è di soli 3,5 giorni<sup>16</sup>. Poiché la cessione del gas dalla roccia all'acqua avviene attraverso la superficie di contatto<sup>17</sup>, l'aumento di superficie causato dalla dilatanza può determinare localmente un aumento della concentrazione di Radon nelle falde.

---

<sup>14</sup> Rikitake: "Previsione dei terremoti", pag.203; Caputo: "Sismologia e...", pag.105

<sup>15</sup> Rikitake, op. cit. pag.204

<sup>16</sup> Rikitake, op. cit. pag.205

<sup>17</sup> Caputo, op. cit. pag.107

VARIAZIONE DELLA VELOCITA' DELLE ONDE SISMICHE: è stato osservato (Imamura 1928, Sassa 1948, Hayakawa 1950)<sup>18</sup> che all'approssimarsi di un terremoto la velocità delle onde sismiche (nella regione epicentrale) può subire delle variazioni. Si tratta naturalmente di onde generate da piccole scosse che precedono l'evento parossistico. Si è quindi assunto a misura di questo fenomeno il rapporto tra la velocità delle onde P e quella delle onde S ( $V_p/V_s$ ) che tipicamente si riduce all'approssimarsi di un sisma per poi riaumentare poco prima della scossa.

La spiegazione di questo fenomeno può invocare la teoria della dilatanza<sup>19</sup> in quanto le onde P, per la propria natura di onde di pressione, subiscono un rallentamento a causa delle microfratture per poi riaumentare la velocità quando i vuoti verranno riempiti dall'acqua filtrante. Al contrario le onde S, che si propagano per sforzo di taglio, sarebbero meno sensibili alle microfratture ma risentirebbero negativamente della successiva filtrazione dell'acqua (fig. 4).

A seguito della rottura poi, quando le forze elastiche accumulate avranno trovato il loro sfogo nel sisma avvenuto, le microfratture dovrebbero richiudersi, ovviamente senza risaldarsi ma pur sempre riducendo drasticamente il volume dei vuoti. La velocità delle onde sismiche a questo punto dovrebbe tornare sui valori normali.

E' interessante notare come in esperimenti di laboratorio (Gupta 1973)<sup>20</sup> la riduzione del rapporto  $v_P/v_S$  risulterebbe massima nella direzione del minimo sforzo e minima nella direzione di massima tensione di compressione, in accordo con la distribuzione delle microfratture negli esperimenti sulla dilatanza. E' stato inoltre osservato<sup>21</sup> un comportamento anisotropo della velocità delle onde S (componenti orizzontale e verticale) associabile anch'esso alle caratteristiche anisotropiche della dilatanza.

---

<sup>18</sup> Rikitake: "Previsione dei terremoti" pag.167

<sup>19</sup> Rikitake, op. cit. pag.210

<sup>20</sup> Ibid.

<sup>21</sup> Rikitake, op.cit. pag. 173

FENOMENI ELETTRICI: secondo studi giapponesi la misura della resistività elettrica della roccia può rappresentare un indice rigoroso del suo stato tensionale.<sup>22</sup> All'approssimarsi di un sisma è infatti possibile registrare una sensibile riduzione della resistività elettrica che può essere attribuita all'acqua che permea le microfratture nell'ambito del fenomeno di dilatanza (la roccia è altrimenti considerata isolante). Questa ipotesi sembra confermata da esperimenti condotti in condizioni sature.<sup>23</sup>

Un altro fenomeno di tipo elettrico è quello delle correnti telluriche. Differenze di potenziale tra diverse regioni del sottosuolo, attribuite per lo più (l'origine non è accertata) alla formazione di pile per fenomeni elettrochimici, causano correnti elettriche spontanee che possono raggiungere il potenziale di 1 Volt<sup>24</sup>. Fenomeni di questo tipo, e le relative variazioni, sono stati osservati e associati al terremoto praticamente in tutto il mondo, basti ricordare: Giappone, Cina, Stati Uniti, U.R.S.S., Grecia. Ma l'origine di queste correnti è in realtà molto controversa e un'eventuale associazione con la dilatanza (senza ricorrere a fenomeni piezoelettrici) ritengo possa essere attribuita soltanto, e con scarsa efficacia, ad alterazioni fisico-chimiche ed effetti elettrolitici sulla superficie rocciosa che viene a contatto con il fluido assorbito durante la dilatanza (a sua volta ricco di minerali).

La generazione di queste correnti per cause piezoelettriche è però il fondamento del metodo di previsione VAN (le cui basi teoriche però non sono unanimamente accettate)<sup>25</sup> nonché, almeno in parte, dell'ipotesi radiosismica, che comunque ne attribuisce l'origine alla dilatanza. Un tentativo di associazione tra correnti telluriche

---

<sup>22</sup> Caputo: "Sismologia e segnali precursori...", pag.100

<sup>23</sup> Rikitake: "Previsione dei terremoti" pag.211

<sup>24</sup> Caputo, op. cit. pag. 101

<sup>25</sup> Caputo, op. cit. pag. 102

e teoria della dilatanza verrà quindi presentato più avanti, unitamente alla critica del metodo VAN (cfr. par.1.4.6).

Variazioni del campo elettrico naturale sono anche state registrate in associazione a fenomeni sismici<sup>26</sup> e possono essere associate alle microfratture della dilatanza attraverso la teoria del Mognaschi<sup>27</sup>. Anche questo aspetto verrà più ampiamente trattato in seguito.

FENOMENI MAGNETICI: a parte la leggenda (avvalorata da numerose testimonianze storiche) che nell'imminenza di un terremoto i magneti naturali perderebbero il proprio potere, esistono di fatto osservazioni della variazione del campo magnetico naturale in associazione (precursori o concomitanti) con episodi di sismicità (es.: Matsushiro, Giappone, 1965-1967), a causa della pressione di gas naturali (Tashkent, U.R.S.S.), a seguito di esplosioni artificiali (Isole Aleutine, 1971; Medeo, U.R.S.S., 1972).<sup>28</sup>

E' stato anche osservato in esperienze di laboratorio (Nagata 1965, 1970)<sup>29</sup> che la magnetizzazione delle rocce sottoposte a compressione uniassiale diminuisce nella direzione di compressione e si è stimato, nel caso di un sisma, valori di variazione dell'ordine dei 10 gamma. La spiegazione del fenomeno, noto come "magnetismo piezo-residuo", risiede nella modificazione delle proprietà fisiche della materia in regimi di alte pressioni. Variazioni del campo magnetico locale potrebbero (per ipotesi) essere associate attraverso il fenomeno sismomagnetico alle variazioni tensionali nell'ambito della dilatanza. Più avanti però verranno esplicitamente legate alla dilatanza attraverso l'ipotesi radiosismica.

---

<sup>26</sup> Cfr. cap. 1.5: "Fisica della terra solida" di Caputo et alt.

<sup>27</sup> Mognaschi: "Precursori elettromagnetici dei sismi" (1978)

<sup>28</sup> Rikitake: "Previsione dei terremoti" pag.183

<sup>29</sup> Rikitake, op.cit. pag. 186

DEFORMAZIONI STATICHE: variazioni di quote, pendenze e distanze orizzontali possono essere osservate sulla superficie topografica in relazione a fenomeni sismici successivi, soprattutto nei forti terremoti. Si tratta degli effetti macroscopici superficiali delle variazioni dello stato tensionale nelle rocce del volume focale. Con una certa approssimazione è possibile misurare le deformazioni e quindi risalire alle variazioni di sforzo anche direttamente nelle rocce profonde. Anche questi fenomeni possono essere riconducibili agli effetti della dilatanza<sup>30</sup>.

FENOMENI SISMOACUSTICI: quando un campione di materiale lapideo viene sottoposto 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 ("pianto dello stagno")<sup>31</sup>. 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<sup>32</sup>.

Si tratta di frequenze acustiche e ultrasoniche che possono raggiungere i 50 kHz e, purtroppo, proprio per questo motivo sono fortemente attenuate dal materiale lapideo e raramente raggiungono la superficie. 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 dei cedimenti<sup>33</sup>.

---

<sup>30</sup> Caputo: "Sismologia e segnali precursori..." pp. 90 e seg.; 80.

<sup>31</sup> Caputo, op.cit. pag.94

<sup>32</sup> Cfr. Rikitake: "Previsione dei terremoti" pag.209 e Caputo, op.cit. pag.95

<sup>33</sup> Caputo, op.cit. pp. 95; 87

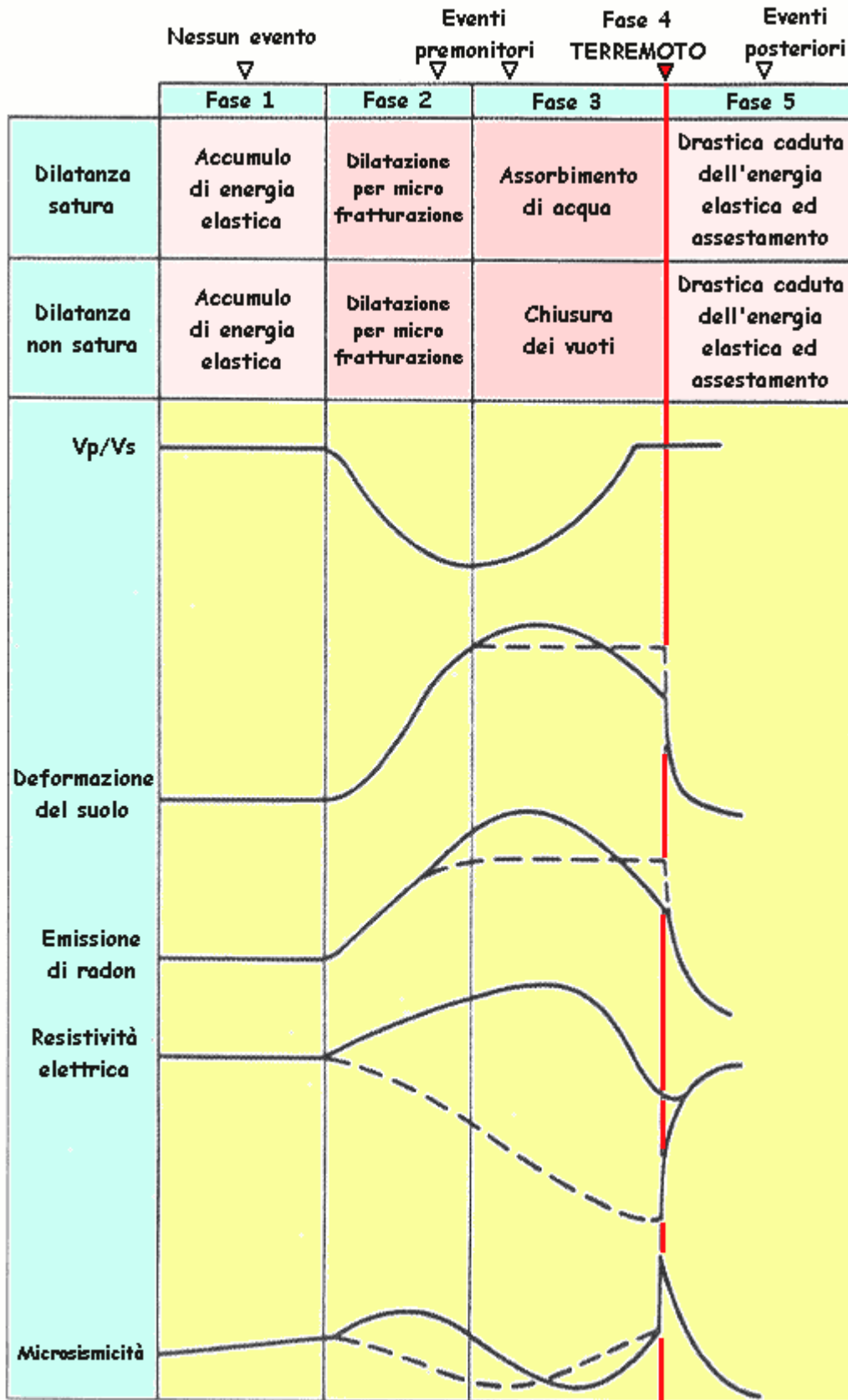


Fig.4 - Variazioni di alcuni parametri legati alla dilatanza secondo il modello americano (linea continua) e il modello russo (linea tratteggiata) nell'ambito delle varie fasi. Modificato da Martinis "Il Lazio..." (1995).



### 1.4.3 - DILATANZA NON SATURA ED ALCUNI ASPETTI PARADOSSALI

Alcuni ricercatori sostengono che una dilatanza non satura sia ugualmente in grado di spiegare tutti i fenomeni appena visti. Questa variante (Mogi, 1974)<sup>34</sup> prevede due fasi analoghe alla precedente (accumulo di tensioni e dilatazione per microfratturazione) salvo poi una terza fase in cui la dilatazione assume valori eccezionali nel volume focale mentre si riduce nella regione periferica a seguito di una riduzione delle tensioni fino alla totale chiusura dei vuoti. Questo modello sarebbe in grado di giustificare altri fenomeni presismici senza peraltro contrastare con quelli sopra elencati (fig.4).

A questo punto, per prima cosa va notata l'analogia tra la teoria della dilatanza non satura e le modalità con cui si osserva in laboratorio il pianto della roccia. Le vibrazioni acustiche (presumibilmente associate a microfratturazione) insorgono in tutto il volume per poi concentrarsi soltanto nella zona dell'imminente frattura, il tutto in ambiente non saturo.

In secondo luogo c'è da chiedersi come sia possibile ammettere una condizione "satura" nella regione focale, cioè ad una profondità localizzabile tra un minimo di 8-10 km fino a circa 70 km, limite massimo della crosta sismogenetica. L'ipotesi della saturazione presenta infatti una serie di problemi di natura geologica<sup>35</sup>:

---

<sup>34</sup> Rikitake: "Previsione dei terremoti" pp. 213/216

<sup>35</sup> Campioni provenienti da trivellazioni del tutto eccezionali come il pozzo di Kola (URSS, 12 km circa) hanno realmente rivelato una quantità d'acqua inaspettata ed "eccezionale" nelle rocce del basamento cristallino. Si tratta, naturalmente, di molecole di H<sub>2</sub>O presenti nella composizione chimica dei minerali che costituiscono la roccia, non di acqua liquida, se non in alcuni livelli particolari in cui una certa quantità di fluido era stata ceduta dai minerali (cfr. Casato: "Scienze della Terra" pag.431). Questa condizione non ci sembra possa soddisfare la saturazione richiesta dalla dilatanza. In particolari casi è possibile la liberazione di acqua liquida nella trasformazione tra due specie mineralogiche causata proprio da alte pressioni, come la reazione endotermica gesso→anidrite in fase diagenetica. Il coinvolgimento di sedimenti in fase diagenetica (e quindi ancora umidi) apparirebbe

- la presenza e/o la liberazione di acqua liquida a profondità maggiori di 8-10 km;
- la caratteristica di “porosità” della roccia microfratturata, cosa che richiede il contatto tra le fratture e dunque l’esistenza già di una macrofrattura;
- la circolazione idrica oltre 10 km al di sotto del livello di base;
- la possibilità che tale circolazione sia connessa a quella ipogea superficiale e che la velocità di filtrazione consenta di coprire la distanza in meno di 3,8 giorni;
- la pressione idrostatica di una colonna d’acqua di almeno 8-10 km.

---

l’unica ipotesi favorevole alla cessione di una discreta quantità di fluido ma deve limitarsi alla profondità massima di 10 km, oltre la quale, tra l’altro, insorgerebbe il metamorfismo. Anche nei sedimenti più profondi tuttavia, lo stesso processo diagenetico (fase di anadiagenesi) avrà però già provveduto all’espulsione dell’acqua e alla riduzione dei vuoti (cfr. Angelucci: “Guida allo studio della Sedimentologia” pag.28). Il limite inferiore dei 10 km è per giunta ammissibile soltanto se la temperatura si mantiene inferiore ai 200°C, altrimenti alla diagenesi si sostituirebbero comunque processi metamorfici.

La teoria della dilatanza non invoca e non sembra neppure prevedere fenomeni di metamorfismo, sia pure di basso grado. A maggior ragione, a profondità maggiori, minerali idrati già stabili in regimi di alte pressioni e temperature, come potrebbero alimentare una circolazione idrica addirittura connessa a quella superficiale? Pur ammettendo tali condizioni, può l’acqua filtrare ad una velocità tale da portare in superficie il gas radon prima del suo ulteriore decadimento? Come si può trascurare che sia il bacino idrico che quello idrogeologico hanno come livello di base quello del mare? Il gradiente geotermico e il gradiente barico a tali profondità conducono a temperature e pressioni compatibili con lo stato liquido? Come si possono trascurare eventuali assimilazioni per alterazione chimica dei minerali? Da dove proviene dunque questa circolazione idrica e come potrebbe mantenersi?

#### **1.4.4 - DILATANZA RIVISITATA**

Per trovare la giusta armonia tra fisica e geologia e tra dilatanza satura e non satura verrà ora proposto un modello unico che rappresenterà anche la chiave di interpretazione dell'ipotesi radiosismica.

Dato un volume di roccia sottoposto ad uno sforzo con incremento costante, assumiamo che la rottura del materiale (faglia sismogenetica) sia attribuibile ad una macrofrattura formatasi dalla fusione di una serie di microfratture. Tali microfratture iniziano a formarsi in modo generalizzato nell'intero volume interessato dalle tensioni ma con una precisa orientazione dettata dallo stato tensionale. Quindi, in prossimità del limite di rottura, si concentrano nel solo volume focale dando origine ad una o più macrofratture che si propagano nella direzione della loro massima densità (faglia/e sismogenetica/e). Il tutto avviene genericamente in condizioni non sature.

Qualora la regione sotto tensione fosse molto superficiale (meno di 10 km) o abbastanza superficiale ma sottoposta ad uno sforzo molto intenso, l'area della microfratturazione generalizzata potrebbe interessare direttamente le regioni poco profonde e realmente sature della litosfera, favorendo (almeno nella fase intermedia) la manifestazione di tutti i fenomeni premonitori descritti. In tutti gli altri casi (terremoti non particolarmente superficiali o non particolarmente intensi) la dilatanza avviene in condizioni non sature e può occasionalmente causare i fenomeni premonitori.

In definitiva consideriamo la dilatanza un fenomeno indipendente dalla saturazione e assimilabile a quanto osservato nel pianto della roccia. I premonitori legati alla dilatanza sarebbero tutti eventi possibili ma occasionali, favoriti dalla saturazione e quindi dalla profondità dell'ipocentro e dall'estensione del volume focale.

### **1.4.5 - IL VANTAGGIO DEL METODO RADIOSISMICO**

Ammettendo un collegamento diretto tra dilatanza e pianto della roccia, ovvero attribuendo le emissioni sismoacustiche alle medesime microfratture che si formano nell'ambito della dilatanza, ne emerge che l'unico fenomeno premonitore che può realmente manifestarsi con necessità e sistematicità è proprio il pianto della roccia. Questo però è anche il fenomeno con la più bassa probabilità di propagarsi fino alla superficie.

Le frequenze sismoacustiche sono infatti enormemente più alte di quelle delle onde sismiche rilevate con i sismografi e la loro propagazione nel materiale litoide subisce una forte attenuazione<sup>36</sup>. Il terreno si comporta di fatto come un filtro passa-basso che (su grandi distanze) taglia le frequenze sismoacustiche (es. 200 Hz, 2 kHz) e rende possibile la rilevazione delle sole onde sismiche (es. 2 Hz).

Il problema è curiosamente analogo a quello della telefonia. Abbiamo un segnale acustico che non è in grado di propagarsi a grande distanza e le soluzioni possono

---

<sup>36</sup> Molto semplicemente, immaginiamo in astratto un'oscillazione meccanica che si propaga in un materiale lapideo per lo spazio di 10 m. Se durante questo percorso l'onda avrà compiuto una sola oscillazione, essa avrà subito una determinata attenuazione. Immaginiamo ora che abbia invece una frequenza 10 volte più grande: compirà 10 oscillazioni nel percorrere la stessa distanza, una ogni metro, subendo 10 volte la resistenza del terreno. Ecco perché maggiore sarà la frequenza, maggiore sarà l'attenuazione e minore la possibilità di raggiungere grandi distanze.

essere due: applicare (come nelle miniere) un sensore acustico direttamente nell'area interessata, oppure applicarvi un trasduttore per trasformare il segnale acustico in un altro tipo di radiazione che può propagarsi con maggiore efficacia attraverso i solidi (una radio?)

Ovviamente entrambe le soluzioni sono poco pratiche, ma se esistesse un processo naturale che sta già svolgendo questa funzione?

Se il terreno stesso (a causa dei radioloop e/o degli esoelettroni) fosse in grado di trasformare almeno una parte dell'energia meccanica in un segnale elettromagnetico, questa è potenzialmente la soluzione definitiva alla ricerca del precursore ideale.

Monitorando nel campo elettromagnetico la banda delle frequenze acustiche, potrebbero giungere alla superficie segnali legati a fenomeni sismoacustici generati nell'ipocentro ma poi assorbiti dal terreno. Segnali che attraverso la dilatanza sono legati al sisma con necessità e sistematicità. Fortunatamente la propagazione delle onde radio nel materiale litoide trova il massimo favore proprio su frequenze così basse<sup>37</sup>.

L'intensità dei segnali potrebbe essere legata alla diffusione delle microfrazture e dunque all'entità del sisma. La distribuzione temporale dei segnali potrebbe essere indicativa dell'istante del cedimento. La frequenza dei segnali potrebbe essere indicativa del litotipo interessato dallo stress. Attraverso valutazioni sulla velocità di propagazione delle onde radio, la tipologia della roccia interessata e l'intensità dei

---

<sup>37</sup> Se i segnali sismoacustici erano "alta frequenza" nell'ambito dello spettro sismico, quelli radiosismici risultano all'estremo inferiore dello spettro radio. La frequenza ovviamente è la stessa ma se risultava particolarmente sfavorevole nelle onde acustiche è al contrario particolarmente favorevole sulle onde radio, la cui capacità di penetrazione aumenta al diminuire della frequenza, analogamente alle oscillazioni meccaniche anche se per motivi diversi.

segnali omologhi ricevuti da diverse stazioni, potrebbe essere possibile localizzare il volume focale durante l'ultima fase di accumulazione dell'energia elastica, prima del raggiungimento del limite di rottura.

#### **1.4.6 - CONFRONTO CON IL METODO VAN**

Il metodo VAN è l'aspetto più interessante nel panorama dei precursori elettrici e, probabilmente, dei precursori in generale. E' l'unico metodo che, sia pur discutibilmente, fornisce risultati con una certa sistematicità. La sigla VAN deriva dai nomi dei suoi ideatori: i greci Varostos, Alexopulos e Nomikos.

Utilizza una serie di dipoli elettrici per misurare segnali che si manifesterebbero con un anticipo variabile da qualche ora a qualche settimana rispetto al sisma. Se la finestra temporale presenta una certa variabilità, questo metodo ha però il pregio di fornire indicazioni sulla magnitudo e la distanza ipocentrale in base all'ampiezza dei segnali ricevuti.

I risultati in molti casi sono stati abbastanza soddisfacenti (salvo critiche di carattere statistico) ma il metodo è molto discusso a causa delle sue basi teoriche, non essendo unanimemente accettata la spiegazione sull'origine dei segnali sismoelettrici.

Brevemente, il meccanismo<sup>38</sup> si basa sulla piezoelettricità. E' richiesta una roccia ricca di quarzo (si fa l'esempio del granito) e si suppone che contenga anche delle "impurità" con caratteristiche polari. Questi dipoli sono orientati in modo isotropo

---

<sup>38</sup> "La Recherche" n°203, ott. 1988

nel volume roccioso. La pressione a cui la roccia è sottoposta causa nei cristalli di quarzo la produzione di cariche di segno opposto che si accumulano e, raggiunto un certo livello, inducono un orientamento uniforme nei dipoli. Ogni variazione nell'orientamento dei dipoli produce un microimpulso elettromagnetico che contribuisce alla variazione del campo elettrico locale (fig.5).

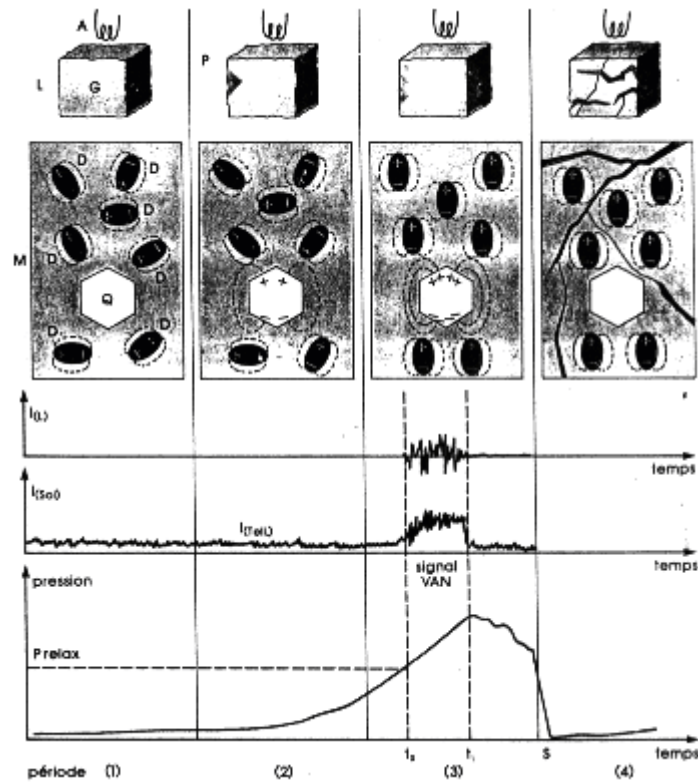


Fig.5 - tratta da La Recherche n°203

Questo modello prevede l'emissione di segnali elettromagnetici e potrebbe essere annoverato a supporto dell'ipotesi radiosismica ma, insieme ad altre varianti sempre basate sulla piezoelettricità del quarzo granitico, non ha mai del tutto convinto la comunità scientifica. Personalmente non saprei individuare quelle "impurità" polari nel granito (parlando di polarizzazione elettrica) ma soprattutto non so spiegarli

come questi cristalli possano orientarsi all'interno della roccia senza che intervenga un metamorfismo o una fusione<sup>39</sup>.

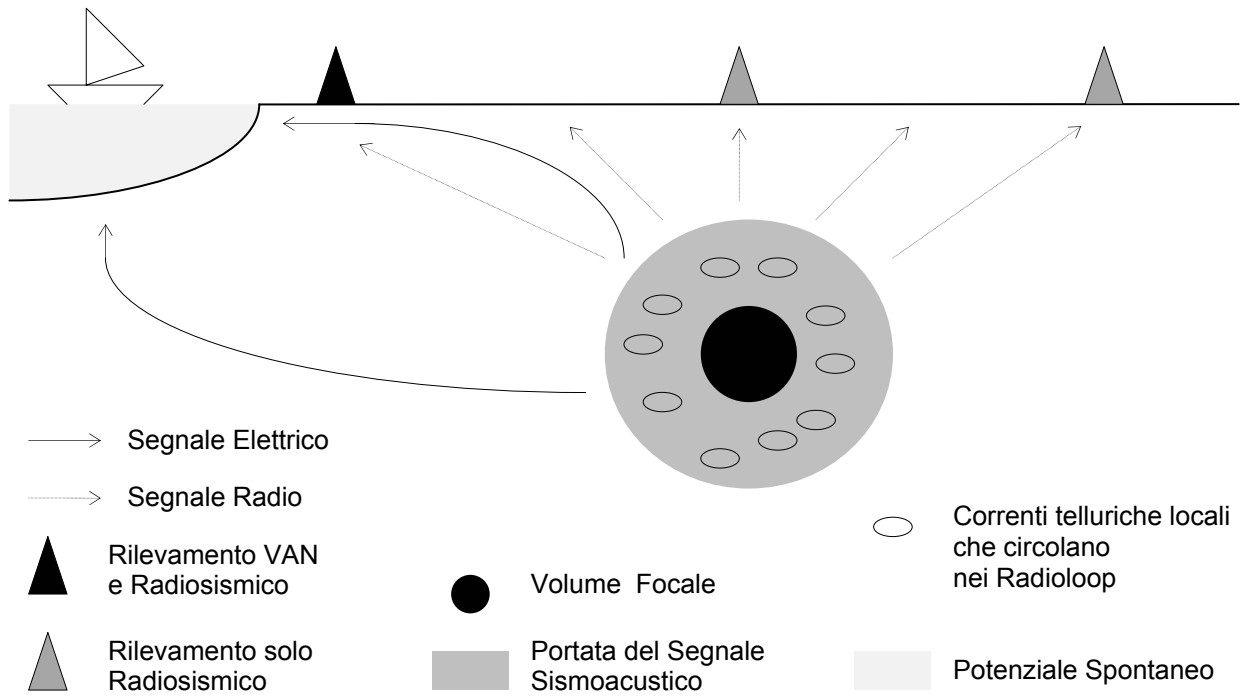
Potrei supporre piuttosto un effetto di temporanea polarizzazione magnetica negli eventuali (e non improbabili) minerali paramagnetici della componente femica. Ma come potrebbe questo magnetismo essere indotto dal campo elettrico dei dipoli? Occorre ancora che tale campo elettrico (variabile sotto l'azione delle vibrazioni sismoacustiche) implichi già di per sé un'emissione elettromagnetica. A che servirebbe allora il contributo di queste "impurità"? Al massimo rappresenterebbero una componente di supporto che amplifica l'effetto radiosismico.

Preferirei dunque vedere alla base dell'effetto VAN ancora una volta il modello dei "radioloop". I segnali elettrici rilevati nel metodo VAN inoltre potrebbero essere correlati, ma non direttamente identificati, con le correnti telluriche della teoria radiosismica. Nel modello radiosismico dei radioloop le correnti spontanee circolano in circuiti chiusi nel volume di materiale interessato dalle vibrazioni sismoacustiche e quindi si manifestano entro il limitato raggio d'azione di queste ultime. Si può supporre però che i segnali elettrici rilevati dal metodo VAN siano prodotti dall'interazione delle correnti locali (quelle appunto che alimentano i radioloop) con masse elettricamente cariche indipendenti da cause sismiche. In questa ipotesi i segnali VAN possono essere associati all'innesco dei radioloop ma non necessariamente saranno rilevabili da ogni punto della superficie (fig.6).

---

<sup>39</sup> Le proprietà fisiche dei minerali si esplicano con modalità dipendenti dagli elementi di simmetria dell'abito cristallino che a sua volta riflettono la periodicità del reticolo. Non è possibile che la piezoelettricità si manifesti con orientamenti dipolari differenti se non a seguito della relativa riorientazione degli elementi di simmetria, ovvero senza che il cristallo stesso cambi il suo orientamento nello spazio o ricristallizzi. (Sulle proprietà piezoelettriche dei cristalli cfr. Mottana: "Fondamenti di mineralogia geologica", pp. 293; 315; passim.)





*Fig.6 - Confronto ipotetico tra la propagazione dei segnali elettrici VAN e quella dei segnali radiosismici interpretando entrambi con la teoria dei "radioloop". L'efficacia del metodo VAN è limitata alla presenza di masse elettricamente cariche in grado di interagire con le cariche eccedenti che interessano la regione dei radioloop.*

Ciò potrebbe spiegare i successi del VAN con un meccanismo di base diverso (più accettabile?) e spiegherebbe al contempo anche gli insuccessi. Infatti in assenza di masse cariche (laghi, mare, giacimenti metalliferi) la sorgente a radioloop non produrrebbe segnali elettrici (nel senso di correnti telluriche) ma soltanto elettromagnetici. Forse non è un caso se il metodo VAN è nato ed è stato sviluppato soltanto in un'area sismica insulare come quella greca.

## 1.5 - LO STATO ATTUALE DELLE CONOSCENZE

Una prima conferma, indiretta, dell'esistenza di segnali radio presismici proveniva già dalla letteratura radioamatoriale. Sulla rivista "RK Elettronica" n.6, giugno 1986, Alessandro Cerboni di Arezzo, appassionato ascoltatore delle Onde Lunghe, scrive una lettera<sup>40</sup> in cui dichiara che di tanto in tanto su questa banda si ascolta uno strano rumore e di aver notato per giunta che ogni volta, nell'arco di 8-12 ore dall'ascolto di questo suono, si verifica un terremoto in qualche angolo del mondo.

Cerboni chiede spiegazioni alla redazione che risponde di non conoscere la natura fisica di questo fenomeno ma che sul libro "The world below 500 kHz" di Peter Carron jr. è riportata la testimonianza di segnali radio associabili al terremoto ricevuti nelle bande 10-1500 Hz, 81 kHz, 7, 9 e 14 MHz e persino nello spettro delle VHF. Questi segnali sono descritti come "rumore simile a pioggia", semplicemente "rumore" o "interferenze", mentre il segnale di cui parlava Cerboni è stato da lui definito come "il rumore che si produce nell'accartocciare la carta delle uova pasquali"<sup>41</sup>.

Ma la leggenda dei segnali radiosismici si è tramutata in realtà scientifica proprio di recente quando il fisico e radioamatore prof. Ezio Mognaschi (Univ. di Pavia) ha potuto studiare il fenomeno in base ai dati forniti da un radioamatore di Todi che ha addirittura preannunciato il terremoto del 12.05.97 (Italia centrale). Da questo studio

---

<sup>40</sup> Indirizzata alla famosa rubrica di radioascolto "U come utility", curata da Walter Capozza.

<sup>41</sup> E' chiaro che in tutti questi casi i suoni sono stati ricevuti con un apparecchio radio e quindi presumibilmente il segnale originale ha subito un tentativo di demodulazione in ampiezza per le frequenze al di sotto dei 30 MHz e in frequenza per le VHF, se non addirittura una rivelazione in banda laterale (SSB). La descrizione di Cerboni però è sorprendentemente aderente al suono che l'emissione radiosismica produce in un ricevitore radio. E' evidente che già da tempo i radioamatori hanno avuto contatti abbastanza consapevoli con il fenomeno radiosismico.

è emersa una precisa dinamica del fenomeno che interessa un'ampia gamma di frequenze<sup>42</sup>. Ne seguirono vari sviluppi teorici e risultati sperimentali recentemente pubblicati<sup>43</sup>. In questi è stato utilizzato un apparecchio radio sulla banda delle Onde Medie registrando impulsi EM in corrispondenza (e talvolta in anticipo) rispetto alla rottura per compressione di campioni di *gneiss*. Questi esperimenti sono stati condotti con modalità molto simili a quelle adottate anche da noi nelle prove di laboratorio (cfr. par.3.2.2, pag.129).

Un articolo sull'esperienza di Mognaschi è reperibile anche in Internet all'indirizzo:  
[ [http://web.tiscalinet.it/G2000/R\\_doc.html](http://web.tiscalinet.it/G2000/R_doc.html) ] (pagine residenti nel mio spazio web)

Altri studi compatibili con la teoria radiosismica<sup>44</sup> si possono trovare in Internet ai seguenti URL:

- EARTHQUAKE PREDICTION

[ <http://www.fujita.com/archive-rep/Earthquakes.html> ]

Vengono descritti diversi tipi di fenomeni precursori prendendo in considerazione anche i segnali elettromagnetici. La commissione IASPEI avrebbe recentemente preso in esame la possibilità che il rumore di fondo nelle bande LF, VLF e ELF possa rivelarsi utile al fine di una previsione del terremoto. Il giudizio sui pochi dati disponibili è stata però molto prudente, pur non escludendone la possibilità.

---

<sup>42</sup> *Radiatorama*, inserto n.10, ott. 1998

<sup>43</sup> "Detection of electromagnetic emission from fracture of rocks and building stones under stress" – Ezio R. Mognaschi, Ugo Zezza – Dipartimento di Fisica "A.Volta", Università degli Studi di Pavia.

<sup>44</sup> Notizie raccolte nel 1998. Questi articoli si possono considerare parte integrante della bibliografia.

*NOTA: il fatto che si sia parlato genericamente di “rumore di fondo” anziché di segnali discreti lascia pensare che siano state sottovalutate le potenzialità che, a mio parere, può offrire l’indagine elettromagnetica. Del resto i dati disponibili erano dichiaratamente pochi e, mi sembra di capire, non derivanti da studi rivolti specificamente allo spettro elettromagnetico.*

- DR. GENE WESCOTT

[ <http://kafka.admin.uaf.edu/geology/faculty/wescott/> ]

Il Prof. Gene Wescott del Dipartimento di Geologia e Geofisica dell’Università di Alaska Fairbanks sta attualmente studiando la possibilità di utilizzare emissioni ELF e VLF come precursori di terremoti ed eruzioni vulcaniche.

*NOTA: non si specifica la relazione tra i fenomeni geologici e la radiazione elettromagnetica ne’ il tipo di strumentazione in uso.*

- ELECROMAGNETIC PHENOMENA ASSOCIATED WITH EARTHQUAKES

[ <http://www.waseda.ac.jp/faculty/96058/member/kamogawa/em&eq.html> ]

Masashi Kamogawa e Yoshi-Hiko Ohtsuki parlano di emissioni radio dalla gamma ELF fino alle HF rilevate in Giappone prima del forte terremoto di Sugadaira (1980) e di esperimenti di laboratorio in cui lo stress meccanico delle rocce ha effettivamente prodotto emissioni radio. Si ritiene associato dunque che un terremoto possa produrre onde elettromagnetiche pur affermando che attualmente non si conosce alcuna “teoria ragionevole” che possa collegare lo stress tettonico alle onde radio. Si fanno inoltre ipotesi favorevoli alla propagazione delle onde radio nel sottosuolo.

*NOTA: l’esistenza di segnali radio presismici sembrerebbe dunque provata.*

- EARTHQUAKE RESEARCH

[ <http://www.riken.go.jp/engn/index.html> ]

È in corso in Giappone (Università Tokai di Shimizu) una ricerca di frontiera sui fenomeni elettromagnetici ed elettrici (VAN) associati a processi sismogenetici. Il progetto RIKEN, condotto da Seiya Uyeda, si propone anche di individuare un meccanismo fisico che possa associare lo stress tettonico ai segnali radio.

*NOTA: non si fa nessun riferimento a risultati anche parziali. Questo progetto sembra essere perfettamente in linea con l'ipotesi in oggetto.*

- GEOMAGNETISM E AERONOMY, volume 35, n.5, marzo 1996, edizione russa sett-ott 1995 [ <http://eos.wdcb.rssi.ru/transl/gma/9505/pap16.htm> ]

V.V. Krechetov dell'Istituto di Ricerca di Fisica dell'Università di Rostov parla anch'egli di radiazioni VLF che precedono il terremoto ma le attribuisce ad una interazione ionosferica con la "radiazione protonica di Cerenkov".

*NOTA: non ho le conoscenze necessarie per comprenderne il meccanismo ma certamente il terremoto viene qui identificato come la causa di segnali radio VLF.*

- ULF RADIO HOME PAGE

[ [http://www.jps.net/baparks/ulfradio/index\\_rf.htm](http://www.jps.net/baparks/ulfradio/index_rf.htm) ]

Si parla di forti segnali rilevati del Dr. Tony Fraise-Smith della Stanford University prima del terremoto di Loma Prieta (Mg.7,1) del 1989. Si fa inoltre riferimento ad un libro di Jack Y. Dea, Peter M. Hanses e Wolfgang Boerner sul rumore di fondo in ELF e la possibile applicazione come precursore sismico.

*NOTA: si tratta di un sito dedicato ai radioamatori e quindi particolarmente orientato sui segnali VLF prodotti dai fulmini. L'interesse per i terremoti è dunque marginale ma tuttavia l'ipotesi sismica sembra non meravigliare nessuno.*

- GEOFISICA DELLA TERRA SOLIDA, Prof. M.Caputo

[ <http://vaxrma.sci.uniroma1.it/DOCS/RICERCHE/Terra-Solida> ]

Un'equipe di ricercatori di diverse università del centro Italia ha condotto sei anni di misure in grotte dell'Appennino Centrale riscontrando variazioni nei segnali elettrici, magnetici e sismoacustici in relazione a sforzi presismici. Alcuni giorni prima del terremoto del 4/6/93 è stata inoltre notata un'attenuazione di ben 20 dB nella trasmissione in Onde Lunghe di Radio Montecarlo (216 kHz).

*NOTA: non so se esiste un legame tra le variazioni riscontrate nel campo magnetico e quelle del campo elettrico ma è curiosa l'associazione dei tre fenomeni. Che sia stata misurata insieme al segnale sismoacustico la relativa emissione ELF<sup>45</sup> ma distinta nelle due componenti elettrica e magnetica?*

- GEOPHYSICAL ELECTROPHONICS

[ <http://users.hunterlink.net.au/~ddcsk/gelphonx.htm> ]

Il Prof. Kolin Keay (fisico) dell'Università di Newcastle (Australia) sostiene che segnali elettromagnetici ELF e VLF stimolano per induzione la rete neurale rendendosi percepibili come la sensazione di un suono reale (elettrofonia). Egli suppone che con questo principio gli animali riescono ad avvertire in anticipo

---

<sup>45</sup> Questo fu il motivo del mio incontro con il prof. Caputo, che ebbe come conseguenza questa tesi.

l'avvento di un terremoto. Non è ancora disponibile materiale relativo specificatamente al terremoto ma la sua teoria è molto documentata almeno per quanto riguarda altri casi. Sembra infatti che storicamente la letteratura abbonda di testimonianze di suoni uditi in occasione dell'apparizione di bolidi o aurore polari (la prima è attribuita nientemeno che ad Edmund Halley). Questi rumori sono stati ritenuti pure suggestioni anche perché mai dei microfoni avevano potuto registrare nulla, anche quando i suoni venivano uditi. Recentemente invece è stato verificato che il segnale elettromagnetico a bassissima frequenza emesso dalla ionosfera in occasione di questi fenomeni rivela suoni identici a quelli descritti dai testimoni<sup>46</sup>.

*NOTA: il terremoto è segnalato tra i fenomeni che possono produrre rumori elettrofonici e quindi segnali ELF ma il materiale relativo non è ancora disponibile in WEB. Non si conosce dunque la sua soluzione al problema del legame tra terremoto e onde radio.*

- TECTONIC STRAIN THEORY

[ <http://www.laurentian.ca/neurosci/tectonicedit.htm> ]

Il neurobiologo Michael A. Persinger della Laurentian University di Sudbury, Ontario, Canada ha condotto studi sulla possibilità che radiazioni elettromagnetiche prodotte dallo stress tettonico possano influenzare il cervello

---

<sup>46</sup> - Non ci crederei se non avessi avuto io stesso un'esperienza simile. Il 12 agosto 1985 alle 00:55 UTC durante la posa fissa di una fotografia astronomica a largo campo mi capitò di osservare un bolide (entrato nel campo fotografato) e di udirne quel sibilo irreale. Sono un astrofilo ed ho passato un'infinità di tempo in attività osservata e fotografica, osservando innumerevoli stelle cadenti e bolidi ma senza averne mai avvertito alcun rumore. Quell'evento fu talmente sorprendente che, pur essendo convinto anch'io che si trattasse di una suggestione, ne presi appunto sulla mia agenda. E' chiaramente improbabile riuscire a rendere l'idea di un suono attraverso la scrittura, la mia annotazione tuttavia riporta questa espressione: "Vvsss!". Il bolide attraversò il cielo dallo Zenit verso SW e nel tratto compreso tra  $\epsilon$  Delphini e  $\sigma$  Aquilae lasciò la scia più persistente che abbia mai visto.

umano producendo la visione di UFO, fantasmi ed altre manifestazioni paranormali. Analisi statistiche hanno associato gli “UFO flap” ad eventi sismici. Esperimenti di laboratorio su soggetti umani hanno dimostrato che le radiazioni a bassissima frequenza sono in grado di indurre la visione di luci e tunnel, nonché sensazioni acustiche ed emotive.

*NOTA: naturalmente la questione sull'esistenza del paranormale è per noi del tutto fuori luogo ma il nodo significativo è che quelle percezioni “elettrofoniche” del prof. Kolin, che precedentemente abbiamo visto essere state associate in modo ipotetico anche a fenomeni sismici, nella teoria di Persinger assumono un aspetto molto più solido e sono direttamente legate fenomeni sismici localizzati.*

Dal materiale raccolto in Internet si possono trarre dunque le seguenti conclusioni:

- l'esistenza di segnali radio associati a stress tettonico sembra essere certa anche se non ufficialmente valorizzata;
- i segnali si possono estendere su un'ampia gamma di frequenze ma in particolare sono noti tra ELF e VLF;
- la propagazione delle onde elettromagnetiche nel sottosuolo può essere migliore di quanto ritenuto comunemente;
- il problema di un meccanismo che possa legare lo stress meccanico alle onde radio non è stato ancora risolto;
- sono già in corso (almeno in Alaska e Giappone) studi sull'uso di segnali radio per la previsione dei terremoti;
- non è noto con quale tipo di strumentazione e tecnica siano stati campionati o avvertiti tali segnali.



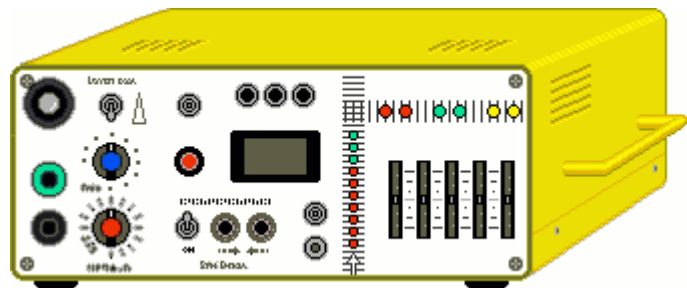
## 2 - Apparecchiature e tecniche utilizzate

### 2.1 - IL RICEVITORE (RADIOGEOFONO) "GAIA-4"

Lo strumento che ha reso possibile questa ricerca è un ricevitore di campo elettromagnetico in banda ELF-VLF (fig.7) derivato da anni di sperimentazione nel tentativo iniziale di realizzare un radiotelescopio amatoriale (cfr. cap. 1.3). L'idea di base era quella di un circuito risonante su una banda di frequenze radio che corrispondessero, come ordine di grandezza, allo spettro acustico udibile (20 Hz - 20 kHz). Lo scopo era quello di rendere udibile il segnale radio semplicemente trasformandolo in segnale elettrico.

Fig.7

Ricevitore E-VLF "GAIA"  
realizzato dall'autore  
versione 4b del 1998

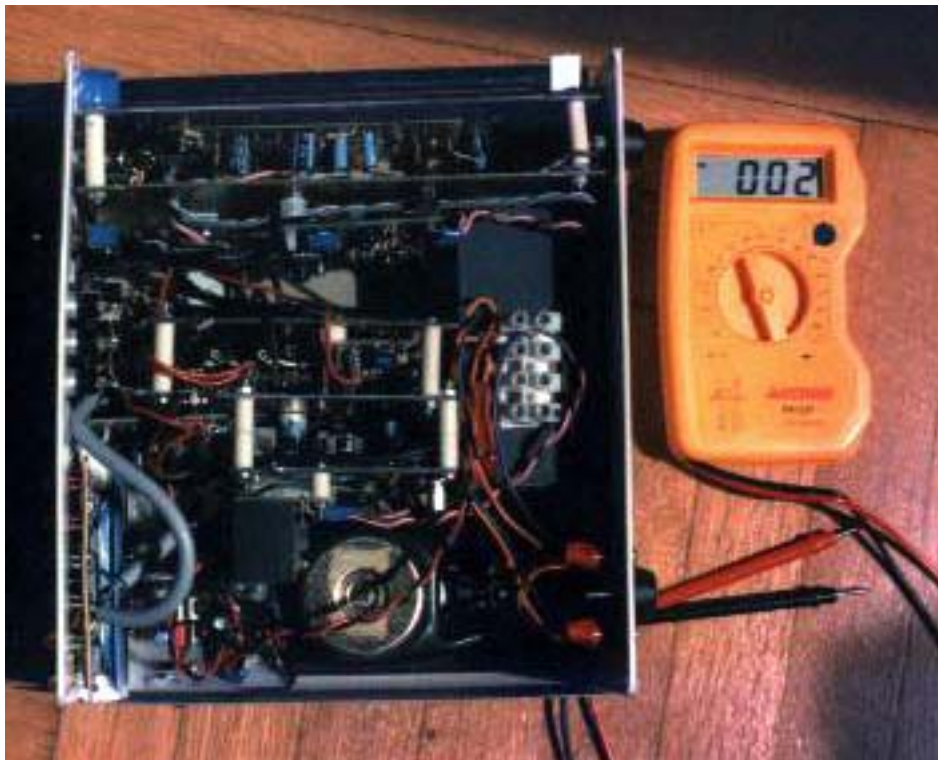


Come è noto, infatti, un comune ricevitore radio sintonizza un intervallo di frequenze molto stretto (canale radio) e con un apposito circuito demodulatore estrae dal segnale radio (onda portante) un segnale a bassa frequenza (messaggio) che vi era stato codificato mediante modulazione in ampiezza o in frequenza. Un ricevitore radio dunque restituisce soltanto una singola caratteristica<sup>47</sup> del segnale radio: la variazione di ampiezza o di frequenza in funzione del tempo.

<sup>47</sup> Questo punto condiziona la sostanziale differenza tra i segnali di uguale origine ottenuti in questa sede con il radiogefono e dai radioamatori con apparecchiature radio standard.

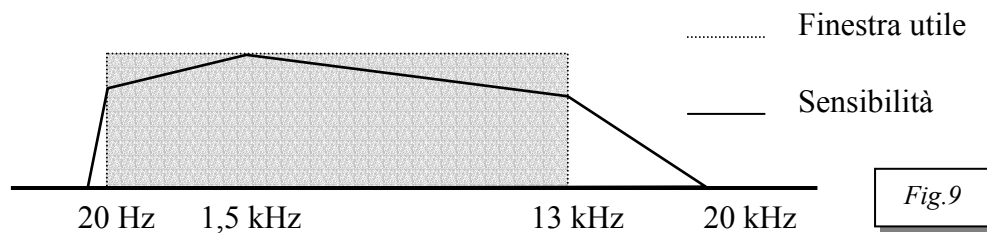
Il ricevitore in oggetto invece fornisce sotto forma di segnale elettrico analogico le variazioni nel tempo di ampiezza e frequenza dell'emissione elettromagnetica naturale per un larghissimo spettro (E-VLF). Poiché il segnale radio è rilevato su uno spettro di frequenze corrispondente a quello del suono, il segnale in uscita è udibile, policromo e "vivace" da un punto di vista acustico, rendendo possibile la distinzione, la classificazione e quindi il riconoscimento di una vasta gamma di emissioni naturali semplicemente attraverso l'ascolto diretto.

L'ascolto diretto e la descrizione qualitativa erano infatti lo scopo per cui era stato progettato l'apparecchio e la principale attività di ricerca eseguita prima di questa tesi. Questo tipo di apparecchiatura ha inoltre il vantaggio di fornire un segnale compatibile con dispositivi di acquisizione ed elaborazione del tutto ordinari: registratore a cassette, filtraggio analogico con apparecchiature hi-fi, analisi computerizzata attraverso una comune scheda sonora.



*Fig.8 - Visione globale del cablaggio dei vari componenti del ricevitore.*

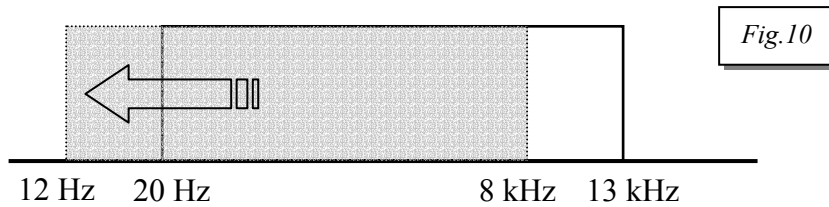
Da un punto di vista tecnico l'apparecchio è costituito da un primo stadio che essenzialmente consiste in un circuito pseudorisonante ad alta impedenza dotato di un filtro passa basso con la soglia di taglio a 13 kHz e di un passa banda variabile con la frequenza di picco a 1,5 kHz. Tale configurazione, dopo lunga sperimentazione, è stata preferita a quella propriamente risonante come un compromesso tra rendimento ed esigenze pratiche. L'antenna richiesta infatti è di ridottissime dimensioni ma "sonda" la sola componente elettrica del segnale elettromagnetico. In questo stadio l'amplificazione a transistor fornisce un segnale di uscita (LINE base) di medio livello, idoneo all'ascolto in cuffia. Questo stadio "sintonizzatore" definisce l'estensione della finestra utile (fig.9).



Essendo stata concepita per l'ascolto diretto, l'apparecchiatura è dotata di altri stadi di trasformazione, analisi ed amplificazione di questo segnale sorgente:

- Circuito digitale (8 bit) ad azione opzionale in grado di moltiplicare la frequenza in ingresso di un fattore variabile tra 7 valori da un minimo di 0,6 ad un massimo di 2,0 allo scopo di rendere udibili eventuali segnali che si estendessero poco al di fuori dello spettro udibile (20Hz-20kHz). L'ascolto in questa modalità

corrisponde idealmente alla traslazione in frequenza dell'intera finestra utile (fig.10).



- Circuito equalizzatore dotato di 5 filtri analogici in grado di esaltare o attenuare il segnale di 12 db sui seguenti picchi:

0,1 kHz (passa banda)

0,3 kHz (passa banda)

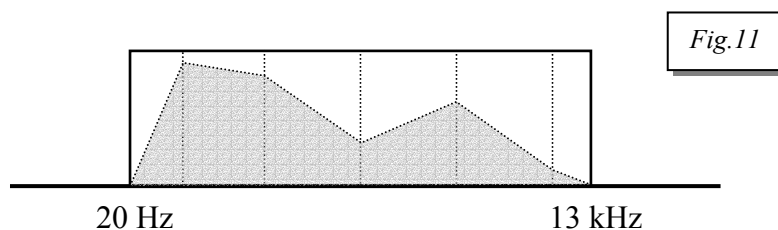
1 kHz (passa banda)

3 kHz (passa banda)

10 kHz (passa alto)

Questo stadio ha lo scopo di manipolare l'ampiezza della finestra utile (fig.11).

L'uscita audio che ne deriva (REC) è a basso livello e idonea all'ingresso MIC di un comune registratore commerciale.



- Amplificatore hi-fi a medio livello. Fornisce il segnale audio (LINE processato) idoneo all'ascolto in cuffia.

- Amplificatore 2W (azione opzionale) per ascolto in altoparlante. Questa modalità operativa deriva dall'originaria funzione di radiotelescopio. Per monitorare gli sciami di stelle cadenti era infatti necessario il lavoro di gruppo di molti osservatori visuali.
- Circuito Vu-meter che pilota 10 LED per la visualizzazione del livello di segnale all'uscita dal primo stadio.
- Circuito di analisi spettrale del segnale all'uscita dal primo stadio. Fornisce una visualizzazione sommaria ma immediata della distribuzione spettrale del segnale base attraverso l'intensità luminosa di 3 LED pilotati rispettivamente da altrettanti filtri: passa-basso, passa-banda, passa-alto.

In breve, l'intera apparecchiatura restituisce un segnale elettrico analogico (audiofrequenza livello LINE) equivalente al segnale radio in ingresso, ovvero funge semplicemente da trasduttore in isofrequenza. Rispetto ad un comune ricevitore non esiste uno stadio demodulatore e non sintonizza un singolo canale, bensì una larga finestra di frequenze variamente definibile in estensione e sensibilità.

L'antenna è costituita da una "stilo telescopica" per onde corte (comune modello commerciale) lunga circa 1,5 m alla massima estensione e posizionata verticalmente. Il collegamento a terra è comunemente assicurato dal corpo umano mediante un'impugnatura metallica ma può essere effettuato anche mediante un'apposita presa di terra collegabile via cavo a paletti interrati, tubature, recinzioni metalliche ecc.

L'alimentazione è fornita da una batteria ricaricabile incorporata (accumulatore al piombo 12 V, 1,2 A). L'apparecchio è dotato di una presa di alimentazione esterna ma anche in questo caso deve necessariamente trattarsi di una batteria (es. batteria auto). La corrente di rete infatti è alternata con una frequenza di 50 Hz che ricade nella banda di ascolto e compromette gravemente la ricezione.

Questo tipo di strumento, pur essendo nato per un diverso scopo e concepito per fornire un'elaborazione analogica immediata, si è rivelato di gran lunga più idoneo di tutti i ricevitori radio fin ora utilizzati per monitorare segnali radiosismici, essendo specificamente dedicato alle bande E-VLF e dotato di grande sensibilità.

Presenta però l'inconveniente di non poter essere usato in vicinanza della rete di distribuzione elettrica a causa del forte disturbo elettromagnetico emesso dai cavi sulla frequenza di 50 Hz e le relative armoniche.

L'uso ottimale, in ambiente aperto, è limitato ad una distanza minima di 1 Km dalla rete elettrica a 220V e almeno 2 dagli elettrodotti. In laboratorio tuttavia una buona schermatura dell'ambiente di lavoro può essere sufficiente ad azzerare il rumore di fondo.

## **2.2 - IL SISTEMA ACQUISIZIONE DEI DATI**

Per tutte le prove effettuate (seconda serie, cfr. cap. 3.0) il sistema di acquisizione dei dati è consistito in un registratore audio a 4 tracce in grado di registrare su una comune audiocassetta i segnali provenienti contemporaneamente da 4 diversi strumenti. Gli strumenti utilizzati sono stati in totale 5:

- Radiogeofono
- Microfono di pressione
- Microfono acustico
- Radioricevitore multibanda
- Radioricevitore scanner

Tramite un sistema di cavi dedicati, appositamente costruito, l'alimentazione dell'impianto è stata fornita da un'unica batteria ricaricabile al piombo (12V, 8A) salvo che per il registratore e il ricevitore scanner. Altri tre cavi dedicati (coassiali RG58) sono stati appositamente realizzati per il collegamento del registratore ai tre ricevitori radio. Le caratteristiche tecniche essenziali sono elencate di seguito:

### **REGISTRATORE**

Registratore professionale portatile multitraccia TEAC R61 (fornito dal dott. Ugo Coppa dell'*Osservatorio Vesuviano* di Napoli).

Supporto magnetico: audiocassette modello commerciale

Canali: 4 tracce audio (2+2)

Ingresso e uscita audio di livello LINE.

### **RADIOGEOFONO**

Ricevitore autocostruito descritto nel capitolo precedente.

Banda 20 Hz - 13 kHz

Segnale sorgente: LINE base (cfr. cap 2.1)

Antenna: filare elettrica non risonante + presa di terra

### **MICROFONO DI PRESSIONE**

Sensore HBM-P11, amplificatore HBM-KWS3073 e adattatore di alimentazione (artigianale) messi a disposizione dal dott. Ugo Coppa dell'*Osservatorio Vesuviano*.

Sensibilità: 0,1 Bar a 500 Hz

### **MICROFONO ACUSTICO**

Microfono preamplificato professionale ACCORD PA196 di proprietà personale.

Tipo: omnidirezionale electret

Banda: 50Hz – 16kHz

Sensibilità: -65dB @ 1kHz

### **RADIORICEVITORE MULTIBANDA**

Ricevitore professionale MARC NR-82F1 di proprietà personale.

Banda: 145 kHz - 460 MHz suddivisa in 12 gamme

Modo: AM, FM, USB, LSB

Antenna: 4 antenne incorporate, 2 prese per antenna esterna, presa di terra e accordatore incorporato.

### **RADIORICEVITORE SCANNER**

Scanner palmare BLACK JAGUAR 200 – MKII di proprietà personale.

Banda: 26-520 MHz suddivisa in 5 gamme

Modo: AM, FM

Sensibilità: 1,0  $\mu$ V (banda UHF, modo AM)

Antenna: stilo multibanda o esterna



## **NASTRO MAGNETICO**

Audiocassetta TDK CDding 1 (70 minuti)

## **CAVI**

Cavetti vari, costruiti in base alle particolari necessità, di lunghezza max 2m

Segnale: coassiale RG58

Alimentazione: piattina 1,5mm

## **2.3 - PROCEDURA DI ANALISI DEI DATI**

I dati registrati durante i test provengono simultaneamente da 4 diversi strumenti e sono memorizzati su nastro magnetico con il magnetofono a quattro tracce. Le modalità di acquisizione per ciascuno strumento in ciascun test saranno discusse nel capitolo 3. Si tratta in ogni caso di segnali analogici la cui frequenza rientra nello spettro acustico e per questo motivo possono essere manipolati alla stregua di suoni, utilizzando tecnologie del tutto ordinarie:

## **HARDWARE**

- ◆ PC Pentium (150 MHz) dotato di scheda sonora

## **SOFTWARE**

- ◆ Spectrogram (freeware by R.S. Horn)
- ◆ Cool Edit Pro (Syntrillium)
- ◆ Excel (Microsoft)

Per effettuare un'analisi numerica il segnale analogico deve essere digitalizzato. In sostanza, la registrazione viene dapprima monitorata attraverso l'ascolto diretto e l'analisi spettrale in tempo reale, quindi, una volta individuato l'evento significativo, si procede al campionamento digitale di un certo intervallo di tempo. Dalla registrazione analogica si otterrà dunque un file digitale che mediante appositi software verrà utilizzato per ottenere oscillogrammi, spettrogrammi e dati numerici da elaborare ulteriormente attraverso l'uso del foglio elettronico.

### **2.3.1 - ATTREZZATURA**

- **PC:** l'elaborazione non richiede una configurazione hardware particolarmente ricercata. Qualsiasi processore della serie Pentium è abbastanza veloce da consentire lo svolgimento di tutte le procedure. Nel caso specifico è stato utilizzato un PC Pentium 150 MHz. L'unica periferica speciale richiesta è una scheda sonora, ormai integrata nel corredo standard di qualsiasi modello commerciale.
- **SCHEDA SONORA:** il valore delle schede sonore è solitamente funzione del numero e della qualità degli strumenti MIDI di cui è provvista. Nel nostro caso non è necessaria una scheda particolarmente potente poiché verrà sfruttata soltanto la funzione di digitalizzazione. Gli unici requisiti richiesti sono infatti quelli standard: ingresso analogico stereo a livello LINE, elaborazione a 16 bit. Nel caso specifico è stata utilizzata una scheda del tutto ordinaria, del valore commerciale di £ 40.000.
- **SPECTROGRAM:** è un software freeware realizzato da R.S. Horn (con la collaborazione di Philip Van Baren per il processo FFT). Questo programma molto

versatile è in grado di effettuare analisi spettrografiche in tempo reale utilizzando la trasformata veloce di Fourier (FFT). Gestisce la digitalizzazione (anche sotto TRIGGER), l'analisi FFT in varie modalità, il monitoraggio grafico dei dati FFT e il salvataggio dei risultati sotto forma di campioni sonori (formato WAVE) grafici (formati JPG e BMP) o tabelle numeriche (formato ASCII). Nonostante si tratti di un software di produzione amatoriale è certamente di grande qualità e largamente usato in tutto il mondo da radioamatori, etologi ed audiofili. E' stato utilizzato anche dalla NASA nelle pagine WEB dedicate ai segnali elettromagnetici emessi nell'atmosfera dagli sciami meteorici.

- COOL EDIT PRO: programma professionale per l'elaborazione dei suoni realizzato da David Jhonston e prodotto da Syntrillium. Lo scopo principale di questo potente software è la manipolazione dei suoni attraverso un'ampia gamma di filtri e processi e la realizzazione di brani musicali attraverso la fusione di campionamenti digitali. Potrebbe dunque essere applicato efficacemente per filtrare il rumore di fondo ed eventuali disturbi dalle registrazioni ma nel caso specifico è stato utilizzato semplicemente per ottenere grafici intensità-tempo.
- EXCEL: noto foglio elettronico di Microsoft. E' stato utilizzato per l'analisi numerica dei dati FFT: media del rumore di fondo, sottrazione del rumore di fondo e dei disturbi, valutazione dell'impronta spettrale, della distribuzione temporale e dell'energia totale.

### 2.3.2 - PROCEDURA

Il segnale di OUTPUT del registratore (livello LINE) viene immesso direttamente all'ingresso LINE della scheda sonora del PC. Tale scheda è tipicamente dotata di due ingressi analogici: MIC e LINE (spinotto JACK). Il primo, riservato all'uso di un microfono, è a basso livello e prevede l'amplificazione attraverso un circuito di Amplificazione Automatica di Guadagno (AGC) che agisce autonomamente sui picchi di massima e minima intensità livellando il segnale in un intervallo di ampiezza ideale. Per questo motivo non si addice all'analisi scientifica del segnale immesso. L'ingresso LINE invece è compatibile con il livello di uscita del registratore e non prevede l'azione dell'AGC.

Il collegamento tra registratore e PC è possibile soltanto con due canali alla volta (l'ingresso della scheda sonora è stereofonico) ed è stato effettuato attraverso un cavetto appositamente costruito che collega due conduttori coassiali unipolari (RG58) con testa BNC ad un unico spinotto JACK stereo.

Il segnale proveniente dal microfono di pressione si è rivelato il più idoneo a determinare l'istante degli eventi significativi (esplosione o rottura) ed è stato quindi utilizzato come riferimento di confronto con i vari segnali elettromagnetici (E-VLF, OM, UHF). Lo standard per l'accoppiamento dei canali è dunque "PRESSIONE+SEGNALE\_RADIO" e inoltre "PRESSIONE+AUDIO" per verificare la contemporaneità degli eventi. Per ogni registrazione (4 canali) si avranno quindi 3 coppie di segnali.

Una volta stabilito il collegamento tra registratore e scheda ed accertata l'apertura della porta LINE attraverso il software di sistema, è già possibile monitorare

acusticamente il contenuto delle registrazioni. L'analisi acustica è tutt'altro che riduttiva. Ciascun evento è riconoscibile e confrontabile immediatamente con evidenza e rapidità incommensurabili con i processi di analisi numerica. L'analisi "qualitativa" acustica delle registrazioni dunque, seppur non ufficialmente indicativa, è indispensabile per riconoscere gli eventi da campionare e per una classificazione preliminare.

L'analisi dei dati si è svolta attraverso cinque fasi:

- 1) monitoraggio
- 2) campionamento
- 3) estrazione dei dati FFT
- 4) importazione dei dati in ambiente Excel
- 5) elaborazione numerica

### **1) MONITORAGGIO**

La prima fase consiste dunque nel monitoraggio della registrazione alla ricerca degli eventi significativi. Tale operazione è effettuato su due canali alla volta attraverso l'ascolto diretto e l'analisi spettrografica in tempo reale ottenuta attraverso la funzione "SCAN INPUT" del programma Spectrogram (fig.1). Tale modalità fornisce due diagrammi simultanei per entrambi i canali: l'andamento dell'intensità del segnale in funzione del tempo e la distribuzione spettrale delle intensità in funzione del tempo. In questa fase di "sondaggio" non è necessario eseguire l'analisi FFT in base a parametri rigorosi. Per praticità è convenuto impostare una frequenza di campionamento (cfr. cap. 2.4.2) di 22 kHz e la visualizzazione a 8 bit dell'analisi su 512 punti ( $T=2,3 \times 10^{-2}$  s,  $Fr = 43,1$  Hz).

Individuato l'evento, il contagiri del registratore ne assicurerà una marcatura temporanea in base alla quale sarà possibile campionare un idoneo intervallo di tempo.

**2) CAMPIONAMENTO DIGITALE:** è effettuato dalla scheda sonora sotto la gestione di Spectrogram sempre nella modalità "SCAN INPUT". In realtà lo stesso lavoro lo aveva fatto anche prima, ma ora, selezionando dal menu l'opzione SAVE, sarà possibile salvare un intervallo di input a comando o tramite una soglia di trigger. In questa fase la digitalizzazione deve seguire un criterio rigoroso (cfr. cap. 2.4.2 per la teoria) e deve essere la medesima per ciascuna coppia di segnali. Poiché lo spettro udibile raggiunge i 20 kHz, per limitare i fenomeni di aliasing lo standard utilizzato è stato una frequenza di campionamento di 44100 Hz (opzione 44K, la massima consentita dall'hardware).

Per ottenere un compromesso con la velocità di elaborazione del Pentium 150 (operante su due canali contemporaneamente) la risoluzione è stata fissata a 8 bit. Una volta selezionato un opportuno intervallo di tempo, il campione digitale è stato salvato su HD come file WAVE sotto un nome così codificato: "AMBIENTE\_NOMETEST". Esempi:

**UC2\_08.08** ⇒ Cava Unicem (seconda fase), test effettuato in data 08.08  
(anno 2000, trattandosi della seconda fase)

**FS1\_A1** ⇒ Laboratorio FS (prima fase), test denominato "A1"

Tale operazione è stata effettuata per ciascuna delle tre coppie di segnali (PRESSIONE+SEGNALE) per ogni registrazione relativa ad un singolo test. Si sono ottenuti dunque 3 campionamenti digitali stereo per ciascun test.

### **3) ESTRAZIONE DEI DATI FFT**

Questa fase consiste nell'estrazione dal campione sonoro, per un determinato piccolo intervallo di tempo corrispondente ad un singolo evento significativo, di una sequenza di valori corrispondenti alle intensità (dB) relative ad ogni frequenza di una data distribuzione. Il significato di questa operazione è discusso in dettaglio nel capitolo 2.4.3.

L'operazione si effettua mediante la funzione "ANALIZE FILE" del programma Spectrogram. In sostanza, questa funzione richiama dall'HD il file, ne bufferizza il contenuto e vi esegue la medesima analisi spettrale vista in precedenza. In questa fase non esiste un'impostazione della frequenza di campionamento, ormai fissata dal file sorgente, ma la modalità di analisi FFT deve essere effettuata in modo rigoroso. Lo standard utilizzato è stato l'analisi su 512 punti che su una risoluzione di 44100 Hz corrispondono ad un intervallo temporale di  $1,2 \times 10^{-2}$  s e quindi ad una risoluzione in frequenza di 86,1 Hz.

Prima di procedere all'estrazione dello spettro è necessario classificare e marcare ciascun evento significativo. Per fare ciò si è eseguito il salvataggio della schermata dello spettrogramma (visualizzato nella modalità BN a sfondo bianco) nel formato grafico standard JPG. Il nome standard è stato il medesimo del file sorgente. Quindi sulla stampa del grafico (e sul file stesso mediante un ordinario software grafico) sono stati marcati con un numero crescente tutti gli eventi ritenuti significativi.

A questo punto si può procedere all'estrazione dei dati per ciascun evento. Questa operazione si esegue da Spectrogram fissando sull'area dello spettrogramma (opportunamente visualizzato con una risoluzione temporale di almeno 3 ms.) la posizione centrale dell'intervallo temporale di analisi in corrispondenza del picco massimo (visibile sul diagramma intensità-tempo) dell'evento significativo (riconoscibile sullo spettrogramma stesso).

Il programma esegue dunque l'analisi FFT secondo le modalità impostate e la visualizza immediatamente in un diagramma intensità-frequenza.

Come i precedenti grafici, anche questo può essere salvato in formato immagine negli standard BMP e JPG. In questo caso però ciò che è più importante è l'esportazione dei dati di origine. Questi possono essere salvati sotto forma di una tabella in formato testo (ASCII). Per ogni evento significativo è stato dunque salvato un file testo la cui denominazione standard è: "FILESORGENTE\_EVENTO".

Esempio: **FS2\_A1\_1**

#### **4) IMPORTAZIONE DEI DATI IN AMBIENTE EXCEL**

La tabella dati relativa alle analisi spettrali dei singoli eventi significativi si presenta come nella figura 4.

Il testo ASCII può essere importato in ambiente Excel impostando la lettura in colonne spaziate di formato testo a partire dalla riga 8.

Dal foglio così ottenuto si seleziona quindi la colonna corrispondente alle intensità che con le funzioni manuali COPY/PASTE verrà immessa nel foglio di calcolo appositamente costruito per l'elaborazione numerica.



## 5) ANALISI NUMERICA

L'analisi numerica viene effettuata sia sui segnali significativi che sul rumore di fondo (appositamente registrato prima di ogni test e campionato separatamente dai segnali utili). I valori spettrali del rumore di fondo verranno infine sottratti dagli spettri significativi. I segnali e il rumore verranno elaborati attraverso due rispettivi fogli di calcolo appositamente costruiti.

### • FOGLIO DI CALCOLO “RUMORE”

Ad eccezione delle scariche elettrostatiche atmosferiche e di rari fenomeni sporadici comunque rilevabili solo in ambiente aperto, il rumore di fondo è costituito da una distribuzione spettrale costante nel tempo. Tale rumore è dovuto principalmente alle emissioni della rete di distribuzione elettrica (tipicamente 50 Hz e relative armoniche), all'interferenza degli altri strumenti<sup>48</sup> (tipicamente segnali monocromatici) e in ultima analisi al lieve rumore caotico prodotto dai transistori nei vari circuiti. In questa fase il rumore da isolare e filtrare è appunto quello costante. Gli eventi di "statica" sono comunque brevissimi (tipicamente  $1,8 \times 10^{-2}$  s) e facilmente isolabili. Una semplice classificazione dei rumori e delle loro cause è riportata nel capitolo 1.5.

Occorre ora rivedere la precedente fase 3 in quanto, nel caso del rumore di fondo, l'operazione di estrazione dei dati FFT si deve svolgere su 10 campioni selezionati casualmente nella scala temporale e nella modalità “Spectrum Average = 128” ovvero nella massima larghezza disponibile che, in base ai parametri impostati per la FFT, corrisponderà alla media di un intervallo temporale della durata approssimativa di 1,5 sec. Lo scopo è ovviamente quello di ottenere dieci campioni spettrali relativi

---

<sup>48</sup> In particolare l'amplificatore del microfono di pressione

alla media di un largo intervallo di tempo da mediare ulteriormente con la successiva analisi numerica. I nomi standard attribuiti ai rumori sono stati così codificati CAMPIONE\_R(numero crescente). Esempio: FS2\_A1\_R1

Dopo l'importazione, la colonna intensità relativa a ciascun campione spettrale verrà inserita nell'apposita colonna predisposta nel foglio elettronico denominato "RUMORE".

Il foglio di calcolo RUMORE procederà alla media dei valori omologhi nelle 10 colonne (ovvero dei valori relativi alla medesima frequenza) producendo una nuova colonna denominata RUMORE MEDIO ed il relativo grafico intensità-frequenza. Abbiamo ora, per la media del rumore di fondo, lo spettro delle ampiezze in funzione della frequenza, relativo ad una scala di frequenze fissata dalla risoluzione (standard) impiegata nella trasformata di Fourier su un campionamento di una data frequenza (standard). Per i dettagli teorici vedere il cap 1.5.

- FOGLIO DI CALCOLO “SEGNALE”

Il foglio di calcolo denominato "Segnale" è stato appositamente costruito per sottrarre il "rumore di fondo medio" (ottenuto con l'operazione precedente) da ciascuno dei segnali significativi ed eseguire eventuali altre operazioni su questi segnali. I dati di INPUT sono dunque le colonne dati AMPIEZZA relative agli spettri dei segnali significativi e la colonna dati AMPIEZZA relativa al rumore medio rilevato nell'ambito dello stesso test.

## **2.4 - CENNI DI TEORIA**

In questa sezione si intende chiarire i dettagli teorici relativi alle procedure di acquisizione ed elaborazione dei dati. Verranno discusse le motivazioni della scelta dei vari parametri ed il significato fisico delle varie operazioni.

Per maggiore chiarezza si è ritenuto opportuno impostare la trattazione non sullo sviluppo matematico di formule e teoremi<sup>49</sup>, bensì sulla chiara spiegazione verbale dei concetti e dei meccanismi corredata dall'esposizione formale delle formule di riferimento. Inoltre è mia speranza che questa tesi possa essere di spunto per altri studenti di Scienze Geologiche affinché il metodo possa essere sviluppato nell'ambito della ricerca geologica e non divenga patrimonio esclusivo dei fisici.

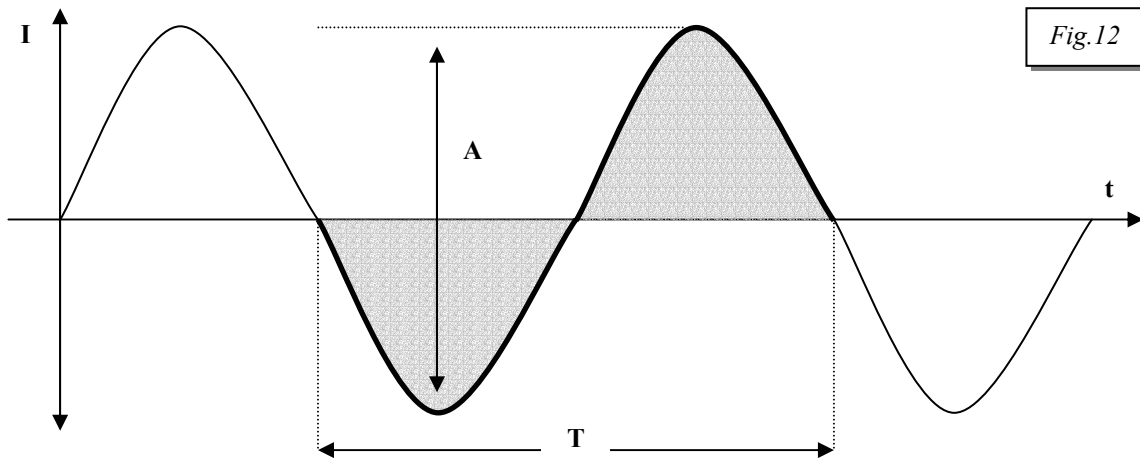
### **2.4.1 - NATURA E CARATTERISTICHE DEI SEGNALI**

In questo breve capitolo si intende semplicemente descrivere un segnale analogico e chiarire la differenza tra segnale elettromagnetico, elettrico ed acustico. Poiché il principale rilevatore usato (il radiogeofono GAIA) lavora in isofrequenza costituendo un trasduttore tra questi tre tipi di segnali, è facile che insorgano dubbi o ambiguità dialettiche durante la trattazione della tesi. I radioricevitori usati inoltre lavorano su frequenze radio ma forniscono segnali audio "estratti" artificialmente dall'emissione naturale. E' dunque necessario un chiarimento tecnico sul significato fisico di questi ultimi.

---

<sup>49</sup> Per ogni riferimento all'analisi numerica dei segnali la fonte bibliografica di formule e teoremi è comunque: M. Caputo, "Teoria ed analisi numerica e spettrale" (dispense del corso di Sismologia).

In generale i segnali con cui abbiamo a che fare sono costituiti dalla variazione nel tempo dell'intensità di una determinata entità fisica. Questa variazione può essere rappresentata su un riferimento cartesiano come un'oscillazione sinusoidale la cui ampiezza è in relazione all'intensità mentre la frequenza ne rappresenta la velocità di variazione nel tempo (fig.12).



Una FUNZIONE SINUSOIDALE, come il seno o il coseno, è caratterizzata da tre parametri:

- Ampiezza (**A**): differenza tra il valore massimo e il valore minimo
- Periodo (**T**): durata di un'intera oscillazione ovvero l'intervallo di tempo trascorso tra due punti omologhi dell'oscillazione (es. due massimi).
- Frequenza (**f**): numero di cicli che si manifestano nell'unità di tempo. Equivale matematicamente all'inverso del periodo:  $f=1/T$ ;  $T=1/f$ .

Naturalmente il nostro segnale non è costante come nella figura ma caratterizzato nel tempo da una notevole variabilità della frequenza. La gamma di frequenze che interessano il segnale determina la sua Banda.

Vediamo ora in particolare queste caratteristiche riferite direttamente ai segnali utilizzati.

La FREQUENZA è definita come numero di cicli nell'unità di tempo. L'unità di misura è rappresentata da 1 ciclo al secondo o Hz (Hertz):

$$\begin{aligned} 1 \text{ c/s} &= 1 \text{ Hz (Hertz)} \\ 1.000 \text{ c/s} &= 1 \text{ kHz (Kilohertz)} \\ 1.000.000 \text{ c/s} &= 1 \text{ MHz (Megahertz)} \end{aligned}$$

Nel nostro caso si tratterà sempre di frequenze molto basse (< 20 kHz).

La BANDA di frequenze che prenderemo in esame si estende da 20 Hz a 20 kHz e corrisponde (come misura) allo spettro delle frequenze udibili. Si tratterà - all'origine - di una gamma compresa tra le bande radio denominate ULF, ELF e VLF. Nel capitolo 1.4 è stata illustrata la posizione di tali bande nel contesto dello spettro elettromagnetico. Tra breve si vedrà invece come questa banda possa interessare diversi tipi di segnale.

L'AMPIEZZA del segnale è funzione dell'intensità con cui si manifesta l'entità misurata. Tale intensità, come comunemente si usa per i suoni, è stata quantificata in termini di rapporto tra potenza del segnale e potenza del rumore di fondo, ovvero in decimi di tale rapporto o dB (Decibel).

$$\text{Intensità (dB)} = 10 \log_{10} (S/R)$$

Appare evidente dalla formula che questa misura crescerà più lentamente del rapporto S/R (segnale/rumore), con proporzione logaritmica:

| Rapporto Segnale/Rumore | Misura in Decibel |
|-------------------------|-------------------|
| 2                       | 03                |
| 10                      | 10                |
| 100                     | 20                |
| 1.000                   | 30                |

La misura in dB si presta dunque a rappresentare in modo compatto forti escursioni di intensità.

Quanto visto fin ora vale per tutti i segnali, indipendentemente dalla natura dell'entità che variava in intensità. La natura di questa entità invece rende un segnale sostanzialmente eterogeneo con un altro che abbia pur le stesse caratteristiche ma una diversa natura. La natura del segnale lo rende inoltre vincolato ad uno specifico supporto per potersi propagare, oppure gli permette di non averne affatto bisogno.

Il segnale naturale che si intende studiare è di natura ELETTROMAGNETICA, è costituito cioè dalla concatenazione per autoinduzione di un CAMPO ELETTRICO ed un CAMPO MAGNETICO variabili, le cui oscillazioni risulteranno sfasate tra loro di  $90^\circ$ . La natura di queste oscillazioni non richiede un mezzo di sostentamento; possono quindi propagarsi anche nel vuoto.

Si tratterebbe in poche parole di comuni "segnali radio", con l'eccezione che la banda di frequenze che intendiamo indagare è talmente bassa da non rientrare nelle gamme normalmente utilizzate per le radiocomunicazioni (cfr. cap. 1.4). La principale ambiguità dialettica consiste appunto nel fatto che tali oscillazioni hanno frequenze analoghe a quelle dei suoni.

Il suono è costituito dall'OSCILLAZIONE MECCANICA dell'aria (variazione di pressione).L'aria è dunque un mezzo di propagazione indispensabile per questo segnale. Il fischio di un suono ad 1 kHz quindi non ha nulla a che fare con la radiazione elettromagnetica (radio) alla frequenza di 1 kHz, se non il fatto di oscillare con il medesimo ritmo. Il suono per definizione è limitato alla banda 20 Hz - 20 kHz, poiché questo è l'intervallo di frequenze udibili dall'orecchio umano con una massima sensibilità intorno ai 2 kHz. Oscillazioni di questa stessa natura si estendono tuttavia sopra e sotto lo spettro udibile (ultrasuoni, infrasuoni).

Il terremoto è anch'esso costituito da un'oscillazione MECCANICA ma di un mezzo differente: il suolo. Da questo punto di vista l'onda sismica è affine al suono e può infatti propagarsi dal suolo all'aria trasformandosi in onda acustica. Ciò che le differenzia però nella sostanza, oltre al mezzo di origine e propagazione è la banda di

frequenza poiché le oscillazioni sismiche sono tipicamente più lente delle oscillazioni acustiche, soprattutto quando, filtrate dal suolo, raggiungono grandi distanze (cfr. cap. 1.6).

Un segnale elettrico (analogico) deriva dalla variazione di intensità di una CORRENTE ELETTRICA che si propaga attraverso un mezzo conduttore. E' un segnale elettrico quello che collega due apparecchi telefonici. Se questo segnale viene utilizzato per trasferire informazioni acustiche, esso può presentare la stessa larghezza di banda di un segnale acustico.

Il radiogeofono GAIA capta SEGNALI ELETTROMAGNETICI a bassissima frequenza. Si tratta di segnali radio di frequenza corrispondente allo spettro acustico che possono permeare più o meno facilmente qualsiasi oggetto materiale. La componente CAMPO ELETTRICO di questo segnale viene immediatamente trasformata in SEGNALE ELETTRICO che percorre i circuiti dell'apparecchio subendo varie manipolazioni elettroniche. La frequenza non è cambiata e l'ampiezza può subire variazioni in modo comunque proporzionale al segnale di origine (amplificazione). Infine questo segnale può essere trasformato in OSCILLAZIONE MECCANICA dell'aria che potrà essere udita poiché la banda corrisponde allo spettro acustico. La frequenza infatti è rimasta sempre la stessa in tutti i processi. Per quella banda di frequenze il radiogeofono si è comportato quindi come un trasduttore tra tre tipi di segnale limitandosi ad azioni di filtraggio ed amplificazione.

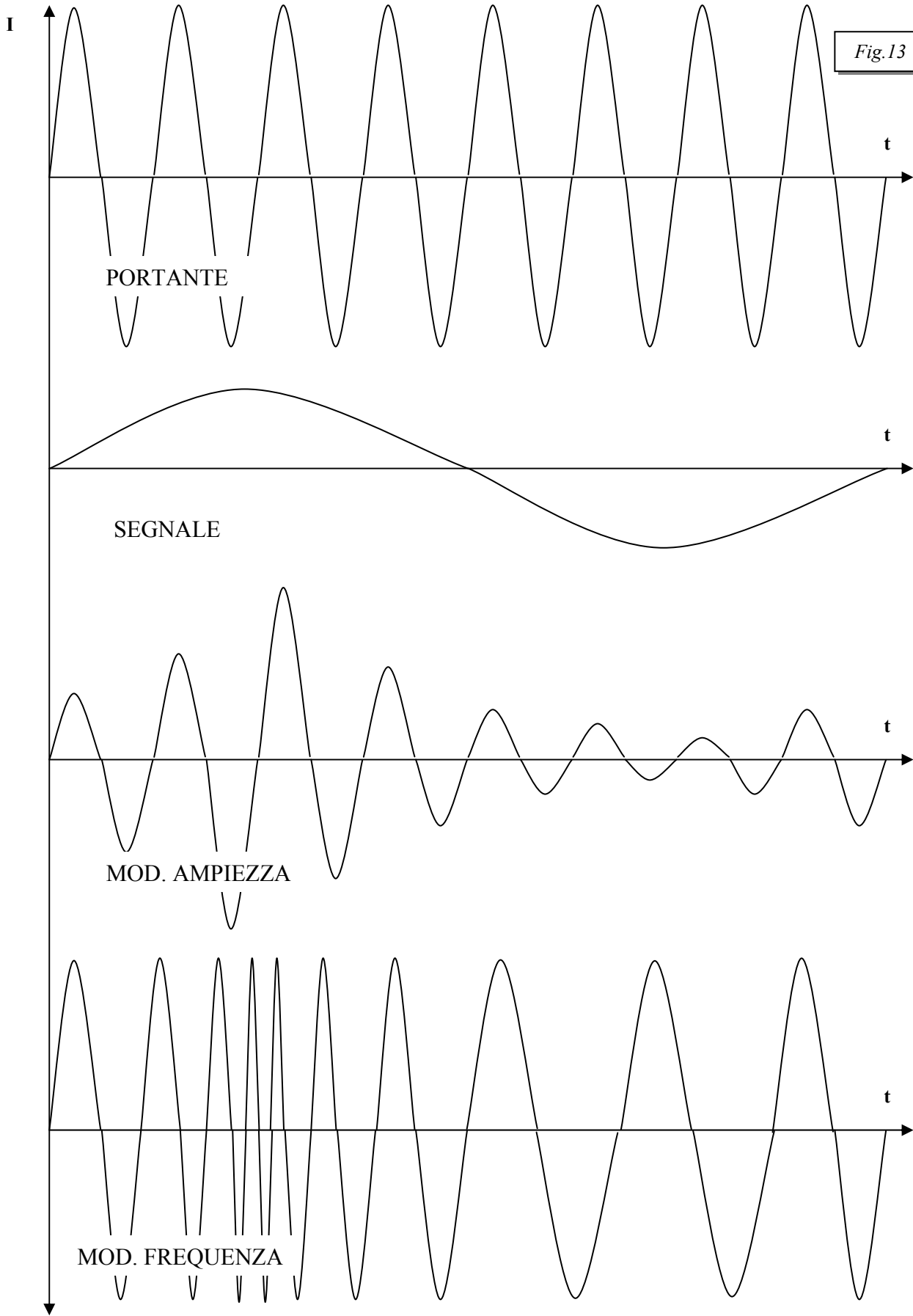
Per quanto riguarda le apparecchiature radio il discorso è diverso. Per sua natura il circuito radio agisce sul segnale elettromagnetico estraendone un'informazione



(variazione di ampiezza o di frequenza) che si presume sia codificata in forma di interferenza nella costanza del segnale sorgente. Ciò che si ascolta è dunque un suono corrispondente alla variazione di interferenza sulla frequenza o sull'ampiezza di un segnale elettromagnetico costante e stabile. Constatato che i segnali radiosismici precursori (simulati ad alta velocità) sono di tipo impulsivo e che comunque la frequenza degli impulsi è immensamente più bassa delle radiofrequenze scelte, nel caso dell'ascolto in banda radio si è preferito usare la rivelazione in MODULAZIONE DI AMPIEZZA (AM) che fornisce un suono proporzionale alla variazione di intensità del segnale elettromagnetico naturale. L'effetto è quello di udire uno "schiocco" in corrispondenza di ogni impulso e quindi un suono simile ad uno scricchiolio per l'intero fenomeno precursore.

La figura 13 mostra come in una trasmissione radio artificiale la componente "segnale" può modulare l'onda "portante" in ampiezza (AM) o in frequenza (FM). Rivelando l'emissione naturale con un comune radoricevitore, l'impianto tenterà di estrarne un segnale fittizio in una delle due modalità.

Fig.13



## 2.4.2 - IL CAMPIONAMENTO DIGITALE

Il segnale sorgente di tutti gli strumenti utilizzati in questa ricerca è di tipo ANALOGICO. E' costituito da un segnale elettrico variabile nel tempo in modo continuo sia in ampiezza che in frequenza. La banda di variazione in ampiezza determina il livello di amplificazione (LINE) mentre la banda di variazione della frequenza determina lo spettro (AUDIOFREQUENZA).

Un SEGNALE ANALOGICO è appunto un segnale le cui caratteristiche (ampiezza e frequenza) possono variare gradualmente (nel tempo) in un intervallo continuo, ovvero costituito da un numero infinito di possibili valori.

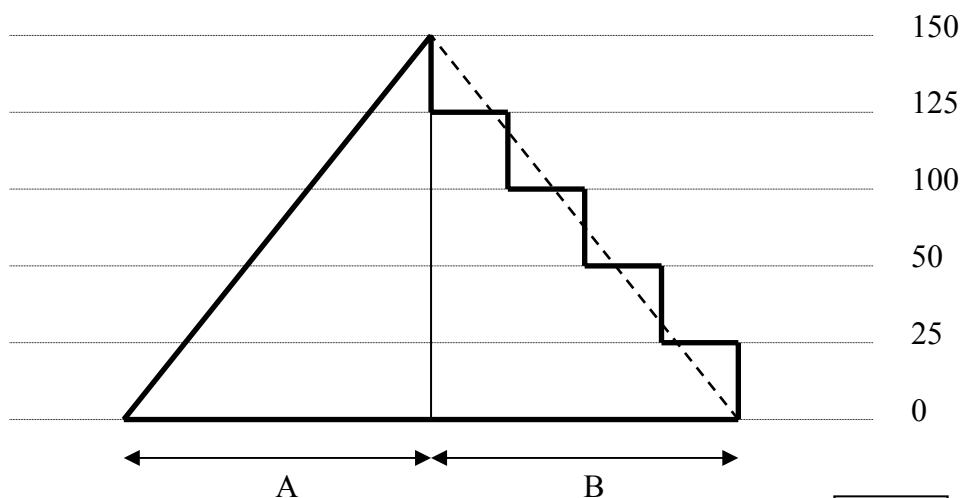
Questo tipo di segnale è quello che comunemente possiamo ascoltare dall'altoparlante di telefoni, radio, TV, e impianti hi-fi. La banda di frequenza compresa tra 20 Hz e 20 kHz lo rende udibile alle nostre orecchie e le basse velocità di variazioni in ampiezza e frequenza sono facilmente interpretabili dal cervello. Un segnale analogico a bassa frequenza si presta dunque con estrema facilità ad un'interpretazione qualitativa immediata.

Se però si vogliono effettuare rigorose valutazioni quantitative e se soprattutto si intende codificare il segnale in una sequenza numerica che possa essere sottoposta ad analisi e manipolazioni (filtraggi) di tipo matematico, il segnale analogico deve essere trasformato in segnale DIGITALE.

Un SEGNALE DIGITALE può variare (nel tempo) solamente attraverso bruschi salti all'interno di una scala di livelli definiti, ovvero in un insieme finito di valori

standard. Questo significa che le informazioni relative alle variazioni nel tempo di ampiezza e frequenza verranno quantizzate in coppie di valori definiti attribuibili ad un determinato istante di una scala temporale quantizzata.

Un semplice esempio per visualizzare la differenza tra il segnale analogico e quello digitale con una metafora “geologica” può essere fatto immaginando un topografo che rileva le quote di un’altura percorrendo con l’altimetro due versanti che presentano la medesima pendenza, sebbene uno dei due sia “a gradinata” (diciamo che è una cava) come si vede nella figura 14. Durante la salita la distanza in pianta A viene percorsa variando la quota in modo continuo (variazione analogica) mentre nella discesa la medesima distanza (B) è coperta con un certo numero di salti tra quote equidistanti (variazione digitale). Tuttavia la variazione media di quota in funzione della distanza percorsa in pianta sarà stata la stessa. I dati raccolti dal topografo sono quindi relativi ad un incremento/decremento della stessa entità ma nel primo caso il flusso dei dati è pervenuto in modo continuo o analogico mentre nel secondo risulta quantizzato allo stesso modo di un campionamento digitale.



*Fig. 14*

Il CAMPIONAMENTO digitale di un segnale analogico consiste nell'estrazione di una matrice numerica dal segnale analogico. Tale matrice costituisce il segnale digitale che rappresenterà quantitativamente le stesse informazioni che erano contenute nel segnale analogico originale. Questa matrice si ottiene sondando l'ampiezza del segnale analogico a intervalli regolari e quantizzandola in base ad una scala precostituita. Nell'ambito di questa ricerca questa operazione è stata svolta in modo automatico dalla scheda sonora del personal computer.

In base a questa definizione è evidente che i parametri del campionamento sono la frequenza dei sondaggi e la risoluzione nella valutazione del campione.

La FREQUENZA DI CAMPIONAMENTO (**F<sub>c</sub>**) rappresenta il numero di "sondaggi" (campioni) effettuati nell'unità di tempo (sec) e si misura in Hz:

$$10 \text{ campioni al secondo} \Rightarrow F_c = 10 \text{ Hz}$$

La RISOLUZIONE DI CAMPIONAMENTO (**R<sub>c</sub>**) rappresenta la quantità di informazione (bit) codificata in un singolo campione ed è legata quindi al numero di intervalli discreti in cui è stata suddivisa la caratteristica da rilevare nel campione:

$$\mathbf{R_c} = \log_2 (\text{numero di livelli}) \quad \text{bit}$$

Supponiamo infatti di vedere l'ampiezza del segnale come la sua luminosità. A parità di  $F_c$ , potremmo suddividere lo spettro continuo (analogico) che va dal bianco al nero in una gamma cromatica di 256 toni di grigio (scala digitale a 256 livelli) ed ottenere così una buona valutazione della luminosità, oppure suddividere l'intero

spettro in sole 16 gradazioni di grigio ed ottenere una rappresentazione molto approssimata della realtà poiché ognuno degli infiniti valori reali dovrà essere approssimato ad una di queste categorie. A parità di  $F_c$ , più la scala di intensità è fitta e migliore sarà la valutazione del campione. Parimenti più alta risulterà la risoluzione del campionamento. Ecco una scala dimostrativa:

| Livelli di intensità | Risoluzione (bit) |
|----------------------|-------------------|
| 2                    | 1                 |
| 4                    | 2                 |
| 16                   | 4                 |
| 256                  | 8                 |
| 65.536               | 16                |

A rigore sarebbero indicativi del campionamento anche due parametri temporali che in questa ricerca risultano però di secondaria importanza:

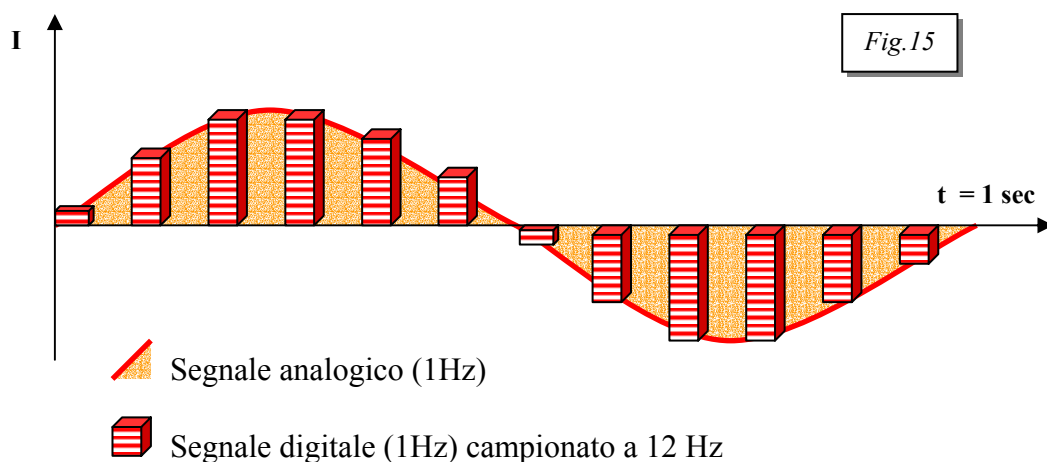
Il PERIODO DI CAMPIONAMENTO ( $T_c$ ) è l'intervallo di tempo che separa due campioni successivi ( $T_c=1/F_c$ ).

La DURATA DEL CAMPIONAMENTO ( $D$ ) sarebbe altrettanto significativa in quanto corrisponde al periodo della più bassa frequenza codificabile nel file digitale. Frequenze più basse corrisponderanno a cicli di durata più lunga della durata del campionamento e quindi i dati ad esse relativi (i soliti 2 punti per ogni ciclo) non saranno stati raccolti:  $F_{min}=1/T_{max}=1/D$ . In realtà questo discorso è rilevante solo nei segnali sismici. La frequenza più bassa della banda acustica è infatti 20 Hz, corrispondente ad un periodo di 0,05 sec, ben più corto della durata delle registrazioni (tipicamente 3 ordini di grandezza)

La Frequenza ( $F_c$ ) e la Risoluzione ( $R_c$ ) del campionamento digitale sono i due parametri che si sono dovuti impostare nelle fasi di monitoraggio e campionamento dei dati analogici che sono state discusse nel capitolo precedente (2.3).

Da un punto di vista matematico il processo di digitalizzazione equivale al prodotto convolutivo della funzione segnale con una funzione PETTINE DI DIRAC di opportuna frequenza. Questo "Pettine di Dirac" non è altro che un'onda quadra portata ad avere un'ampiezza infinita e una frequenza pari ad  $1/2$  della  $F_c$  desiderata. Il "prodotto convolutivo" produce sostanzialmente una sovrapposizione tra le due funzioni nella quale saranno persi in considerazione soltanto i valori del segnale selezionati dai denti del pettine.

Matematicamente il processo equivale ad un filtraggio numerico; idealmente è come se con un pettine materiale avessimo letteralmente "graffiato" il segnale analogico, rendendolo digitale come si può vedere nella fig.15 che rappresenta la digitalizzazione di un segnale di  $f = 1$  Hz digitalizzato a  $F_c = 12$  Hz con un numero imprecisato di livelli. Nella realtà il PC non farà altro che osservare l'ingresso analogico 44100 volte al secondo e valutare ciò che vede secondo una scala di 256 livelli di intensità.



In questo capitolo è stata considerata una sola caratteristica del segnale sorgente: l'ampiezza. Ma c'è ancora una cosa da dire riguardo la frequenza di campionamento: essa determina la massima frequenza risolvibile nel segnale digitalizzato e quindi può compromettere la visibilità delle informazioni originariamente contenute nel segnale analogico. Questo ed altri fenomeni relativi alla frequenza del segnale saranno discussi nel prossimo paragrafo.

### **2.4.3 - ANALISI SPETTRALE**

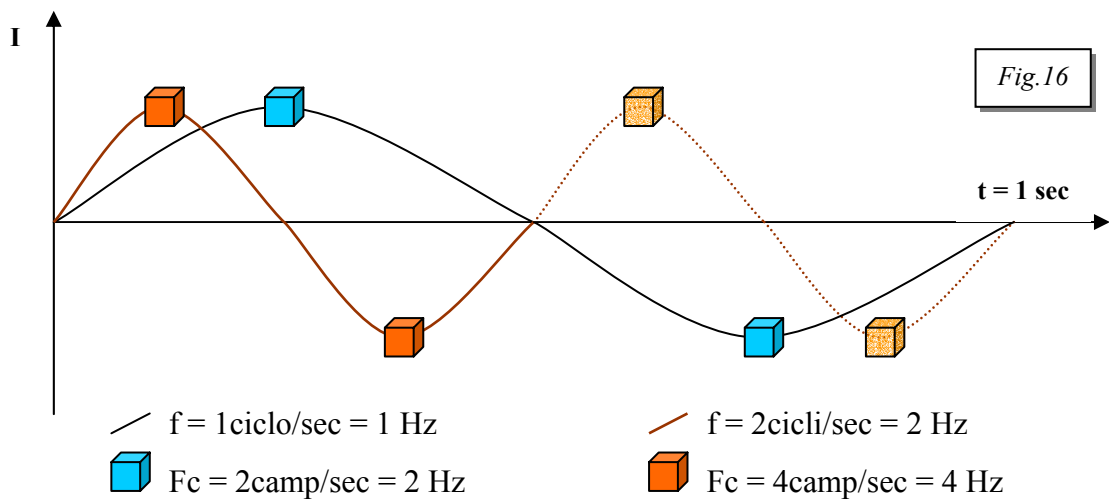
Abbiamo già visto il segnale sorgente, di tipo analogico, trasformato in segnale elettrico - sempre analogico - per poter essere registrato su un comune nastro magnetico. Il segnale elettrico riprodotto dal magnetofono è stato successivamente campionato dallo stadio digitalizzatore della scheda sonora del PC per trasformarsi in segnale digitale ed essere nuovamente registrato su un supporto magnetico (Hard Disk) sotto forma di un file di dati.

Durante questi passaggi è già stato possibile monitorare acusticamente e visivamente il segnale valutandone qualitativamente il contenuto. Ci si propone ora di analizzare matematicamente le caratteristiche di ampiezza e frequenza dei dati registrati. In particolare si vuole valutare il valore di ampiezza corrispondente a ciascuna frequenza in un dato istante, ovvero la distribuzione spettrale delle ampiezze. Prima di ciò è però necessario fare alcune precisazioni sulla fedeltà del campionamento per quanto riguarda la frequenza.



Il TEOREMA DI NYQUIST dimostra che un segnale analogico di banda  $B$  (la cui variabilità di frequenza si estende cioè da 0 a  $B$  Hz) può essere completamente ricostruito mediante una campionatura effettuata  $2B$  volte al secondo ( $F_c = 2B$  Hz).

Il motivo di ciò, al di là delle formule, è chiaramente illustrato nella fig.16: più punti si hanno (campioni), più dati si avranno per ricostruire l'andamento della funzione.



Il numero minimo di punti equidistanti che possono "inchiodare" una sinusoide regolare corrisponde a 2, nell'arco del medesimo ciclo. Ecco dunque che per ogni frequenza  $f$ , il numero minimo di punti da scansionare sarà  $2f$ . Se la massima frequenza è  $B$ , la frequenza di campionamento necessaria per "vedere" fino a quella frequenza sarà  $F_c = 2B$ .

Conseguenza inversa di ciò sarà che, data una frequenza di campionamento  $F_c$ , la MASSIMA FREQUENZA RISOLVIBILE nel segnale campionato sarà  $F_{\max} = F_c/2$ , detta anche Frequenza di Nyquist (**F<sub>n</sub>**).

Poiché il processo di digitalizzazione viene effettuato dalla scheda sonora, la cui  $F_c$  procede a passi standard, la  $F_{max}$  che potremo ricavarne sarà vincolata ai seguenti parametri:

| <b>Set scheda sonora</b> | <b><math>F_c</math> effettiva</b> | <b><math>F_n = F_{max}</math></b> |
|--------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| 44K                      | 44100,00 Hz                       | 22050,000 Hz                      |
| 22K                      | 22050,00 Hz                       | 11025,000 Hz                      |
| 11K                      | 11025,00 Hz                       | 5512,500 Hz                       |
| 5.5K                     | 5512,50 Hz                        | 2756,250 Hz                       |

Per campionare una banda corrispondente allo spettro acustico ( $B = 20$  kHz) la  $F_c$  ottimale è dunque quella corrispondente al passo 44K della scheda sonora, corrispondente ad una  $F_n = 22050$  Hz, di poco superiore alle nostre esigenze. Non per nulla è il passo limite della "scheda sonora".

Cosa accadrebbe campionando con una frequenza più bassa è facilmente riconoscibile ascoltando due brani musicali diversamente campionati: quello a bassa frequenza sarà naturalmente identico all'altro nella melodia, ma avrà un'intonazione sensibilmente più bassa. Il campionamento con  $F_c < 2F_n$  ha prodotto, in un certo senso, un filtro passa-basso. Ma le componenti spettrali di frequenza maggiore di  $F_c$ , quelle cioè "non passate", naturalmente avevano come attributo una certa intensità di segnale, ovvero costituivano una certa aliquota dell'energia totale del segnale analogico. Che fine ha fatto ora questa energia?

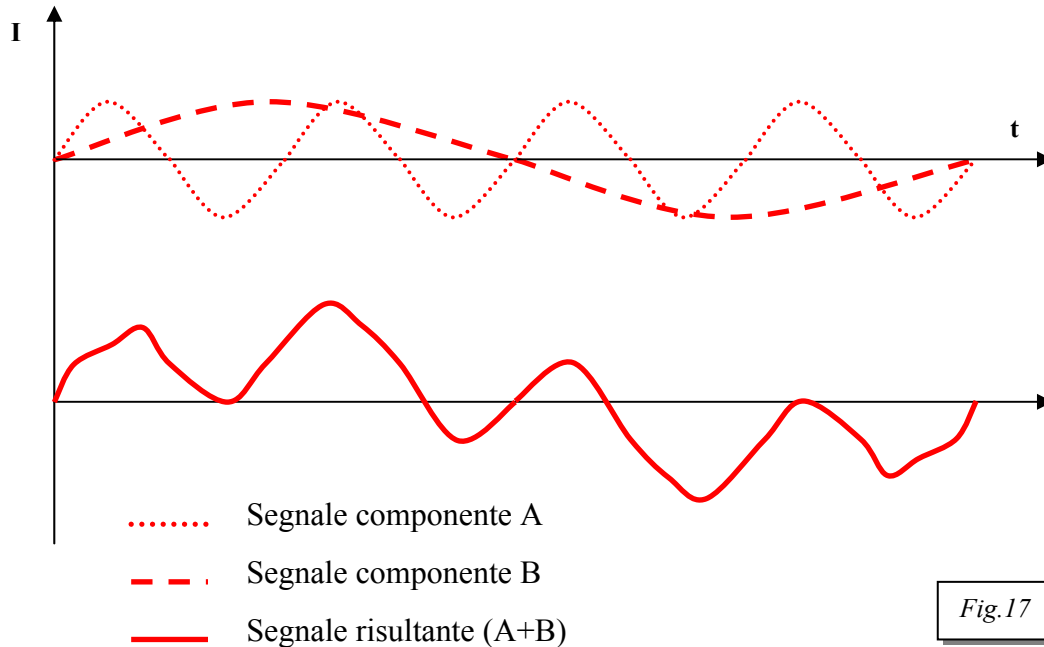
Il problema principale di un campionamento "sottodimensionato" è proprio che questa energia di fatto è ancora contenuta nel segnale digitale e risulterà sovrapposta ai valori di intensità (ampiezza) delle frequenze più basse della banda. Questo fenomeno, noto come ALIASING, è dimostrabile matematicamente.

Qui però tratteremo soltanto i suoi effetti materiali, visibili nello spettro come dei picchi di intensità anomala sulle basse frequenze, analogamente ad un ripiegamento speculare della distribuzione spettrale. In parole semplici, le frequenze alte "tagliate fuori" dal campionamento sono andate a "sporcare" la regione delle frequenze più basse. Vedremo più chiaramente questo fenomeno in un esempio specifico dopo aver discusso la distribuzione spettrale.

Torniamo ora al segnale digitalizzato, rappresentazione "quantizzata" dell'originale segnale analogico. Il punto di vista con cui inizialmente osservavamo un segnale (analogico o digitale che fosse) era limitato al "dominio del tempo". Lo abbiamo visto infatti come la variazione in funzione del tempo di una intensità. Tale variazione poteva essere rappresentata su un diagramma cartesiano come una sinusoidale (fig. 2 cap. 2.4.2).

Nella realtà la forma del segnale sorgente, che già di per sé non è regolare ma incostante, è costituita dalla somma algebrica (interferenza) di una molteplicità di segnali di frequenza diversa. In poche parole, all'origine dell'emissione registrata vi sono uno o più fenomeni manifestatisi su diverse frequenze contemporaneamente. La somma algebrica delle ampiezze risultanti in un dato istante costituisce l'ampiezza

totale del segnale in quell'istante. La frequenza del segnale è condizionata dalla variazione nel tempo di tale somma (fig.17).



Il vantaggio di avere una versione digitale e dunque "numerica" del segnale si manifesta appunto nella possibilità di poter risalire ad ogni componente spettrale della banda B attraverso processi matematici. Data una serie di intensità nel "dominio del tempo" (campionamento digitale) l'ANALISI DI FOURIER riconduce infatti ad una serie di intensità nel "dominio delle frequenze", ovvero allo SPETTRO DELLE AMPIEZZE.

Il matematico francese Fourier dimostrò nell'800 che 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:

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

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  $t$ . Questa operazione in grado di trasferirci dal dominio dei tempi a quello delle frequenze è nota come ANALISI DI FOURIER.

Matematicamente questo significa che qualunque segnale, per quanto irregolare si presenti, potrà sempre essere scomposto in una somma di funzioni sinusoidali aventi ciascuna una propria ampiezza e una propria frequenza.

Il segnale sorgente  $g(t)$ , osservato per un intervallo di tempo  $T$ , si può quindi rappresentare "nel dominio delle frequenze" come una serie di valori di intensità riferiti allo spettro delle frequenze componenti nell'ambito di  $B$ .

La figura 18 mostra il segnale periodico già visto in fig.17, trasposto dal dominio dei tempi al dominio delle frequenze attraverso l'analisi di Fourier eseguita sui seguenti parametri:

$$F_c = 24 \text{ Hz}$$

$$F_n = 12 \text{ Hz}$$

$$T_a = 2 \text{ sec}$$

$$F_r = 0,5 \text{ Hz}$$

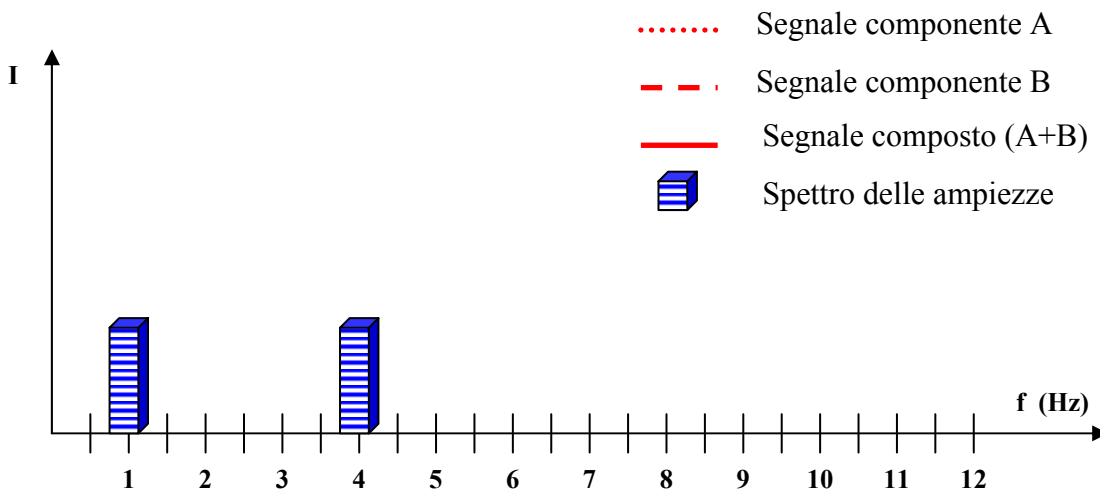
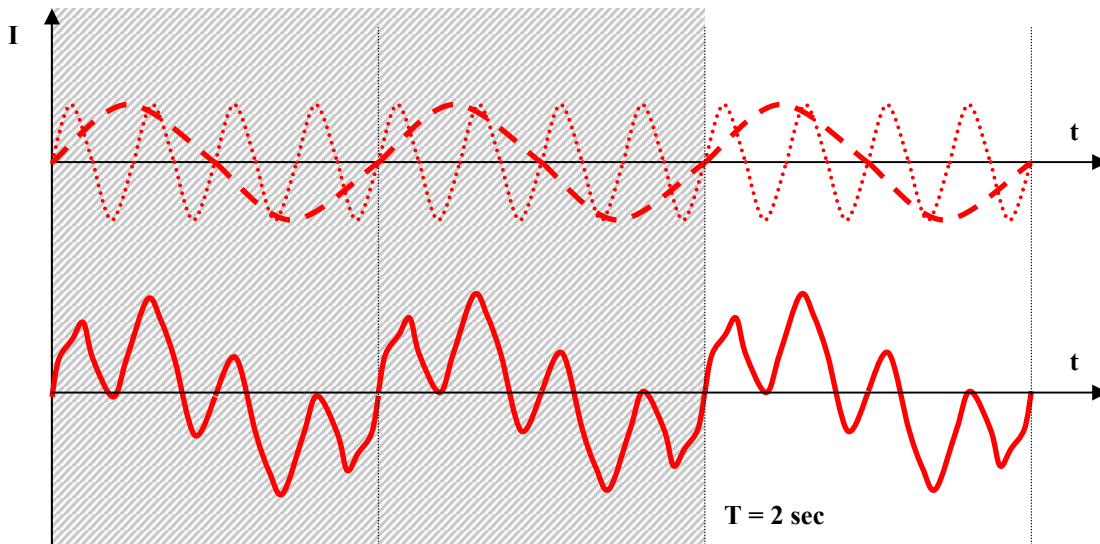


Fig.18

Ecco dunque che l'analisi numerica del segnale digitalizzato ci consente di risalire alle componenti che hanno originato il segnale sorgente analogico.

In questa ricerca tale operazione è stata svolta dal PC in modo automatico mediante il software di analisi acustica "Spectrogram" che applica al campionamento un algoritmo veloce basato sulla trasformata di Fourier (FFT). Nello sviluppo dell'analisi FFT si è dovuto definire un "numero di punti" su cui lavorare che avrebbe

poi influenzato la "risoluzione in frequenza". Vediamo ora il significato di questi parametri.

Abbiamo appena visto che nell'analisi matematica era stato "osservato" il segnale per un intervallo di tempo  $T$ . Poiché il segnale è campionato, all'interno di questo intervallo troveremo un determinato numero di campioni fissato dalla  $F_c$ . Infatti ciò su cui si sta effettivamente lavorando sono i valori di ampiezza riferiti ad un determinato numero di punti della sinusoide sorgente che erano quelli intercettati dai denti del pettine di Dirac, da cui la dipendenza da  $F_c$ .

Il programma usato agisce materialmente sui campioni e quindi si riferisce direttamente al numero di punti ( $n$ ) su cui operare la FFT. Questo dato però è molto importante perché, risalendo all'intervallo di analisi  $T$  ci consente di stimare la minima frequenza risolvibile dall'analisi spettrale ( $F_{\min}$ ) che poi sarà anche il "passo" della scala delle frequenze. Vediamo bene come:

$$n/F_c = T \quad (\text{tempo trascorso per raccogliere } n \text{ campioni alla velocità } F_c)$$

$$F = 1/T \quad (\text{frequenza corrispondente al periodo di osservazione } T)$$

Ciò significa che osservando il segnale per un periodo  $T$ , non si potranno "vedere" frequenze più basse di  $F_{\min}=1/T=F_c/n$ . A frequenze più basse corrispondono infatti periodi più lunghi di quello usato.

Dopo la massima frequenza risolvibile ( $F_{\max}=Fn$ ) definita dalla frequenza di campionamento  $F_c$ , abbiamo ora una MINIMA FREQUENZA RISOLVIBILE o "risoluzione dell'analisi spettrale" ( $F_r=F_{\min}$ ) anch'essa funzione di  $F_c$ :

$$\begin{aligned} F_{\max} &= Fn = F_c/2 \\ F_{\min} &= F_r = F_c/n \end{aligned}$$

Tale  $F_{\min}$  o  $F_r$  è anche la distanza che separa i valori sulla scala delle frequenze dello spettro delle ampiezze. Dunque se si desidera leggere frequenze più basse ovvero ottenere una scala spettrale a maggiore risoluzione occorrerà eseguire la FFT su un maggior numero di punti. Questo equivale però ad "osservare" il segnale per un intervallo di tempo  $T_a$  più lungo, durante il quale potrebbero succedersi fenomeni differenti. La seguente tabella mostra le risoluzioni ottenibili da un campionamento di  $F_c=44100$  Hz in base ad una scala  $n$  che, per esigenze software, progredisce a multipli di 2:

| N. di campioni ( <b>n</b> ) | Intervallo di analisi ( <b>T<sub>a</sub></b> ) | Risoluzione spettrale ( <b>F<sub>r</sub>=F<sub>min</sub></b> ) |
|-----------------------------|--|--|
| 512                         | 0,012 sec                                      | 86,1 Hz  |
| 1024                        | 0,023 sec                                      | 43,1 Hz  |
| 2048                        | 0,046 sec                                      | 21,5 Hz  |



Per studiare fenomeni impulsivi di brevissima durata come quelli richiesti da questa ricerca è conveniente operare su un intervallo di tempo piccolo a sufficienza da contenere un singolo evento. Trattandosi di impulsi della durata media di  $10^{-2}$  sec, il compromesso è stato quello di scegliere il valore minimo  $n=512$  ( $T=1,2 \cdot 10^{-2}$  sec) ottenendo così una risoluzione spettrale di 86 Hz. Del resto al di sotto di questa frequenza si sarebbe potuto risolvere ben poco a causa di eventuali aliasing, di eventuali disturbi a 50 Hz (rete elettrica) e del fatto che tutta l'elettronica usata è stata concepita per lavorare in audiofrequenza, al di sopra cioè dei 20 Hz.

Le immagini che seguono (fig.19) mostrano una sequenza radiosismica osservata nel dominio dei tempi per un intervallo  $T=0,8$  s, lo stesso intervallo analizzato nel dominio delle frequenze ed il singolo spettro ( $T_a=0,012$  s ;  $F_r=86,1$  Hz) dell'evento indicato dalla freccia.

Singolo evento

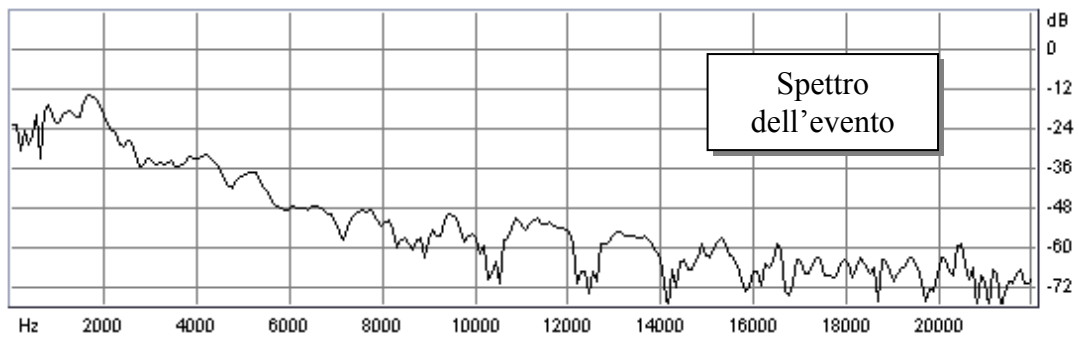
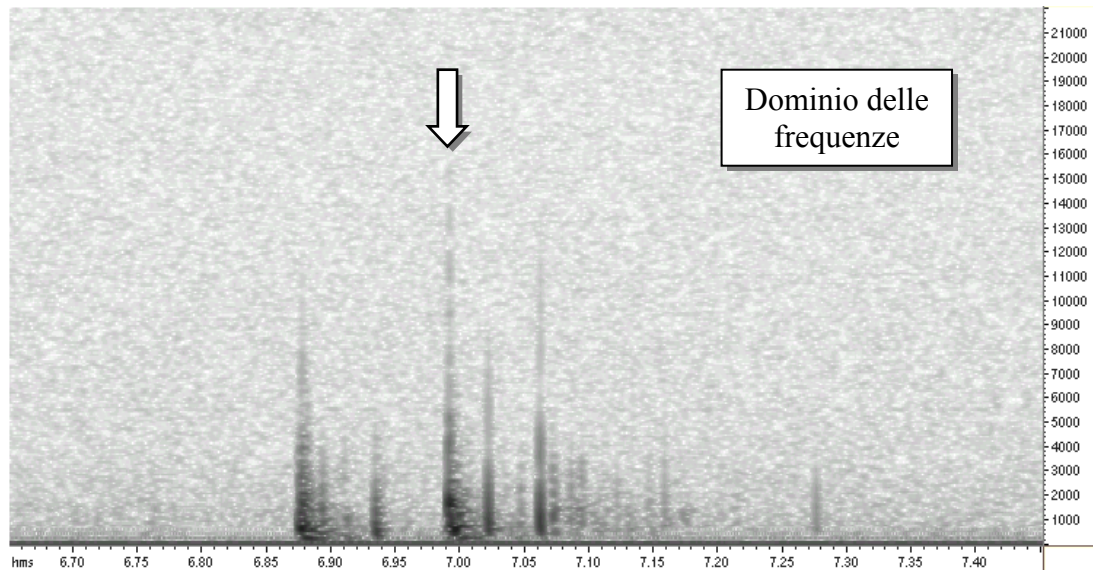
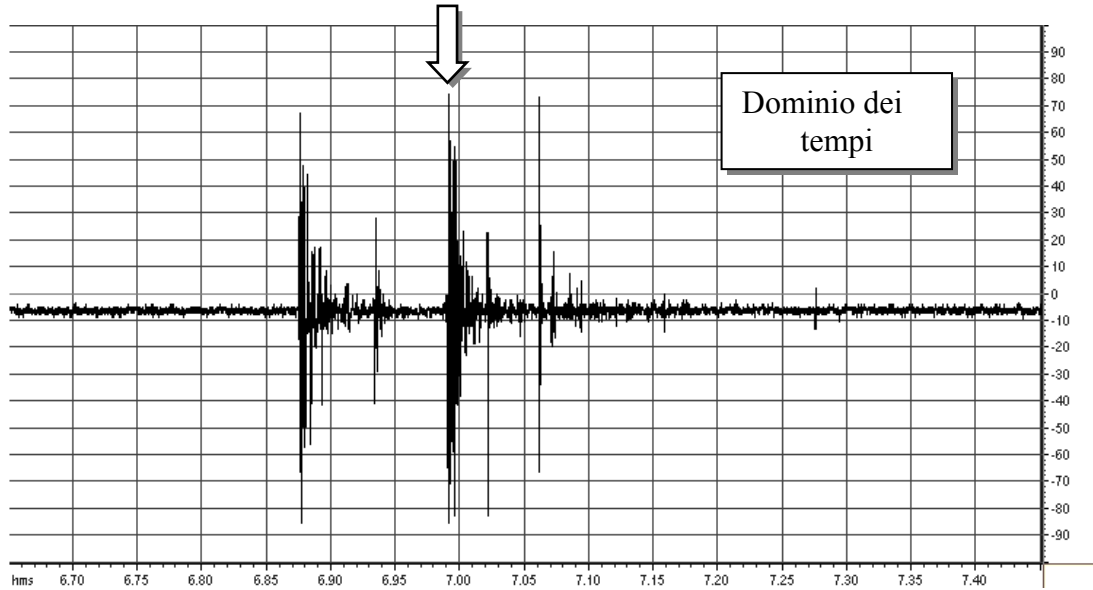


Fig.19 - Esempio di sequenza radiosismica osservata su oscillogramma (in alto) e spettrogramma (al centro). In basso lo spettro di un singolo impulso corrispondente a quello indicato dalla freccia. Rilevamento effettuato su un campione di porfido fratturato per compressione uniassiale presso il Laboratorio Sperimentale F.S. Tempi in secondi, frequenze in Hz, intensità in % (oscillogramma) e decibel (spettro).

## DUE ESEMPI PARTICOLARI

A titolo dimostrativo seguono ora un esempio di aliasing evidenziato dall'analisi spettrale e lo spettro armonico di un segnale impulsivo. Si tratta in effetti di due dei problemi più tipici che sono stati incontrati nel corso di questa ricerca.

- ALIASING

Il segnale S, composto dalle frequenze A=1,5 kHz, B=3 kHz e C=6 kHz, viene campionato con due modalità<sup>50</sup>:

$S_1$  con  $F_c=16$  kHz cioè  $F_n=8$  kHz  $> C$

$S_2$  con  $F_c=8$  kHz cioè  $F_n=4$  kHz  $< C$

L'analisi FFT (fig.20) effettuata alla medesima risoluzione  $F_r = 31,25$  Hz, mostra nel primo caso le tre componenti spettrali di S con la stessa ampiezza (buon campionamento) e nel secondo le sole componenti A e B, alterate, e con una componente aggiuntiva causato da C sulla frequenza più bassa (aliasing).

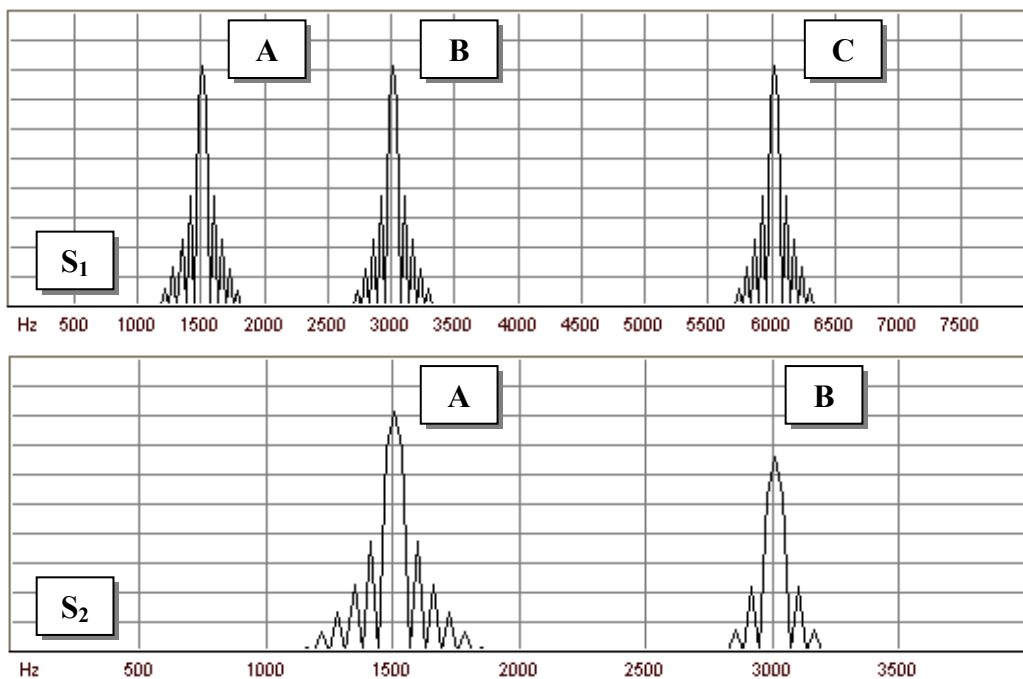


Fig.20

<sup>50</sup> Le tre componenti sono state sintetizzate, miscelate, campionate e analizzate interamente al computer.

Questo è ciò che avverrebbe, in modo più complesso, campionando un segnale sorgente ad una frequenza non compatibile con la larghezza di banda del segnale sorgente ( $F_n < B$ ). Notare inoltre la riduzione della banda passante nel campionamento  $S_2$  ( $B_2 = 0 \rightarrow F_{n2}$  Hz) dovuta all' "effetto passa-basso".

- SEGNALE ARMONICO

Un segnale impulsivo costituito da un singolo dente di onda quadra produce simultaneamente un numero infinito di frequenze armoniche la cui ampiezza diminuisce con la distanza dalla frequenza principale.

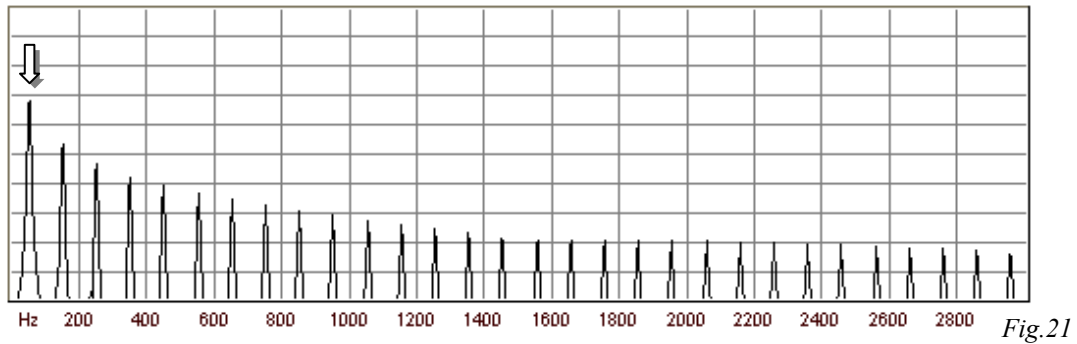
Il segnale sorgente dunque non è monocromatico ma accompagnato da un "coro". Come esempio è stata presa un'onda quadra<sup>51</sup> alla frequenza<sup>52</sup> di 50 Hz, cioè corrispondente al famoso segnale (nella realtà piuttosto instabile) emesso dalla rete elettrica. È quindi una simulazione del più tipico e dannoso radiodisturbo industriale captabile dal radiogeofono.

L'analisi spettrale del segnale campionato a 6 kHz ( $F_c$ ) eseguita ad una risoluzione di 5,9 Hz mostra un picco fondamentale di circa 50Hz (indicato dalla freccia nella fig.21) con un'ala di armoniche. Le armoniche superiori procedono chiaramente verso l'alto su valori multipli di  $f$  con intensità decrescenti.

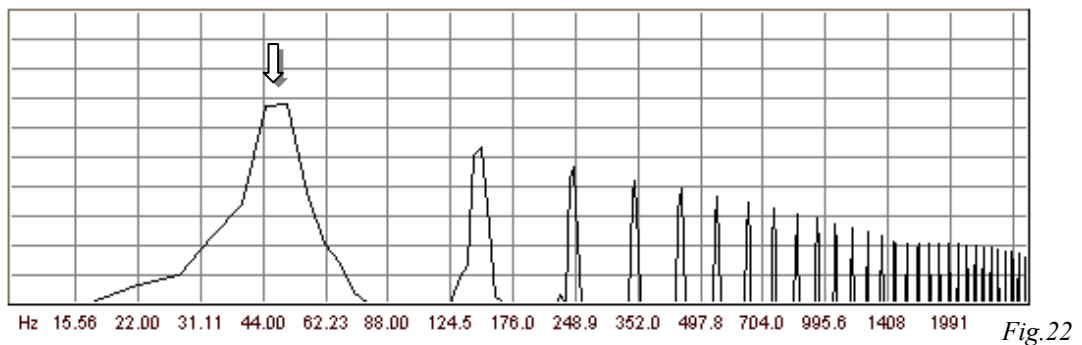
---

<sup>51</sup> Questa forma d'onda corrisponde ad un'emissione puramente impulsivi e produce armoniche con la massima estensione spettrale.

<sup>52</sup> Segnale sintetizzato, campionato e analizzato interamente al computer.



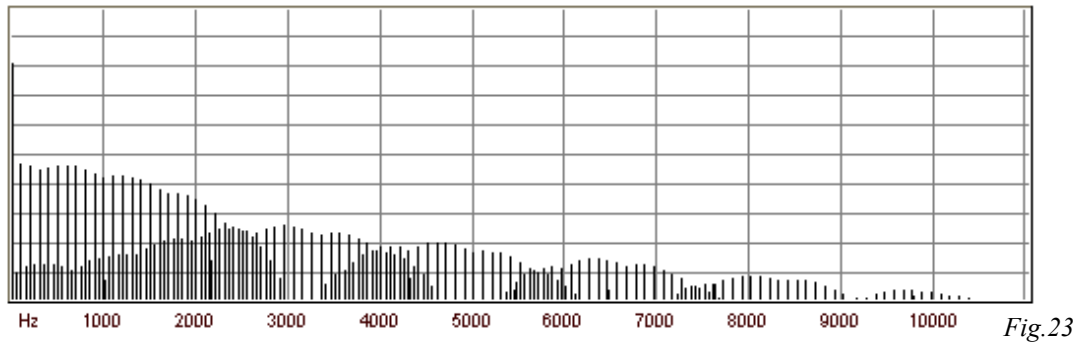
La stessa analisi, osservata in scala logaritmica (fig.22), mostra un accenno dell'ala delle armoniche inferiori resa invisibile dai limiti della risoluzione.



Si vede anche come il coro delle armoniche superiori si infittisce verso l'altro creando una vera e propria banda di disturbo sulla zona più percepibile dello spettro acustico.

Passiamo ora dai modelli alla realtà con l'autentica emissione a 50 Hz della rete elettrica che in quest'ultimo grafico (fig.23) è stata campionata a 22050 Hz ed analizzata con una risoluzione di ben 0,34 Hz. E' evidente che l'instabilità della frequenza e l'imperfezione della forma d'onda complicano la situazione.

Quella che si vede è la non trascurabile radiazione a 50 Hz emessa 24 ore su 24 in tutti gli ambienti urbani. Quando la sorgente di questo segnale è un elettrodotto, la forte radiazione emessa è oggi considerata “elettrosmog” a bassa frequenza.



### 3 - SPERIMENTAZIONE

Le apparecchiature e le tecniche descritte nel capitolo precedente sono state impiegate nella fase definitiva della sperimentazione descritta in questo capitolo. Una fase preliminare di sperimentazione è stata svolta precedentemente con il solo radiogeofono ed un mini-registratore portatile ottenendo tuttavia risultati evidenti e significativi che hanno portato al perfezionamento delle procedure. Questa prima fase, come poi la successiva, era suddivisa in due test per simulare nella roccia una sollecitazione meccanica paragonabile a quella sismica: esplosioni e compressione uniassiale. Furono eseguite 8 esplosioni e numerose prove di rottura ma i due test non si svolsero nella medesima banda spettrale. Si ottennero così risultati non confrontabili nel dominio delle frequenze, sebbene (a posteriori) apparvero evidenti delle analogie tra alcuni tipi di segnale.

Il reperimento di un registratore multitraccia (fornito dall'Osservatorio Vesuviano) la conseguente possibilità di perfezionare ed ampliare la procedura di acquisizione ed infine l'evidente possibilità di poter ottenere risultati significativi hanno portato dunque alla ripetizione dell'esperienza in una seconda fase definitiva, ugualmente articolata nei due test.

La prima fase dunque non verrà descritta se non, molto brevemente, per quanto concerne i dati ottenuti dalla rottura per compressione uniassiale di campioni di diversa litologia che si resero disponibili occasionalmente.

Si tratta di blocchi di porfido forniti dallo stesso "Laboratorio Sperimentale delle Ferrovie dello Stato" in cui sono state eseguite le prove e di carote di *calcare a rudiste* monitorati nell'ambito della tesi di laurea di un altro studente.

### **3.1 - SPERIMENTAZIONE IN SITO: ESPLOSIONE DI MINE IN VOLATA**

Questo ciclo di esperimenti è stato eseguito presso lo stabilimento BUZZI-UNICEM sito a Guidonia (RM). La Unicem produce cemento utilizzando materiale inerte estratto dalla cava di Colle Grosso. L'estrazione è effettuata lavorando alternativamente su più livelli di una superficie a gradoni con dislivelli di 10 metri. Ogni giorno da una delle pareti viene abbattuto un volume di roccia corrispondente a 35000 - 40000 quintali di materiale che successivamente viene rimosso mentre si procede all'abbattimento della parete su di un altro livello. L'abbattimento avviene mediante l'esplosione "in volata" (ovvero in rapida successione) di 8 cariche costituite da altrettanti pozzi profondi circa 11m e riempiti per 6m da materiale esplosivo. I pozzi sono allineati parallelamente all'orlo della scarpata e distanziati di circa 4m tra di loro e dall'orlo medesimo. Il test utilizza il radiogeofono ed un radioricevitore per verificare l'eventuale emissione della roccia sotto la sollecitazione meccanica dell'esplosione e/o a seguito della variazione dello stato tensionale della roccia rimasta in sito dopo l'abbattimento del volume antistante.

Nel mese di agosto del 2000 sono stati effettuate 8 registrazioni in località Colle Grosso su livelli diversi della stessa cava. Il materiale interessato è stato sempre "calcare massiccio" (lias inferiore, successione umbro-marchigiana) variamente frammentato e talvolta intercalato a piroclastiti.



### **3.1.1 - SCOPO E DESCRIZIONE DELL'ESPERIMENTO**

Questo test prevede la registrazione di segnali elettromagnetici dal calcare massiccio sollecitato meccanicamente da un'esplosione multipla e dal conseguente crollo di una parete di roccia delle dimensioni approssimative di 10x30x4 metri (HxLxP).

In tali condizioni si prevede che la roccia reagisca producendo dei segnali analoghi a quelli solo sporadicamente rilevabili nel test di rottura a seguito della rottura stessa (già osservati nelle prove di compressione uniassiale della fase preliminare). Presumendo che tali segnali posteriori siano da attribuire al rilassamento della roccia, questo test in cui dopo la sollecitazione avviene anche l'asportazione (per gravità) di una notevole quantità di materiale, favorisce le condizioni di rilassamento post-trauma della parete di roccia rimasta in posto.

### **IMPIANTO DI RILEVAMENTO**

Il rilevamento prevede la registrazione simultanea su 4 tracce audio dei seguenti segnali:

- Radiazione elettromagnetica in banda 20Hz-20kHz (radiogeofono)
- Ampiezza del segnale elettromagnetico su 750 kHz (radiatoricevitore)
- Onda di pressione in banda 20Hz-1kHz circa (microfono di pressione)
- Segnale acustico in banda 50Hz-16kHz (microfono acustico)

Le specifiche tecniche degli apparecchi sono state descritte nel paragrafo 2.2 (pag.54); le modalità operative adottate nell'ambito di questo test verranno descritte nel prossimo capitolo.

- Il monitoraggio dello spettro radio E-VLF mediante il radiogeofono è lo scopo principale dell'esperimento.
- Il monitoraggio di una frequenza sulla banda delle Onde Medie ricalca l'"esperimento Mognaschi" (cfr. par.4.3 pag.174) ed ha lo scopo di verificare la concomitanza dei fenomeni e la differenza di intensità sulle due bande.
- La registrazione dell'onda di pressione e del segnale acustico sono serviti a marcare l'istante dell'esplosione.

## **PREPARAZIONE DELLE CARICHE**

La preparazione delle cariche viene effettuata dal personale specializzato della UNICEM secondo le modalità necessarie ai loro scopi. La procedura abituale è la seguente:

Una perforatrice (fig.24) esegue 8 fori allineati parallelamente all'orlo della scarpata (fronte della cava, fig.26). I fori sono distanziati tra loro di circa 4m e l'allineamento segue l'andamento del fronte ad una distanza di circa 4m. I pozzi sono profondi circa 11m mentre la parete è alta circa 10m. Ciò garantisce che la prima carica si trovi almeno 0,5m al di sotto del piano del livello inferiore.

Ciascun foro viene riempito (fig.25) per sei metri da capsule esplosive (gelatinato alternato a pulvirulento) quindi richiuso con il materiale estratto dalla perforatrice con l'eventuale aggiunta di tufo, presente in tutta la cava nei livelli di copertura del quaternario.

L'esplosione "in volata" si ottiene detonando in sequenza le colonne di esplosivo con un ritardo di 20 millesimi di secondo. I detonatori (predisposti per il necessario ritardo) sono collegati in serie ed inseriti ciascuno nella capsula alla base di ogni pozzo, cosicché la volata esplosiva procede dal basso verso l'alto e dal primo pozzo verso l'ultimo. L'impulso elettrico è fornito mediante piattina da un "esploditore" costituito da un generatore meccanico che carica un condensatore.

L'esplosione avviene dunque lungo un piano ideale di circa 30m x 6m che si estende parallelamente al fronte della cava ad una distanza media di 4m da esso. Dopo l'esplosione il nuovo fronte della cava giace pressappoco su tale piano (fig.27).

#### ALCUNI DATI SULL'OPERAZIONE

- Esplosivo utilizzato: circa 8Kg di gelatinato e 12.5 Kg di pulvirulento per ciascun foro. Totale: 75Kg gelatinato (3 casse da 25 Kg) + 100 Kg pulvirulento (4 casse da 25 Kg). Le caratteristiche dell'esplosivo sono descritte in appendice.
- Volume di materiale abbattuto: circa 30 x 10 x 4 metri.
- Peso del materiale abbattuto: dai 35.000 ai 40.000 quintali.
- Tipo di materiale: "calcare massiccio" (liassico inferiore, successione umbro-marchigiana)



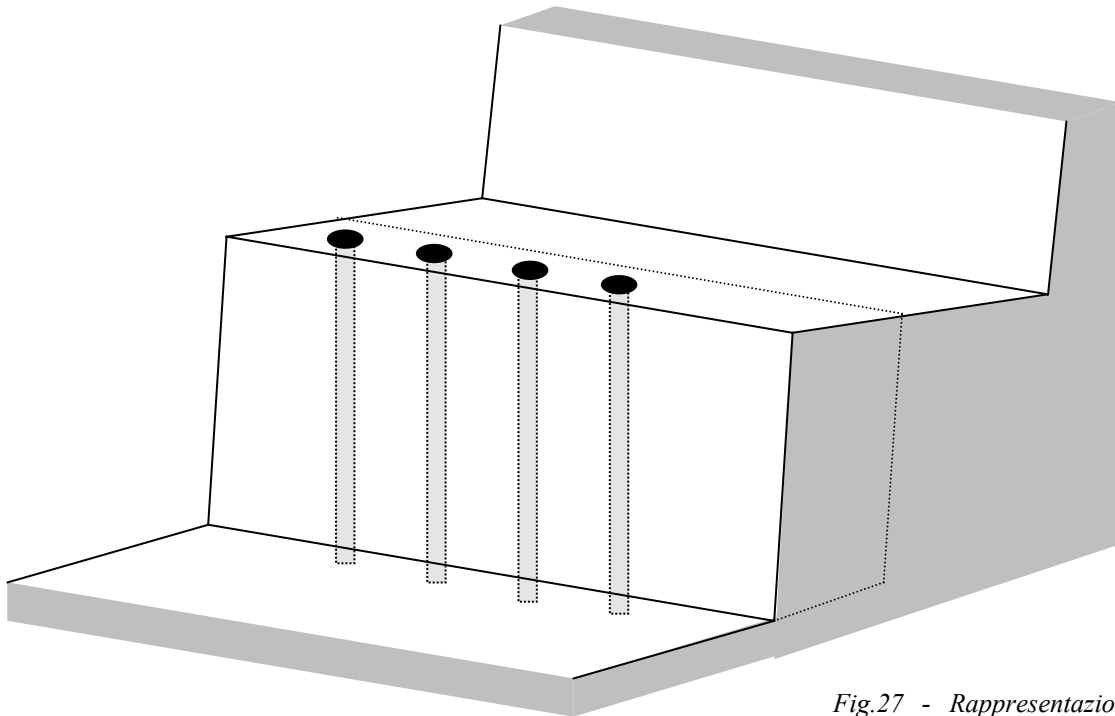
*Fig.24 - La perforatrice scava uno dei pozzi lungo il fronte della cava*

*Fig.25 - L'artificiere riempie un pozzo con l'esplosivo*





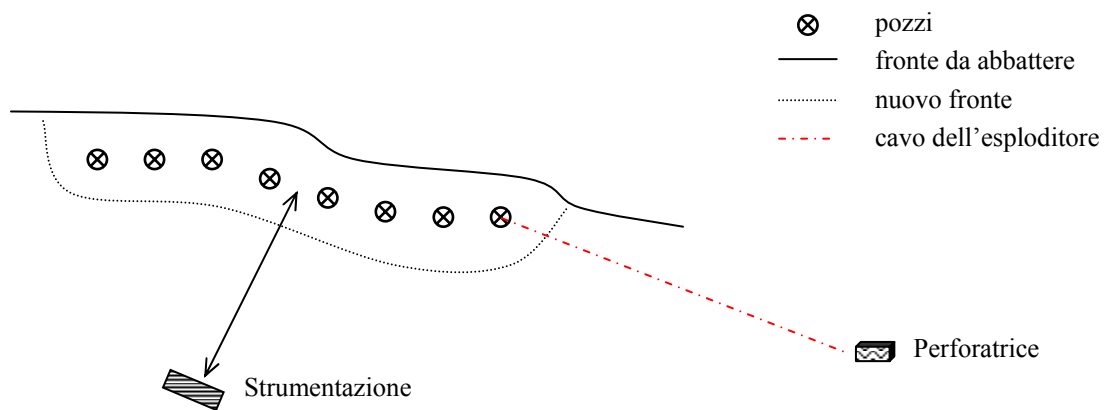
*Fig.26 - Perforatrice e artificiere a lavoro sul fronte della cava. Ogni scatola di cartone corrisponde ad un pozzo minato*



*Fig.27 - Rappresentazione schematica dei gradoni della cava. In tratteggio il fronte da abbattere e i pozzi che verranno minati.*

## DISPOSIZIONE DEGLI STRUMENTI

Tutta la strumentazione è stata disposta sul terreno sopra a fogli di cartone (scatoloni aperti degli esplosivi) ad una distanza di circa 15 passi dalla linea dei pozzi. Tutto l'impianto veniva attivato pochi secondi prima dell'esplosione e registrava automaticamente mentre da un luogo riparato veniva attivato l'esplosore. Il luogo al riparo (interno della pesante macchina perforatrice) era scelto in posizione laterale per avere la minima probabilità di essere colpiti di materiali espulsi, quindi l'impulso detonante percorreva un cavo steso sul terreno quasi parallelamente alla linea dei pozzi come schematizzato in questa pianta:

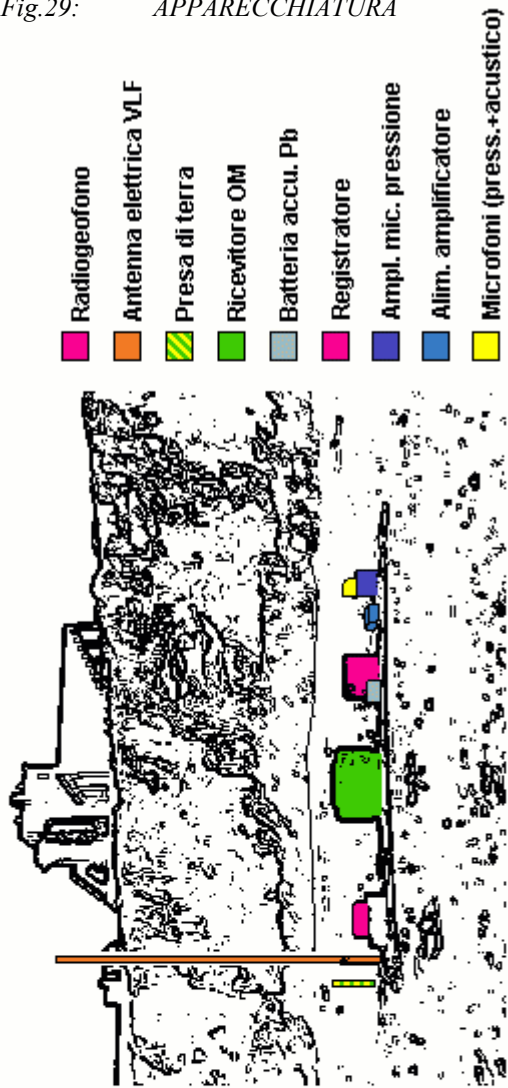


*Fig.28 - Pianta della postazione di rilevamento rispetto alla linea di fuoco e alla linea di alimentazione dell'esplosore*

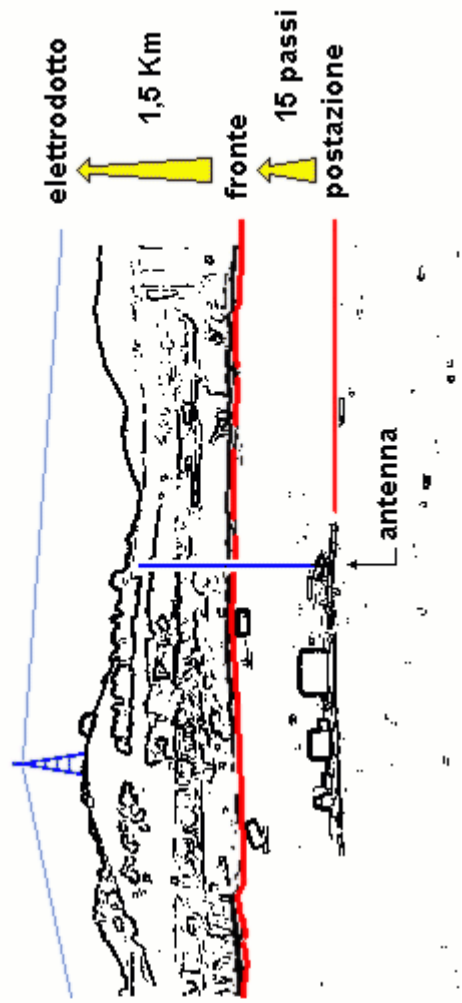
La maggior parte delle prove della seconda serie si sono svolte nella zona sud della cava, alla massima distanza dall'elettrodotto che aveva causato forti interferenze nelle registrazioni della prima serie.



Fig.29: APPARECCHIATURA



POSTAZIONE



## NOTE

Sebbene l'intenzione dell'esperimento fosse quella di monitorare un'esplosione in grado di simulare una scossa sismica, gli intenti dell'artificiere erano tesi invece a limitare il più possibile le vibrazioni per evitare fastidi al vicino centro abitato. Più volte il tecnico mi faceva notare con orgoglio come particolari tipi e combinazioni di esplosivo e raffinate tecniche di messa in posto e detonazione venivano impiegati proprio a questo scopo. Devo dire francamente che ci riusciva benissimo, al punto che anche per noi che ci trovavamo al riparo a qualche decina di metri di distanza, il rumore dell'esplosione era sorprendentemente basso e sordo. Se mi si consente una considerazione personale, durante il servizio militare ho visto bombe a mano e colpi di mortaio non causare alcun danno producendo un rumore assordante.



### 3.1.2 - PROCEDURA E MODALITÀ DI REGISTRAZIONE

Questa sezione tratta l'esperimento dal punto di vista tecnico. Verranno elencati tutti gli standard utilizzati nella regolazione degli strumenti e nella procedura di registrazione nonché alcuni particolari accorgimenti tesi a garantire la massima affidabilità del test. In appendice è riportata una relazione sintetica su tutte le registrazioni effettuate in cava nell'ambito del secondo ciclo.

NOTA: nelle prove iniziali il ricevitore OM ed il microfono di pressione hanno subito una lieve variazione nei livelli di sensibilità ma ciò non ha minimamente compromesso i risultati definitivi (cfr par. 3.2.3).

#### REGOLAZIONE DEGLI STRUMENTI

##### RICEVITORE DI CAMPO E-VLF

- Banda: intermedia
- Antenna: esterna rigida<sup>1</sup>, lunghezza 190 cm, polarizzazione verticale
- Presa di terra: 2 paletti di alluminio, sez. 5mm, interrati per circa 30 cm
- Volume: livello max
- Monitoraggio sul REC: valore intermedio tra le tacche -15 e -20 dB

##### RADIORICEVITORE

- Banda: OM
- Frequenza<sup>2</sup>: 750 kHz
- larghezza di banda: NARROW
- Antenna: ferromagnetica interna, polarizzazione orizzontale
- Presa di terra: nessuna
- RF Gain regolato fino a leggere 20 dB sull' S.meter della radio
- Accordatore d'antenna: massimo accordo (massima lettura sull'S.meter)
- Volume: regolato per monitorare sul REC una variazione compresa tra -5 e 0 dB di picco.

---

<sup>1</sup> Antenna elettrica, totalmente rigida e solidale nella superficie sensibile ma con supporto isolante flessibile. E' stata appositamente costruita per evitare rumori derivanti da ipotetici urti interni durante la scossa sismica (cfr. a seguito "Accorgimenti particolari"; appendice "Antenna rigida")

<sup>2</sup> L'esperimento "Mognaschi" era stato eseguito su 500 kHz. La scelta dei 750 kHz è stata condizionata dalla presenza sui 526 kHz della locale e potentissima stazione di "Radio Vaticana".

#### MICROFONO DI PRESSIONE (e relativo amplificatore)

- Sensore da 0,1 bar
- R.AEGL: posizione centrale
- RANGE: 0,1
- R.FEIN: -5
- PHASE: regolato fino a monitorare sul REC il valore -25 dB (corrispondente sul lettore dell'amplificatore alla zona rossa  $\approx 0$ ).

#### MICROFONO ACUSTICO

- Monitoraggio sul REC: -15 dB.

#### REGISTRATORE:

- COMP: off
- CAL: "use"
- DC/AC: ac
- CANNEL: 4
- FM/DR: entrambi su dr.
- Canalizzazione: Ch1: segnale E-VLF  
Ch2: segnale OM  
Ch3: segnale di pressione  
Ch4: segnale acustico

### **PROCEDURA DI REGISTRAZIONE**

Il registratore TEACH R61 è dotato di un marcatore acustico che emette su tutti i canali un segnale campione sulla frequenza di 444 Hz. Tale "beep" è stato utilizzato per marcare gli eventi sulle registrazioni.

Il primo campione multitraccia, anticipato da due beep in rapida successione, contiene rumore di fondo registrato prima dell'esplosione. Segue un beep lungo che segnala l'inizio della registrazione relativa all'esplosione. A questo punto l'impianto viene lasciato acceso e passeranno alcuni minuti prima che l'esplosore venga azionato da un luogo sicuro. Talvolta, per riscontro di sicurezza, viene fatto girare a vuoto l'esplosore una ventina di secondi dopo la fine dell'evento esplosione-crollo-

ricaduta del materiale eiettato. Un nuovo beep segna la fine del campione e spesso introduce la registrazione del brillamento del detonatore di riserva, che viene esploso in terra, conficcato a mano. Un ultimo beep molto lungo segna la fine della sessione di registrazione

## **ACCORGIMENTI PARTICOLARI**

- Nei test eseguiti in fase preliminare fu ipotizzata la possibilità di un'interferenza sui segnali del radiogeofono introdotta dall'oscillazione dell'antenna telescopica incorporata. Essa infatti è composta da diversi segmenti scorrevoli in contatto meccanico alle estremità. Simulazioni eseguite sul posto in modo manuale (imitando la scossa tellurica dell'esplosione) non hanno mostrato un'influenza significativa. Per estremo scrupolo tuttavia in questa serie di test è stata adottata una speciale antenna rigida, appositamente costruita per evitare urti interni ed assicurare un isolamento meccanico anche con il ricevitore a cui è collegata.

- Sempre nei test della fase preliminare fu deliberatamente registrato il segnale emesso dalla piattina collegata ai detonatori al momento in cui l'esplosore eroga corrente. Si verificò che non coincideva con il segnale ritenuto di natura radiosismica e che comunque la sua intensità non implicava il rischio di interferenze. Per ridurre il rischio ai minimi termini sono stati attuati 3 accorgimenti:

- 1) sistema di registrazione spostato dal lato opposto a quello dove si estendeva il cavo (fig.28)

2) spesso è stato richiesto all'artificiere di erogare due o più impulsi a vuoto con l'esplosore ad almeno venti secondi di distanza dall'esplosione senza poi verificare sulla registrazione la presenza di alcun disturbo.

3) nell'ipotesi che gli impulsi "a vuoto" potessero non avere lo stesso effetto di quelli collegati ad un detonatore, dopo ogni esplosione è stata registrata anche l'esplosione del detonatore di riserva. In base alle procedure di sicurezza infatti veniva tenuto da parte un detonatore per far brillare eventuali cariche inesplose. Ad esplosione avvenuta, il detonatore deve comunque essere fatto esplodere e questa operazione avveniva collegandolo al capo mozzato del medesimo cavo usato per l'esplosione principale. Il solo detonatore, esploso in superficie (inserito nel terreno), nel caso più evidente non provocava che un singolo impulso.

- Il rumore di fondo E-VLF in ambiente aperto è costituito fenomeni noti ed isolabili come le scariche di "statica" e lo spettro armonico della radiazione a 50Hz (cfr. par.."Segnale armonico", pag.92). Per assicurare l'omogeneità delle condizioni ed ottenere un segnale di fondo da sottrarre alla registrazione utile, immediatamente prima di ogni esplosione è stata effettuata una sessione di registrazione per monitorare il solo rumore di fondo.

### 3.1.3 - RISULTATI

Le registrazioni analogiche sono state digitalizzate abbinando due canali alla volta e quindi analizzate al computer secondo la procedura e le modalità descritte nel capitolo 2.3. Tutte le 9 sessioni di registrazione hanno dato esito positivo sul canale E-VLF. Segue una breve descrizione dei risultati generali su ciascun canale:

- **CANALE ACUSTICO:** registrazioni non ottimali a causa del basso livello di intensità (anche dal vivo il rumore era sorprendentemente basso di intensità e tono). L'impulso che segna l'inizio dell'esplosione è tuttavia coincidente con quello registrato dal microfono di pressione che quindi è stato utilizzato come riferimento attendibile da confrontare con i segnali radio.
- **CANALE DI PRESSIONE:** presenta segnali a bassa frequenza (lo erano anche quelli acustici) in grado di individuare l'istante iniziale dell'esplosione ed un evento posteriore attribuibile presumibilmente alla ricaduta in prossimità della stazione di parte del materiale eiettato.
- **CANALE RADIO:** nessun segnale rilevabile. Alcuni test sono stati effettuati (fuori standard) sulle frequenze 526 kHz (R.Vaticana) e 216 kHz (onde lunghe, R.Montecarlo) per verificare l'abbattimento del segnale descritto in precedenti studi (cfr. par.1.5, "Geofisica della terra solida", pag.44). Anche in questo caso però è stato registrato soltanto rumore caotico e non vi è traccia di un segnale discreto. Probabilmente l'interferenza delle attrezzature circostanti hanno compromesso radicalmente la funzionalità del ricevitore. L'amplificatore del microfono di pressione anche in fase preparatoria si era rivelato una forte

sorgente di disturbi, che possono essersi propagati sia per induzione elettromagnetica che attraverso gli impianti centralizzati di alimentazione e di registrazione. Il risultati di questo tentativo sono dunque da considerare nulli.

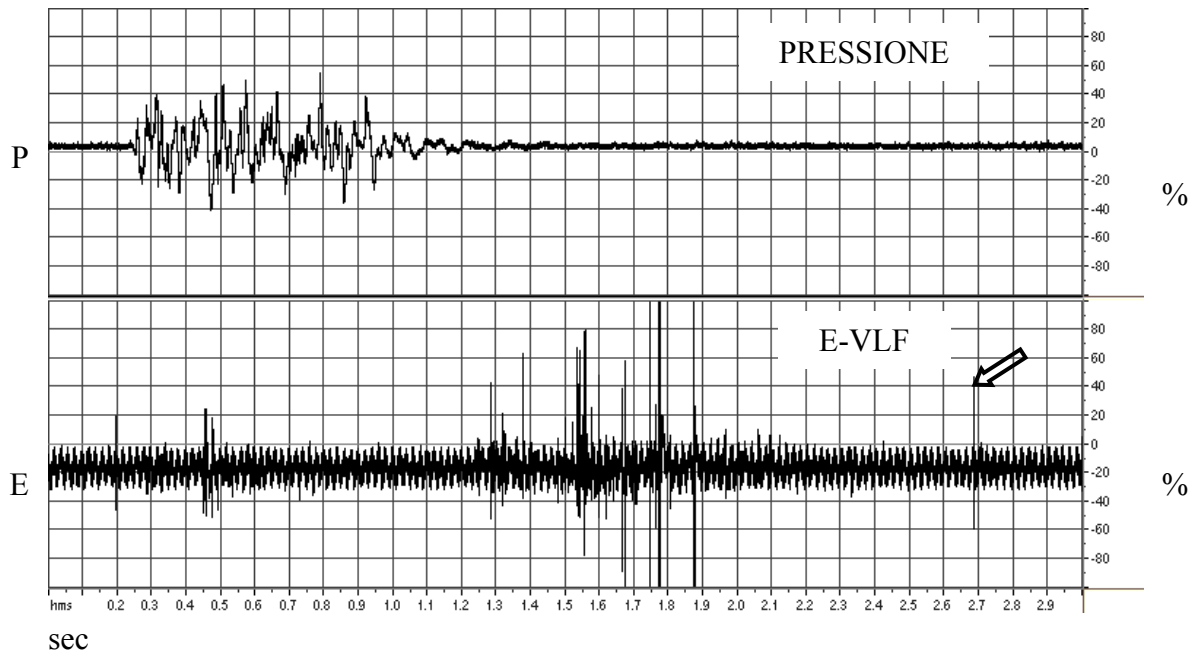
- CANALE E-VLF: tutte le registrazioni hanno avuto esito positivo.

### **CHIAVE DI LETTURA DELLE TRACCE**

Nei diagrammi seguenti è illustrato l'aspetto tipico di una coppia di canali "PRESSIONE+VLF". Si tratta nel caso specifico di 3 secondi della multitraccia UC2\_4 graficati come involucro intensità-tempo (fig.30-A) e come spettrogramma frequenza-tempo con 256 gradazioni di grigio per le relative intensità (fig.30-B). Per semplicità chiameremo "P" l'onda di pressione ed "E" il segnale E-VLF.

Come si vede in **A**, il primo impulso è stato registrato nel campo VLF dove la propagazione è circa istantanea (pari a quella della luce), seguito dall'onda P con un certo ritardo a causa della velocità di propagazione nell'aria (pari circa a quella del suono). L'onda P si manifesta con l'andamento di un sismogramma mentre il segnale E, dopo l'impulso iniziale, seguita con altre famiglie di eventi sempre impulsivi. Gli impulsi E concomitanti all'onda P sono probabilmente da attribuire al crollo della parete, mentre gli altri, che giungono a distanza di oltre un secondo, sono presumibilmente causati dalla variazione dello stato tensionale della roccia che costituisce il nuovo fronte della cava.

## A - Oscillogramma



## B - Spettrogramma

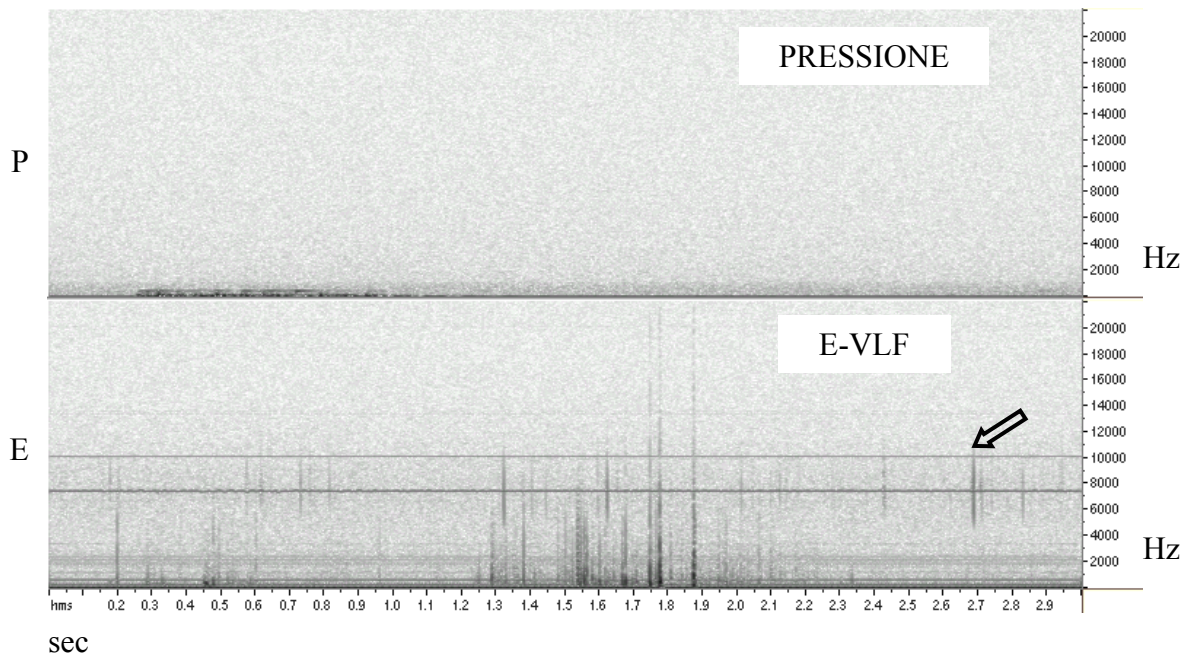


Fig.30 - Oscillogramma (A) e spettrogramma (B). I tempi sono espressi in secondi, le intensità in % (A) o in tonalità di grigio (B), le frequenze in Hz.

Occorre notare però che non tutto ciò che si vede nel diagramma A corrisponde realmente ai segnali P ed E. Nel diagramma B infatti si può leggere chiaramente nel

canale E la presenza un rumore di fondo in cui sono riconoscibili tre tipi di interferenza: strumentale, industriale ed atmosferica.

- Le tre bande orizzontali al centro rappresentano altrettanti segnali costanti e monocromatici emessi dall'amplificatore del microfono di pressione sulle frequenze 7407 Hz, 10078 Hz e 13351 Hz.
- Le bande orizzontali più in basso corrispondono allo spettro delle emissioni (50 Hz + armoniche) dell'elettrodotto che costeggia il limite NNE della cava.
- Alcune delle bande verticali, quelle che non si estendono più in basso di 4 kHz, sono scariche elettrostatiche atmosferiche. È un fenomeno naturale consueto e ben distinguibile dai segnali "radiosismici" che invece manifestano la massima energia sulle frequenze più basse dello spettro.

Le interferenze atmosferiche sono impulsive come quelle radiosismiche e non sono riconoscibili nel diagramma intensità-tempo. Occorre quindi avere l'accortezza di non prendere in considerazione i picchi che sullo spettrogramma si possono riconoscere come interferenze di "statica". Un esempio evidentissimo è l'evento registrato poco prima del marker 2,7 secondi (indicato dalla freccia).

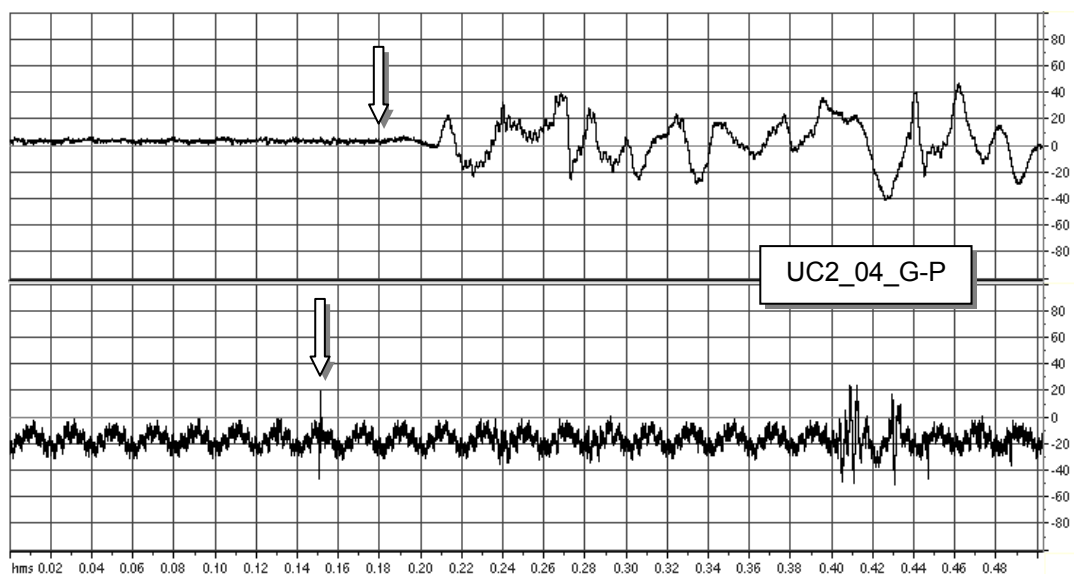
In prima approssimazione i segnali "radiosismici" genuini sono tutti quelli impulsivi a largo o larghissimo spettro la cui intensità è massima presso le frequenze più basse della scala e diminuisce gradatamente all'aumentare della frequenza.

Questa tipologia non è un fenomeno consueto e non ha riscontro con la mia esperienza di monitoraggio precedente a questa tesi.



## DISTRIBUZIONE TEMPORALE DEL FENOMENO

Confrontando i segnali della coppia VLF-Pressione si può vedere come sistematicamente un piccolissimo singolo impulso radio anticipa l'arrivo dell'onda di pressione (un esempio è illustrato nella fig.31). Si presume che questo impulso corrisponda esattamente all'esplosione e che quindi si in origine concomitante a quello di pressione. La maggiore velocità di propagazione delle onde radio rispetto all'onda di pressione causerebbe lo scarto osservato.



*Fig:31 - Le frecce indicano l'impulso del segnale radio (sotto) che anticipa l'arrivo dell'onda di pressione (sopra). I tempi sono in secondi e lo scarto, a questa risoluzione, è di circa 30 ms.*

A priori non era stato previsto che lo scarto avrebbe avuto un valore risolvibile (purtroppo non sono un fisico) e quindi la distanza tra le apparecchiature e la linea di fuoco è stata sempre misurata a passi, come è d'uso comune per le strutture geologiche a media scala. Le distanze erano variabili (secondo la natura del luogo) da 10 a 15 passi. Si pone quindi il problema di stabilire ora, a posteriori, se effettivamente i segnali dovevano essere in origine concomitanti.

Attribuendo all'onda di pressione la medesima velocità di propagazione del suono nell'aria, corrispondente a 340 m/s, si può stimare la distanza che avrebbe dovuto separare la sorgente dai sensori, e quindi, dividendo per il numero di passi, la lunghezza teorica di un singolo passo. Questa è risultata coerente nei valori massimi e minimi (la differenza è di 1 cm) e coerente con la lunghezza di un analogo passo misurata a posteriori (98 cm).

Questo piccolo calcolo, per la coerenza dei risultati, dimostra che il primo impulso radio è di fatto concomitante con l'insorgere dell'onda di pressione e che la distanza media tra l'apparecchiatura e la linea di fuoco è di circa 11,5 m. I risultati sono sintetizzati nella seguente tabella:

| Valori     | Scarto tra i segnali<br>( ms ) | Distanza corrispondente<br>( m ) | N° passi | lunghezza passi<br>( m ) |
|------------|--------------------------------|----------------------------------|----------|--------------------------|
| <b>min</b> | 29                             | 9,86                             | 10       | 0,97                     |
| <b>med</b> | 34                             | 11,56                            |          |                          |
| <b>max</b> | 43                             | 14,62                            | 15       | 0,98                     |

Sulla base dell'assunto che i punti omologhi a quelli indicati in fig.31 corrispondono all'istante dell'esplosione, si può definire un'evoluzione standard del fenomeno osservabile nei due campi.

Il segnale di pressione è caratterizzato da una sequenza continua di oscillazioni, di ampiezza ed estensione spettrale decrescenti, corrispondente alla sequenza esplosione-crollo. Questa sequenza è stata nominata con al sigla "EC". Successivamente trascorre un breve periodo di silenzio seguito da alcune brevi

sequenze causate presumibilmente dalla ricaduta dei materiali eiettati con l'esplosione (in particolare il residuo di scavo utilizzato per il riempimento apicale dei pozzi). Questi episodi sono stati denominati con la sigla "EJ".

Il segnale radio in banda E-VLF è caratterizzato invece da 4 episodi distinti che sono stati classificati nel modo seguente:

- A. Singolo impulso, di debole o debolissima intensità, concomitante con l'esplosione.
- B. Brevissima serie di impulsi di media intensità. Si manifesta durante il crollo ma con incidenza non sistematica. Probabilmente causata dall'ulteriore fratturazione dei blocchi di maggiori dimensioni.
- C. Breve serie di impulsi di forte intensità che si susseguono a brevissima distanza. Si manifesta subito dopo il crollo, presumibilmente in associazione con la distensione della roccia rimasta in posto dopo l'abbattimento del fronte.
- D. Serie di impulsi di media intensità che si susseguono distintamente. Forse causata dalla fratturazione per assestamento del materiale in posto.
- E. Singoli impulsi molto distanziati. Probabilmente singole fratture da assestamento.
- F. (Raro) sequenza di scariche ad alta frequenza presumibilmente causata dall'interazione con l'atmosfera di una nube di cariche libere.

Qui di seguito (fig.32) si possono osservare alcuni esempi molto indicativi della variabilità delle sequenze. Le coppie stereo sono composte dal segnale di pressione (in alto) e In alto il segnale E-VLF (in basso). Le frequenze sono in Hz, i tempi in secondi e le intensità sono interpretabili in funzione dell'intensità di colore.

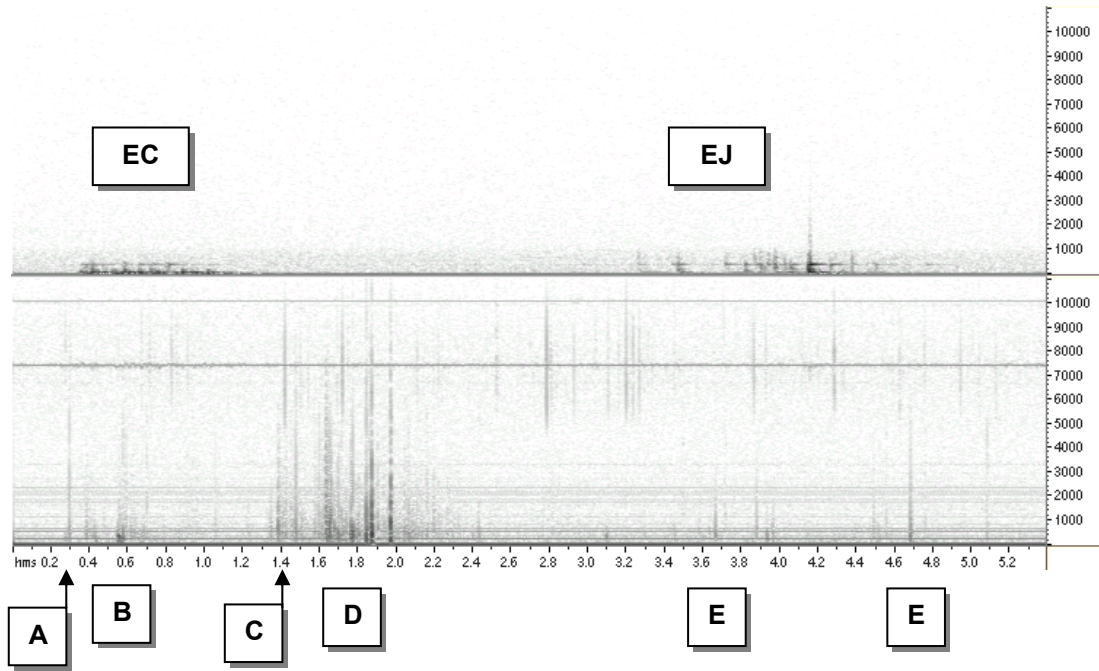


Fig.32a - Registrazione UC2\_04\_GP. In questo caso l'evento "B" è stato più evidente del normale ma al contrario l'episodio "C" è insolitamente ridotto e quasi indistinguibile dalla sequenza "D".

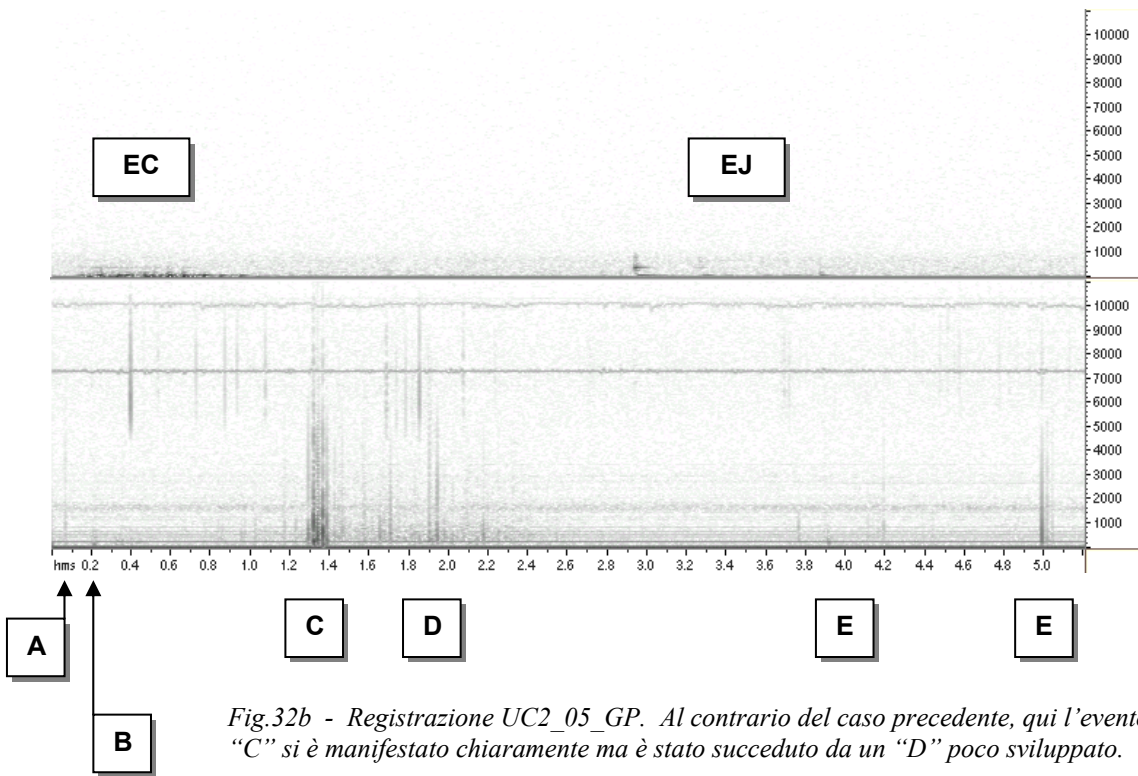


Fig.32b - Registrazione UC2\_05\_GP. Al contrario del caso precedente, qui l'evento "C" si è manifestato chiaramente ma è stato succeduto da un "D" poco sviluppato.

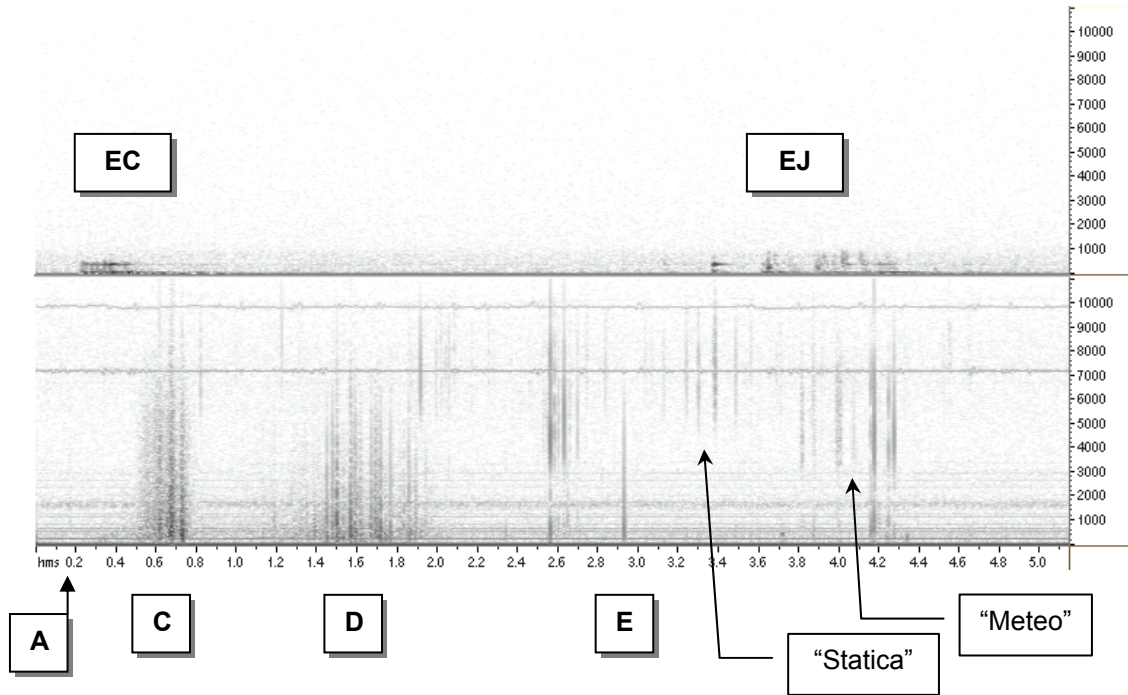


Fig.32c - Registrazione UC2\_07\_GP. A parte i forti disturbi atmosferici di origine meteorologica, questa potrebbe essere considerata una sequenza tipo. L'evento "A" è poco visibile. Manca l'evento "B". L'evento "C" è ben sviluppato e mostra il suo aspetto tipico, ben distinguibile dal caratteristico episodio "D". L'impulso "E" è netto e isolato.

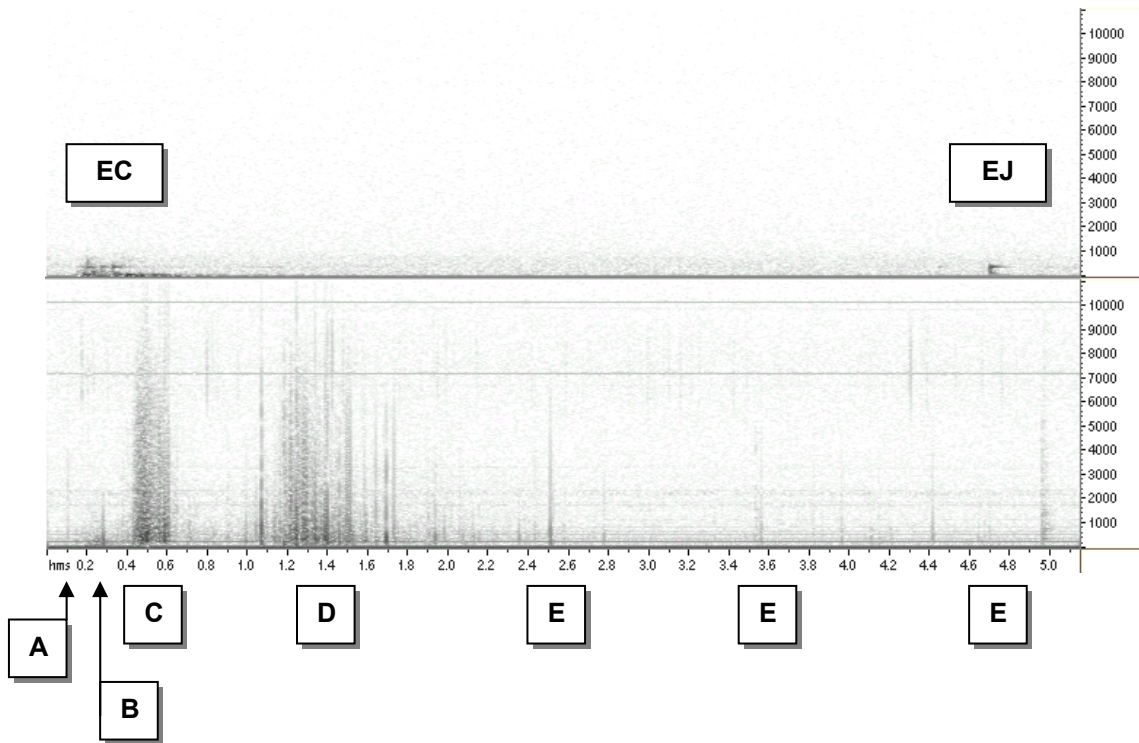


Fig.32d - Registrazione UC2\_08\_GP. Sequenza tipica con la caratteristica di un evento "B" molto sviluppato e diversi episodi "E".

## **Dinamica del fenomeno**

Tentiamo ora una ricostruzione ipotetica degli eventi che hanno generato queste emissioni. L'associazione di famiglie di segnali a particolari stati tensionali troverà riscontro nelle registrazioni effettuate in laboratorio che verranno presentate successivamente.

Le esplosioni negli otto pozzi non avvengono istantaneamente ma in rapida successione dal basso verso l'alto e dal primo pozzo all'ultimo. Questo favorisce la demolizione e il crollo di un fronte uniforme. Proprio questo effetto causa in un certo senso l'apertura di un'unica grande frattura che emette un unico segnale impulsivo che abbiamo denominato A.

Segue il crollo del blocco asportato che, guidato dall'opportuna inclinazione dei pozzi, si limita ad un movimento globalmente basculante. Questo limita fortemente la dispersione del materiale e un collasso per così dire "ordinato" che causa talvolta qualche segnale legato alla fratturazione di alcuni blocchi di maggiori dimensioni. Subito dopo il crollo del materiale abbattuto si suppone che lo stato tensionale del nuovo fronte della cava risulti notevolmente alterato e tenda ad assestarsi un nuovo equilibrio. La prima reazione è probabilmente un rilassamento del volume più esterno durante il quale, a causa probabilmente dell'insorgere di numerose microfrazture, viene emesso il segnale "C".

A seguito del rilassamento si raggiunge probabilmente un nuovo equilibrio tensionale che si stabilizza con una serie di macrofratture. Dopo ogni esplosione infatti si poteva vedere sul terreno una serie di fratture parallele al nuovo fronte

(fig.35). A questa fase di fratturazione associamo gli impulsi netti delle sequenze di tipo D. Nella figura 33 si possono vedere più in dettaglio l'oscillogramma e lo spettrogramma tipici delle sequenze di tipo C e D. Questi diagrammi saranno utili da confrontare in seguito con quelli delle emissioni registrate in laboratorio.

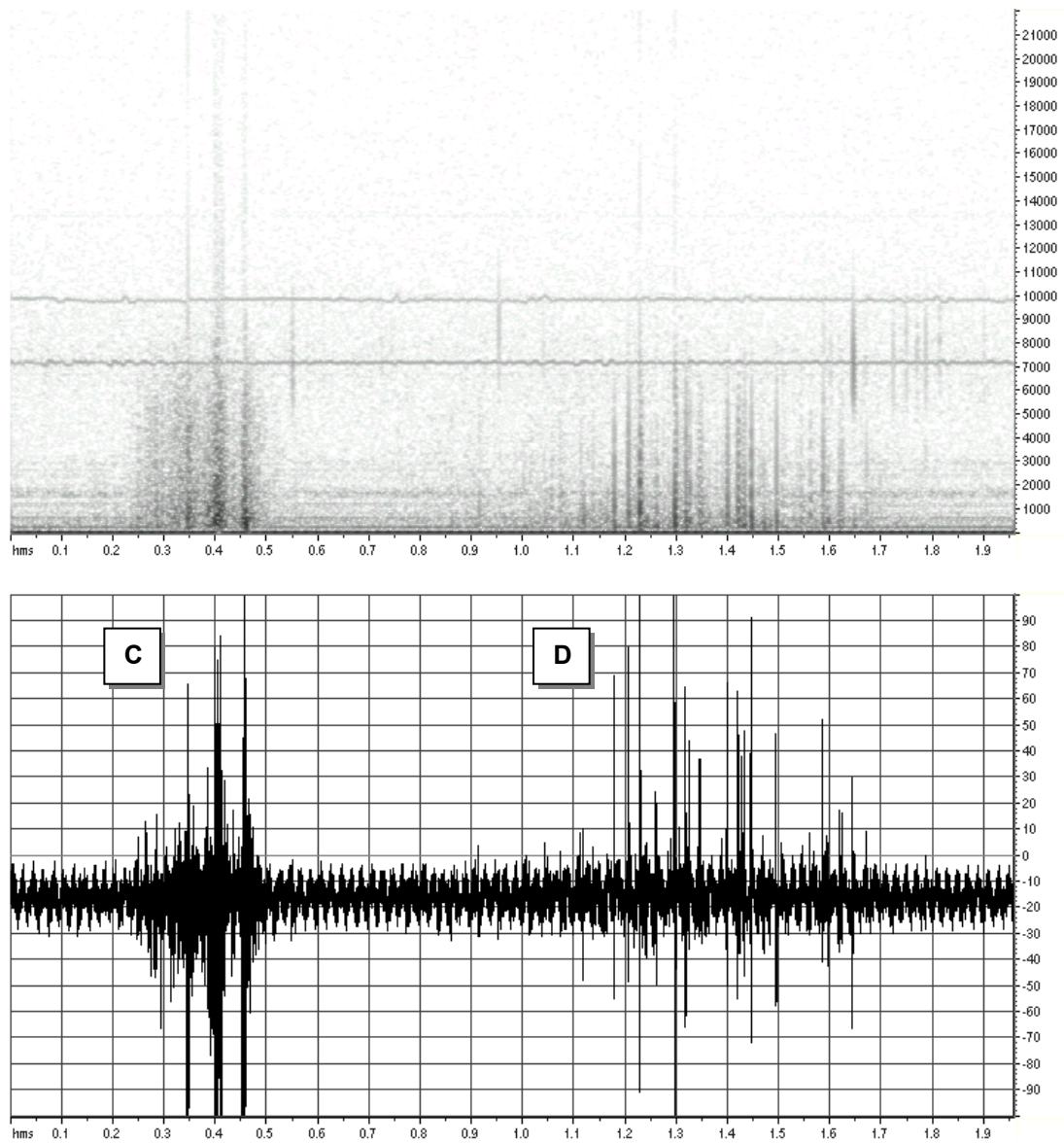


Fig.33 - Successioni radiosismiche di tipo C e D in banda E-VLF. Registrazione "UC2\_7". I tempi sono espressi in secondi, le frequenze in Hz e le intensità in %.



L'intera dinamica è illustrata in questa sequenza fumettistica:

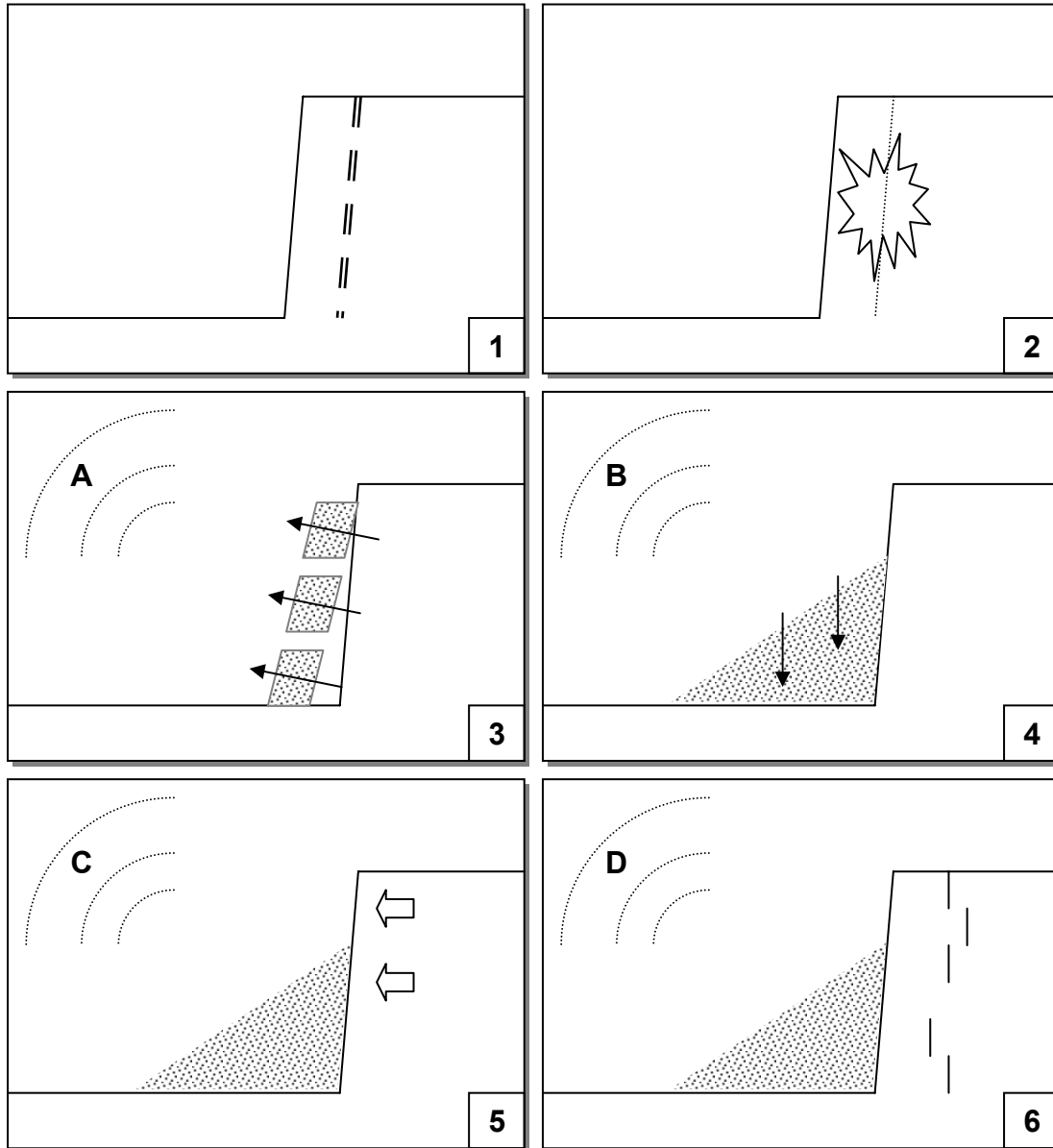


Fig.34 - Dinamica dell'abbattimento di un fronte ed emissioni radiosismiche associate.  
1) Disposizione dell'esplosivo in pozzi inclinati. 2) Esplosione "in volata". 3) distacco del fronte  
4) Crollo. 5) Distensione. 6) Fratturazione





*Fig.35 - Fratture del terreno parallele all'orlo del fronte abbattuto (franato a destra).*

## **EVENTO PARTICOLARE**

La registrazione “UC2\_07” effettuata il 9.8.2000 nella parte più depressa della zona sud della cava ha rilevato un fenomeno del tutto singolare. Bisogna premettere che anche le modalità dell’esplosione erano del tutto particolari. Si doveva abbattere un fronte che costituiva una sorta di vasca al di sotto del livello “normale” della zona, quello cioè dove passava la strada e che risultava concordante la base delle costruzioni circostanti.

Gli otto pozzi avevano questa volta una profondità di solo 8 metri e durante la perforazione degli ultimi due fu incontrata dell’argilla umida che, opponendo un maggiore attrito, rese difficoltosa l’operazione di scavo.

Oltre a questi poi furono minati altri cinque pozzi di soli tre metri per indebolire la base del versante opposto (fig.36) che sarebbe stato abbattuto nei giorni successivi.

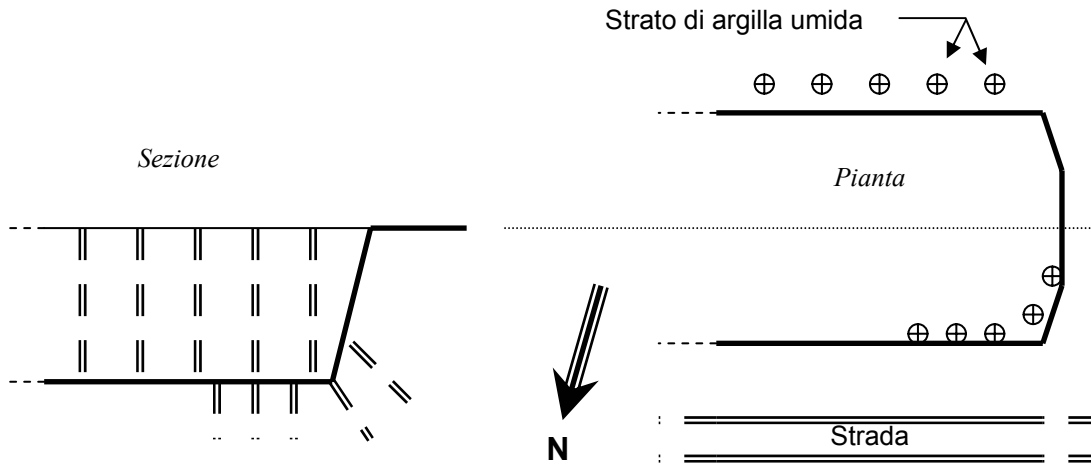


Fig.36 - Pianta e sezione della "vasca" e disposizione dei pozzi. La serie da 8m non è disegnata completamente ma sono indicati i due pozzi che hanno intercettato lo strato di argilla.

L'esplosione dei pozzi corti e inclinati posti alla base della chiusura del "canyon" non poteva trovare sfogo in un crollo ne' lateralmente, essendo contenuta dai versanti laterali. In questo caso infatti la detonazione simultanea sui due versanti causò una vibrazione anomala che fu avvertita nella vicina località Le Sale.

Anche nella registrazione radiosismica, nella sola banda E-VLF, è avvenuto qualcosa di strano: 21,722 secondi dopo l'impulso "A" (ovvero l'esplosione) è avvenuta una forte emissione dalle caratteristiche inconsuete (fig.37). I primi due episodi, marcati come  $S_1$  e  $S_2$ , sono simili a quelli che si avrebbero in presenza di una dispersione di cariche elettrostatiche e ricordano un fenomeno naturale che talvolta si riscontra poco prima della pioggia di un temporale. Quel giorno però non piovve, anche se il cielo era almeno parzialmente coperto. In particolare, un fenomeno davvero molto simile ma di minore intensità è l'emissione che chiamai onomatopeicamente "vento", che

ascoltai in Umbria per tutto il mese di agosto precedente al terremoto dell'Umbria-Marche del settembre '97.

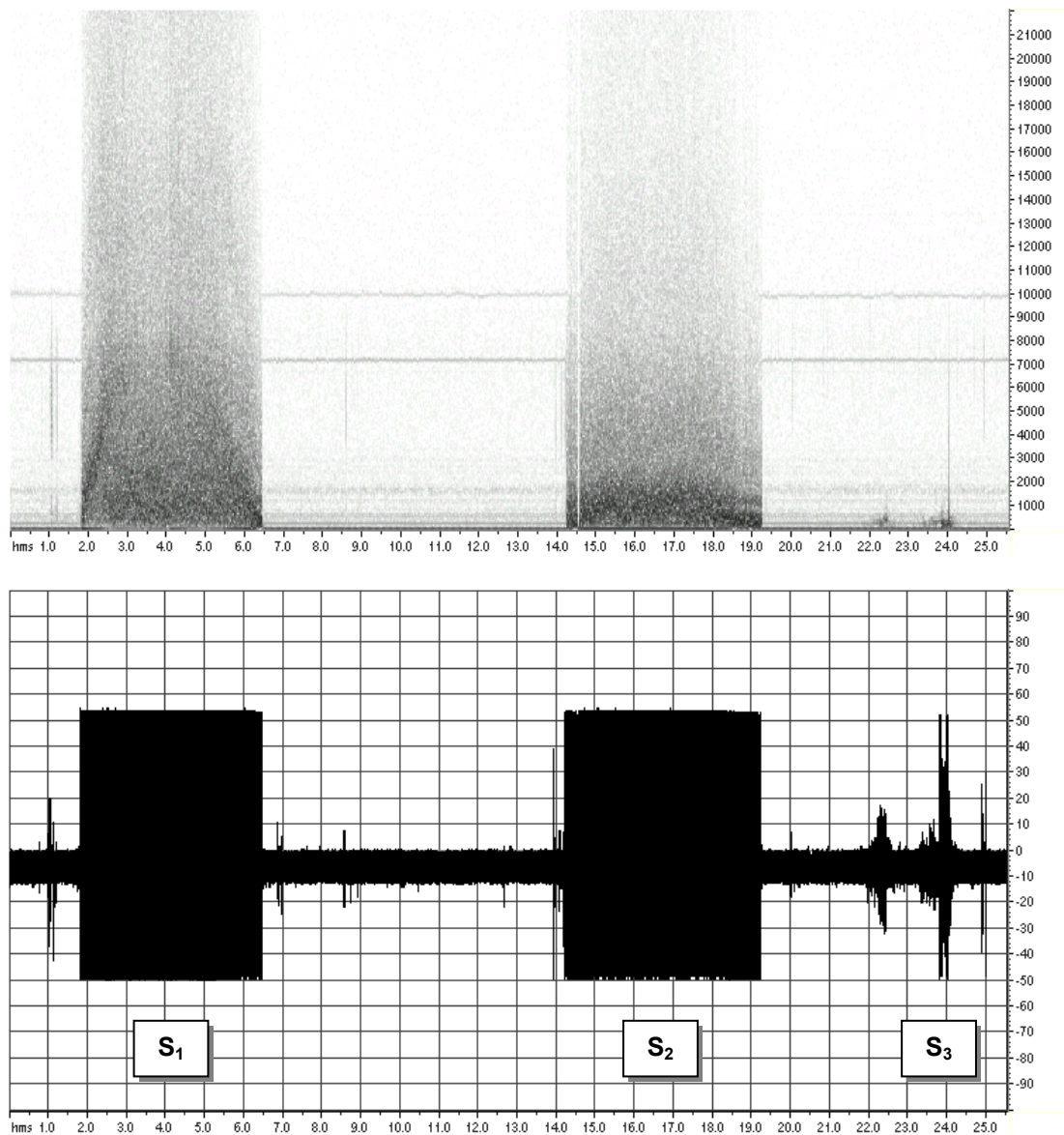
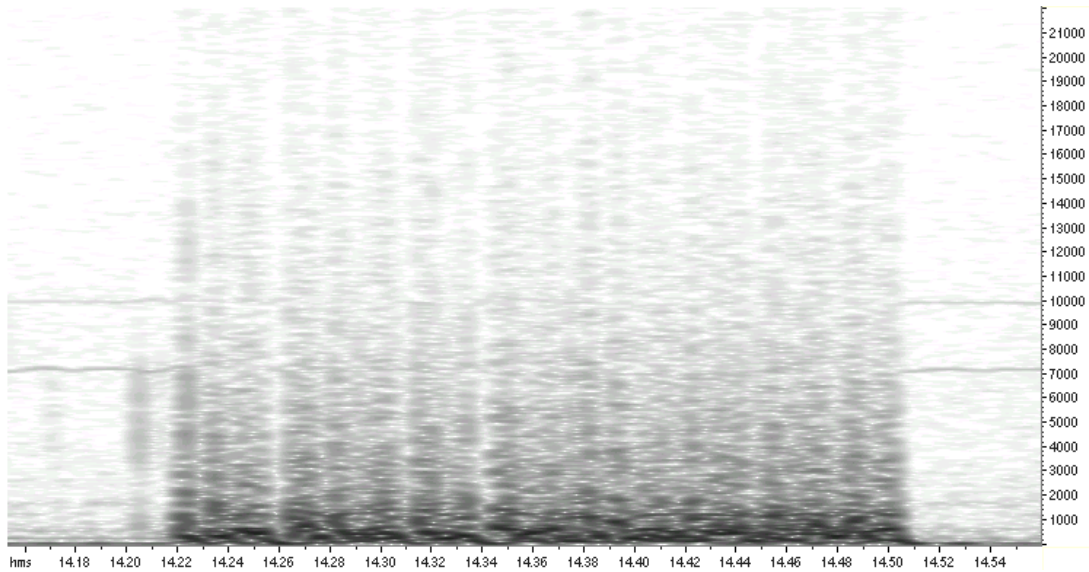


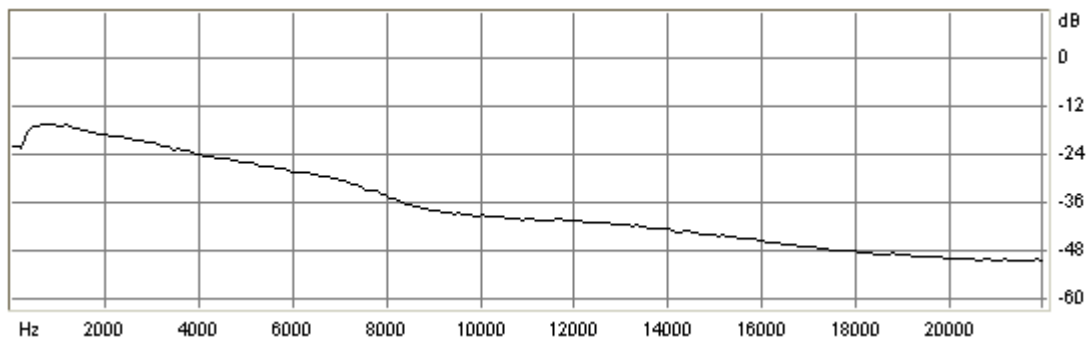
Fig.37 - Le inconsuete emissioni avvenute circa 21 secondi dopo l'esplosione nella registrazione "UC2\_7". In alto lo spettrogramma e in basso l'oscillogramma. I tempi sono espressi in secondi, le frequenze in Hz e le intensità in %.

Se si osservano più in dettaglio (fig.38) queste emissioni rappresentano in realtà una rapida successione di impulsi dello stesso tipo di quelli già osservati ma in sequenze piuttosto uniformi nella distribuzione spettrale. Questo giustifica le nette e brevissime interruzioni che caratterizzano questo tipo di emissione solo apparentemente continua.



*Fig.38 - Particolare del primo segmento dell'episodio "S<sub>2</sub>". Si può vedere una sequenza di impulsi tipicamente radiosismici sorprendentemente uniformi nella distribuzione spettrale.*

La distribuzione spettrale media delle ampiezze in questa fenomenologia (fig.39) è appunto quella caratteristica dei segnali radiosismici che si vedrà in maggiore dettaglio nelle registrazioni "pure" effettuate in laboratorio (cfr. par.4.1 pag.167).



*Fig.39 - Distribuzione spettrale media della sequenza "S<sub>1</sub>". E' conforme agli spettri "continui" osservati negli esperimenti in laboratorio.*

L'ultimo episodio (S<sub>3</sub>) è del tutto differente. Ha un suono modulato corrispondente alle emissioni naturali che nelle mie esperienze precedenti a questa tesi classificai come "mosche" e "voci". Si tratta di suoni le cui estensioni spettrali e rapidità di modulazione suscitano somiglianze bizzarre: dal ronzio evanescente di un moscone

ad una voce umana che pronuncia con enfasi frasi dal significato sempre incomprensibile.<sup>53</sup> In questo caso si tratta di una via di mezzo tra i due estremi, che all'ascolto diretto appare vagamente come in mormorio.

---

<sup>53</sup> Queste “voci”, ben note in banda E-VLF, hanno origine sconosciuta ma non sono interferenze di stazioni radiofoniche.

## **3.2 - INDAGINI IN LABORATORIO: ROTTURA PER COMPRESSIONE**

### **UNIASSIALE**

Questo ciclo di esperimenti è stato eseguito presso il Laboratorio Sperimentale delle Ferrovie dello Stato, sito in Piazza Ippolito Nievo a Roma. Il laboratorio delle FS dispone di una serie di officine specializzate per eseguire test di ingegneria meccanica, ingegneria edile e geotecnica ad altissimo livello, necessarie per ottemperare alle necessità dell'azienda ferroviaria di stato.

Una di esse è adibita alle prove di compressione uniassiale ed è dotata, tra le altre, di una grande pressa idraulica da 500 Ton, utilizzata per eseguire esami su campioni del formato standard 10x10x10 cm provenienti da ogni parte del paese.

Proprio questa macchina non comune si è rivelata particolarmente adatta ai nostri scopi, sia per la possibilità di utilizzare campioni di grande formato che per la massiccia struttura metallica e la sua particolare collocazione che le conferiscono una naturale schermatura alla radiazione industriale.

L'ambiente dei laboratori infatti è ovviamente saturo di rumore elettromagnetico a bassa frequenza generato principalmente dalla fitta rete di distribuzione elettrica, dall'illuminazione al neon e dalle apparecchiature utilizzate nelle officine adiacenti. Nell'ambito della sperimentazione preliminare furono testate altre due presse di ordinaria potenza registrando però forti ed inevitabili interferenze causate dall'alimentazione delle pompe idrauliche e dagli estensimetri utilizzati nelle ordinarie prove di compressione.

### 3.2.1 - SCOPO E DESCRIZIONE DELL'ESPERIMENTO

Questo ciclo di sperimentazione consiste nel monitoraggio dell'emissione elettromagnetica nello spettro E-VLF di campioni di roccia sottoposti a compressione uniassiale fino alla rottura. Campioni di roccia opportunamente selezionati, tagliati e testati, sono stati portati alla rottura mediante compressione in un ambiente controllato al fine di confermare l'emissione elettromagnetica da parte del materiale lapideo, verificare un eventuale rapporto causa-effetto tra fratturazione e impulsi EM, nonché confrontare la reazione di diversi materiali.

La preparazione dei campioni è stata molto accurata e si può suddividere in tre fasi: selezione, taglio e test di compattezza.

#### SELEZIONE

L'analisi in laboratorio consente finalmente di poter confrontare diversi materiali lapidei. Naturalmente per prima cosa sono stati raccolti campioni di *calcare massiccio* presso Guidonia e Palombara Sabina per poter avere un riscontro diretto sulla stessa roccia sollecitata con le esplosioni nelle prove precedenti. Si è ritenuto utile verificare anche la reazione di altri litotipi che possono essere direttamente interessati dalla sismicità appenninica. Sono stati quindi raccolti nel territorio di Norcia campioni di *corniola* e *scaglia variegata*, appartenenti appunto alla successione umbro-marchigiana. Come è evidente, sono state scelte rocce abbastanza eterogenee per struttura e composizione mineralogica per confrontare l'efficienza del fenomeno radiosismico. Ma trattandosi questa volta di calcari stratificati e (riguardo la scaglia) di calcari marnosi fittamente stratificati, è stato piuttosto difficile selezionare blocchi sufficientemente grandi e compatti.

Oltre alle rocce “scelte”, sono stati utilizzati anche altri campioni resisi occasionalmente disponibili, quali dei porfidi provenienti dal Trentino di cui disponeva il laboratorio stesso e dei calcari a rudiste (successione laziale-abruzzese) impiegati nella tesi di un altro studente che frequentava il laboratorio.

## **TAGLIO**

I campioni di porfido delle FS erano già tagliati nel formato standard utilizzato per la pressa da 500 Ton, cioè un cubo di 10 cm di lato. I nostri campioni sono stati adattati alle stesse dimensioni ma, per motivi pratici dovuti alla stratificazione della scaglia, il taglio è stato uniformato ad un parallelepipedo rettangolo di 8x8x10 cm (fig.41).

E' stato particolarmente curato il parallelismo delle basi 8x8, che dalla misurazione al calibro centesimale elettronico ha rivelato un errore massimo di 0,6 mm, contro una tolleranza richiesta di 1 mm.

I campioni di *calcari a rudiste* invece, essendo stati impiegati su una pressa più piccola e con le modalità richieste da uno studio indipendente dal nostro, avevano una forma cilindrica con un diametro di 3 cm per un'altezza di 7.

## **TEST DI COMPATTEZZA**

Data la diversità litologica (e la natura estremamente friabile della *scaglia*) si è ritenuto utile effettuare un test su tutti i campioni per avere a priori una misura relativa della loro compattezza. L'esame è stato effettuato presso lo stesso



laboratorio FS mediante l'Ultrasonic Tester CONTROLS-E46 (proprietà Ente Ferrovie dello Stato). E' stato quindi misurato il tempo di percorrenza dell'onda ultrasonica attraverso la roccia lungo l'asse di compressione (fig.42).

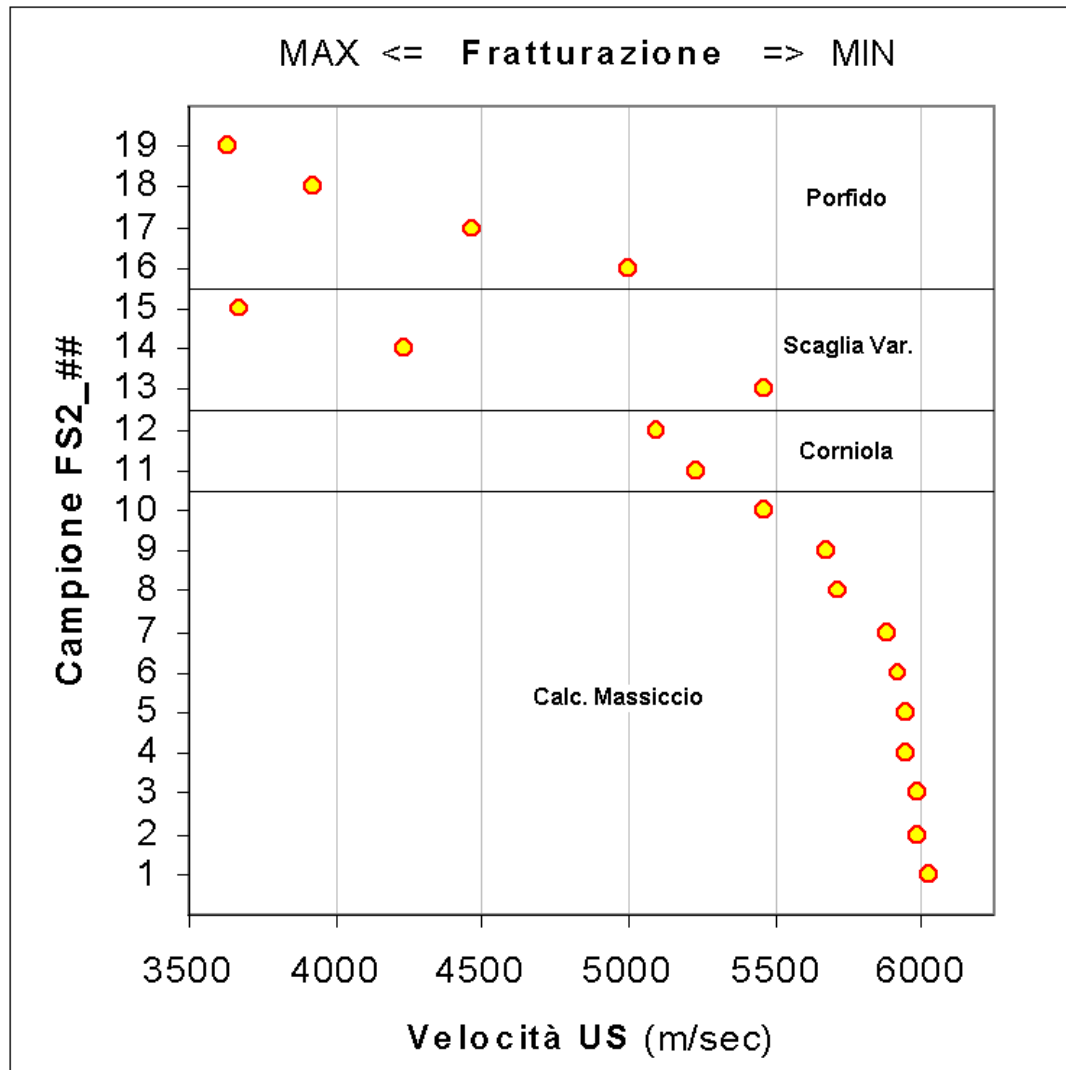


Fig.40 - Velocità di propagazione degli ultrasuoni misurata lungo l'asse di compressione. Questa misura fornisce indicazioni relative sulla compattezza del campione.

Da questo dato è stata poi calcolata la velocità di propagazione degli ultrasuoni che è direttamente proporzionale alla compattezza del campione. L'eventuale presenza di fratture o discontinuità (stiloliti, inclusioni, cristalli spatici ecc.) si riflette infatti in una più bassa velocità di propagazione. Naturalmente i valori saranno confrontabili

soltanto nell'ambito dello stesso litotipo. I risultati ottenuti su 19 campioni selezionati, raggruppati per litologia, sono sintetizzati nel grafico della figura 40.

Fig. 41 (sinistra) - Raccolta di campioni tagliati a facce parallele.

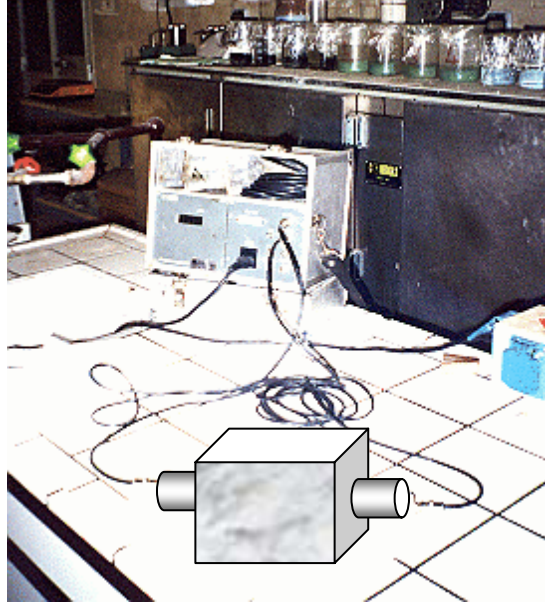


Fig. 42 (destra) – Il tester a ultrasuoni (in secondo piano) utilizzato per misurare la compattezza del materiale ed un campione di roccia (fotomontaggio in primo piano) nella posizione di misura.

### 3.2.2 - PROCEDURA E MODALITÀ DI REGISTRAZIONE

Uno dei principali vantaggi di questa prova in laboratorio è la ridottissima distanza dei sensori dal volume emettitore che ci libera da approssimazioni dovute alla velocità di propagazione dei segnali. Al momento della rottura però il campione esplode letteralmente, proiettando schegge tutto intorno. E' stato quindi necessario costruire una struttura che fungesse al tempo stesso da schermo e da supporto per tutti i sensori (per lo più antenne) che monitorizzano l'evento.

La struttura è stata realizzata in legno con forma e dimensioni studiate appositamente per le necessità dell'esperimento (fig.43). E' costituita da un robusto quadrilatero con

tre lati chiusi sui quali sono disposti i sensori e uno aperto per consentire la manipolazione del campione e lo sfogo dell'esplosione. Una guarnizione perimetrale in gommapiuma circonda gli spigoli superiori consentendo una schermatura antischeggia aderente al piatto della pressa ma deformabile durante la compressione senza alcuna interferenza meccanica con la struttura portante.

Un foro protetto da una fitta rete metallica alloggia il microfono acustico isolato dalla struttura tramite un'intercapedine in gomma. Il lato opposto è opportunamente attrezzato per sostenere le antenne radio e i relativi bocchettoni di collegamento (fig.44). Il terzo lato funge esclusivamente da schermo per l'antenna elettrica E-VHF, solidale al ricevitore, che resterà sospesa dietro la parete senza alcun contatto meccanico con la struttura (fig.45).

Il piatto inferiore della pressa è posizionato su un binario al livello del suolo e sempre al suolo, intorno alla pressa, sono state disposte tutte le apparecchiature sensibili poiché le masse metalliche presenti sul posto garantiscono in quella posizione una schermatura ottimale. Soltanto il registratore era posizionato sopra un supporto metallico in una posizione più operativa (fig.46,47,48).

Come presa di terra è stato usato questo stesso supporto e le grandi piastre della pressa che, insieme alle colonne filettate e agli armadi metallici circostanti schermano l'area delle operazioni.

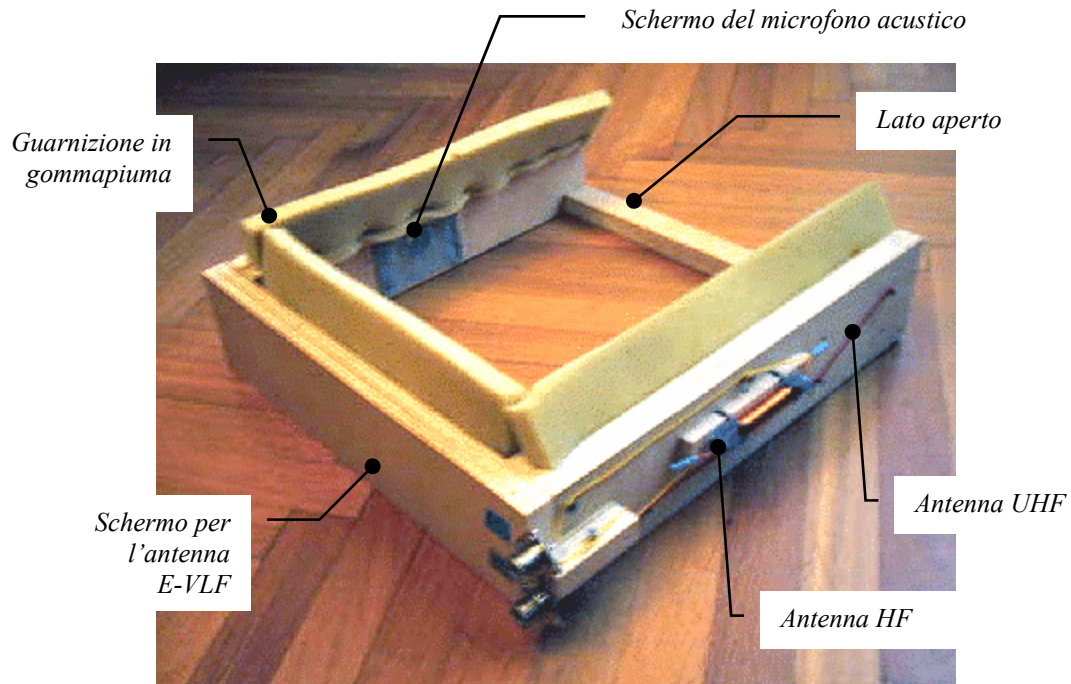


Fig.43 - La struttura in legno costruita per la protezione e il sostegno dei sensori.

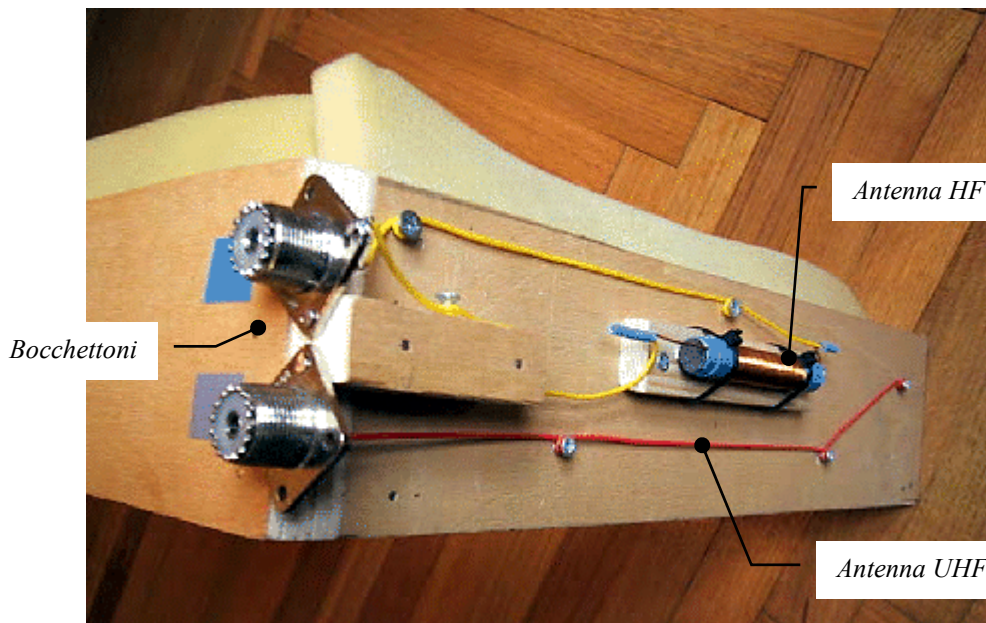


Fig.44 - Particolare del lato che supporta le antenne radio



Fig.45 - Sonda elettrica del campo E-VLF montata sul ricevitore



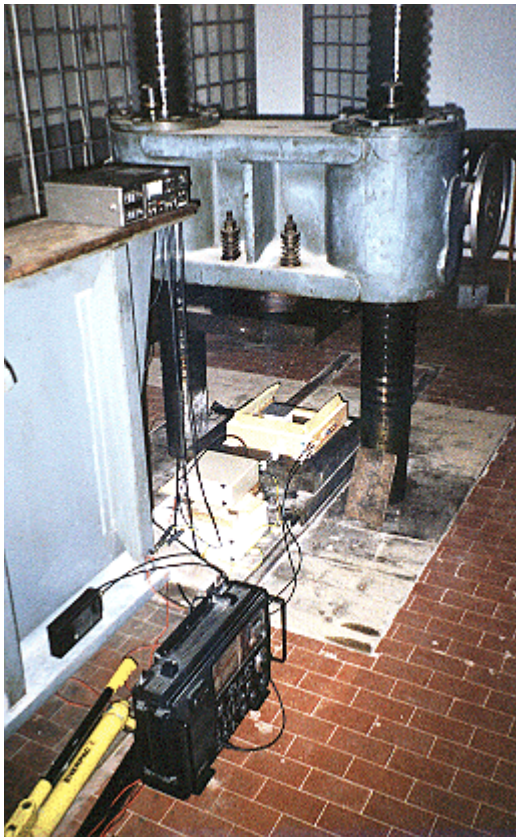








Fig.46 - Disposizione delle apparecchiature intorno alla pressa da 500 tn. Le strutture metalliche costituiscono una buona schermatura EM.

- |   |                         |   |                           |
|---|-------------------------|---|---------------------------|
|  | Struttura di protezione |  | Ricevitore E-VLF          |
|  | Ricevitore HF           |  | Microfono acustico        |
|  | Ricevitore UHF          |  | Registratore multitraccia |

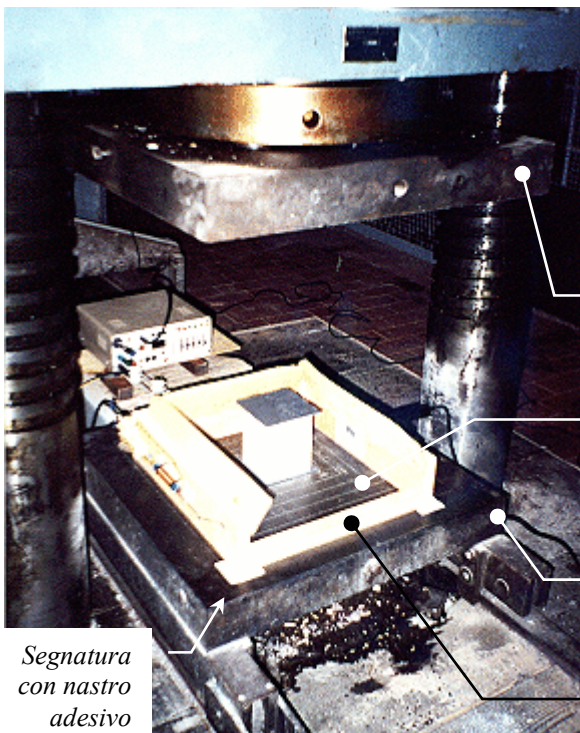
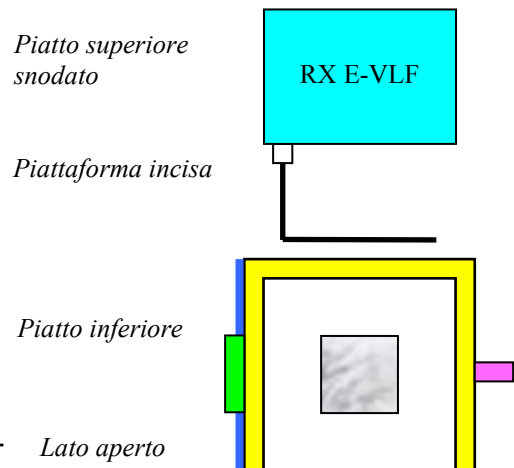


Fig.47 - Disposizione dei sensori sotto i piatti della pressa. Sullo sfondo il radiogeofono con la sua antenna protetta dietro alla struttura in legno. I colori dello schema in pianta si riferiscono alla legenda precedente.



Segnatura  
con nastro  
adesivo

Fig.48 - Posizione del ricevitore e dell'antenna E-VLF.

L'antenna, protetta dallo schermo e dalla guarnizione, è sospesa tra le piastre della pressa senza alcun contatto se non con il ricevitore al quale è direttamente collegata.

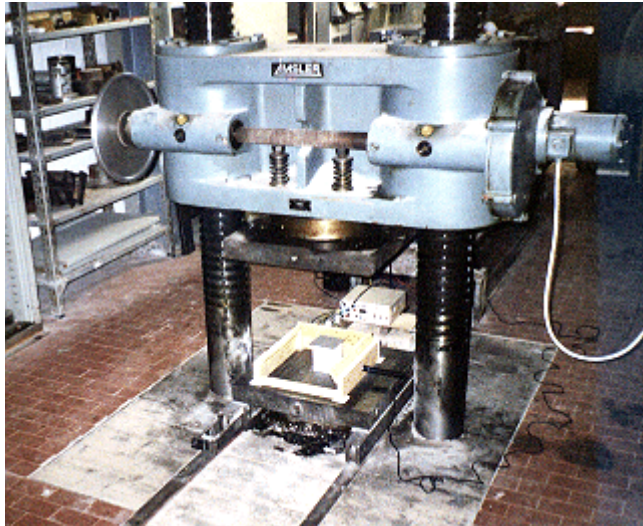
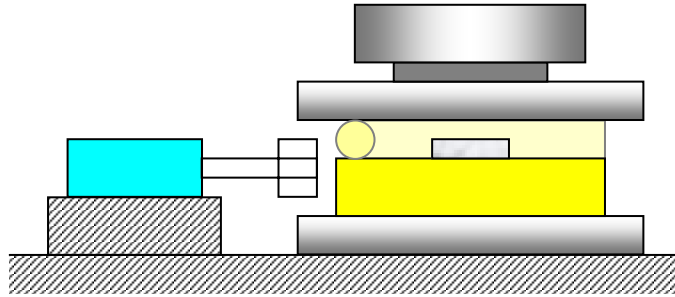


Fig.49 - Strumentazione e campione sotto la pressa.

Notare i binari su cui scorre il piatto inferiore. L'esplosione del campione può occasionalmente causare una sollecitazione tale da far deragliare sul posto la pesantissima piastra d'acciaio. Questa è stata la causa dell'incidente che ha compromesso parte degli esperimenti (cfr. pag.143)

Fig.50 - La consolle di comando della pressa è racchiusa in un'area di sicurezza dove tutto il personale deve essere confinato durante il funzionamento della macchina.

Quando si supera il limite di rottura il campione di roccia esplose letteralmente, proiettando intorno pericolosissime schegge.

Il grande quadrante analogico indica la forza applicata al campione. Le manopole nere regolano il gradiente di carico e scarico.



I campioni sono stati inseriti attraverso il lato aperto della struttura di protezione e posizionati con precisione entro un riquadro inciso sulla piastra inferiore. La stessa struttura, dopo la rimozione delle schegge, poteva essere ricollocata sempre nella medesima posizione segnata sulla base con del nastro adesivo (fig.49).

La pressa è azionata da una consolle collocata in un'area protetta da una gabbia metallica rivestita in plexiglas. Una volta accese le apparecchiature di monitoraggio e avviato il registratore è obbligatorio attendere la rottura del campione all'interno della stanzetta di manovra (fig.50).

In questo ciclo di sperimentazione non è stato possibile utilizzare il microfono di pressione a causa del malfunzionamento del suo amplificatore. La sua funzione dunque è stata del tutto sostituita dal microfono acustico. Il canale rimasto vuoto è stato utilizzato per monitorare la radiazione UHF.

## **IMPIANTO DI RILEVAMENTO**

Il rilevamento prevede la registrazione simultanea su 4 tracce audio dei seguenti segnali:

- Radiazione elettromagnetica in banda 20Hz-20kHz (radiogeofono)
- Ampiezza segnale elettromagnetico su 3,9 MHz (radoricevitore multibanda)
- Ampiezza segnale elettromagnetico su 460 MHz (radoricevitore scanner)
- Segnale acustico in banda 50Hz-16kHz (microfono acustico)

Le specifiche tecniche degli apparecchi sono state descritte nel paragrafo 2.2 (pag.54); le modalità operative adottate nell'ambito di questo test verranno descritte nel prossimo capitolo.

- Il monitoraggio dello spettro radio E-VLF mediante il radiogeofono, come è noto, è lo scopo principale dell'esperimento.
- Il monitoraggio di una frequenza sulla banda HF ricalca l'esperimento "Mognaschi" (cfr. cap1.5 pag.41) almeno nelle modalità strumentali. E' stata utilizzata la banda HF perché il ricevitore non consentiva il collegamento di un'antenna esterna in MF e nelle condizioni di laboratorio non poteva operare efficacemente con quella incorporata. La frequenza è stata scelta per essersi dimostrata indisturbata da trasmissioni radiofoniche e particolarmente "attiva" per quanto riguarda le emissioni naturali dei fulmini.
- Il monitoraggio di una frequenza sulla banda UHF una banda di frequenze estremamente alte sulla quale però molti radioamatori hanno segnalato rumori sospetti associabili all'imminenza di un sisma. Questo monitoraggio sarà utile quindi a saggiare l'ampiezza dello spettro delle emissioni sismoacustiche
- La registrazione dell'onda acustica servirà a marcare l'istante della rottura per stabilirne il legame temporale con i segnali EM.



## REGOLAZIONE DEGLI STRUMENTI

### RICEVITORE DI CAMPO E-VLF

- Banda: intermedia
- Antenna: esterna rigida<sup>54</sup>, lunghezza 70,5 cm, polarizzazione orizzontale. Distanza dallo schermo 1.5 cm ; 11,9 cm dai campioni 8x8 e 11,9 cm dai campioni 10x10
- Presa di terra: piastre della pressa e pesanti strutture metalliche circostanti.
- Volume: livello max
- Lettura rumore sul REC: -25 dB

### RADIORICEVITORE MULTIBANDA (Marc NR82-F1)

- Banda: HF
- Frequenza: 3,9 MHz
- Demodulazione: AM Narrow
- Antenna: bobina di 80 sp. di rame smaltato  $\varnothing$  0,6 mm senza spaziatura su 8 cm di ferrite cilindrica  $\varnothing$  1 cm fissata orizzontalmente sullo schermo ad una distanza di 15,9 cm dai campioni 8x8 e 14,9 dai 10x10
- Adattatore antenna: massimo accordo
- Presa di terra: come sopra
- RF Gain: regolato a metà
- Volume: max, corrispondente ad una lettura del rumore di fondo sul VU Meter del REC di < 20 db.

### RADIORICEVITORE SCANNER (BJ2000-MKIII)

- Banda: UHF
- Frequenza: 460 MHz
- Demodulazione: AM
- Antenna: 32 cm filo di rame  $\varnothing$  0,5 mm in guaina isolante fissato orizzontalmente sullo schermo alla distanza di 15,2 cm dai campioni 8x8 e 14,2 cm dai campioni 10x10
- Presa di terra: come sopra
- Volume: regolato per una lettura del rumore di fondo sul VU Metre del REC corrispondente a -20 dB

### MICROFONO ACUSTICO

- Monitoraggio rumore di fondo sul VU Meter del REC: -15 dB.

---

<sup>54</sup> Antenna elettrica (filare ripiegata) totalmente rigida e solidale al ricevitore, appositamente costruita per questo esperimento. Rimane sospesa tra le piastre della pressa, dietro lo schermo isolante, senza alcun contatto meccanico con lo schermo o con alcuna parte della pressa. (cfr. a seguito "Accorgimenti particolari"; appendice: "Antenna sospesa")

#### REGISTRATORE:

- COMP: off
- CAL: “use”
- DC/AC: ac
- CANNEL: 4
- FM/DR: entrambi su dr.
- Canalizzazione: Ch1: segnale E-VLF  
Ch2: segnale MIC acustico  
Ch3: segnale UHF  
Ch4: segnale SW

#### PROCEDURA DI REGISTRAZIONE

La procedura di registrazione è analoga a quella seguita nella sperimentazione in cava. Sono state effettuate diverse registrazioni del rumore di fondo prima e dopo l'esecuzione delle prove di rottura. Il registratore è stato avviato simultaneamente all'applicazione del carico e arrestato poco dopo la rottura. L'istante della rottura è stato marcato dalla registrazione del microfono acustico. Le varie registrazioni sono state delimitate utilizzando la marcatura acustica del registratore (beep).

#### ACCORGIMENTI PARTICOLARI

Sono stati eseguiti numerosissimi test sulle interferenze ambientali e strumentali per assicurare la massima affidabilità della sperimentazione. Tra questi alcuni meritano una particolare descrizione:

- Per prima cosa è stato necessario appurare che il funzionamento della pressa stessa non producesse alcuna interferenza nei segnali rilevabili dalla strumentazione. Sono state eseguite prove di carico e scarico su di un materiale

robusto e conduttore facilmente reperibile presso il laboratorio FS: un segmento di binario. Il campione di fatto cortocircuitava le piastre della pressa, eliminando ogni possibile effetto elettrostatico. Sebbene sia noto un fenomeno di “pianto” anche nei metalli, il campione era certamente meno rigido e più resistente della roccia. E’ stato quindi possibile sottoporlo ad un carico<sup>55</sup> di 300 Ton, ben superiore a quello massimo tollerato dalle rocce, pur senza raggiungere una pressione critica. Il risultato è stato una totale assenza di segnale. La pressa e i suoi meccanismi non hanno dunque influenza sulle registrazioni.

- Un’altra possibile fonte di interferenza poteva essere l’ipotetico scambio di cariche tra la roccia e la macchina o tra le schegge e le piastre della pressa. Registros di prova eseguite su campioni di porfido isolati dalle piastre della pressa e campioni direttamente a contatto con le piastre sono state confrontate senza rilevare alcuna differenza che non rientrasse nella normale variabilità del fenomeno. L’isolamento è stato effettuato interponendo tra le basi e le piastre un doppio strato isolante costituito da un foglio di plastica e un foglio di cartone secco pressato di 3 mm di spessore (fig.50).

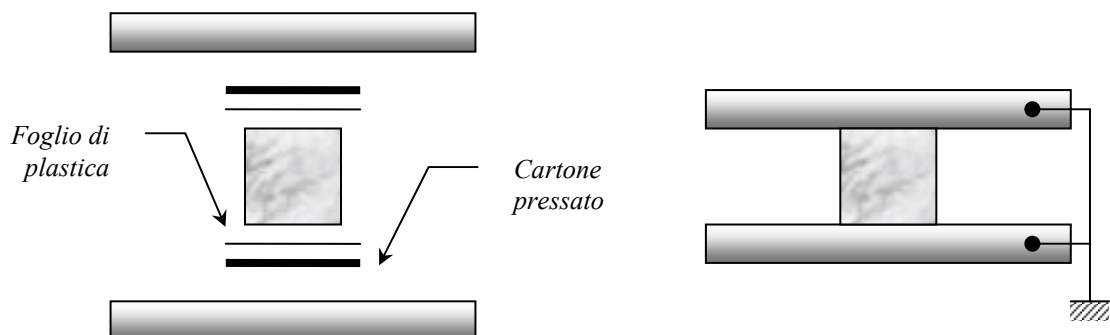


Fig.50 - Test di isolamento dei campioni

<sup>55</sup> Forza applicata sulla superficie della sezione del binario.

Quindi sono state effettuate altre prove con le piastre cortocircuitate e collegate a terra. Si è potuto quindi stabilire che i segnali registrati non sono prodotti da occasionali scambi di cariche tra materiale del campione e la macchina circostante. Per assicurare una migliore schermatura dalla radiazione di fondo si è inoltre stabilito di utilizzare sempre il collegamento a terra delle piastre.

- Altra possibile fonte di interferenza poteva essere l'urto e lo sfregamento reciproco tra le schegge durante l'esplosione del campione. Sono state quindi effettuate tra le piastre molte prove manuali di sfregamento e urto tra grosse schegge e di abrasione e macinazione in un insieme di piccole schegge. Tutte queste prove però, a parte naturalmente un po' di rumore acustico, non hanno prodotto alcun tipo di segnale elettromagnetico. Qualche tenue e brevissimo segnale si è osservato soltanto facendo schiantare sulla piastra inferiore un campione fratturato ma inesplosivo. Il campione, risultato di una prova di rottura malriuscita, era praticamente un blocco di schegge ancora incastrate nella posizione originaria ed è stato violentemente gettato verso il basso, sulla piastra inferiore. C'è da ritenere che questo debole effetto sia dovuto ad un'ulteriore fratturazione. Si potrebbe dunque supporre che, almeno nel campo di deboli sforzi, soltanto la fratturazione, e non l'abrasione, può essere causa di segnali sismoacustici.
- Una particolare cura ha ovviamente richiesto la schermatura delle apparecchiature e dell'ambiente di operazione. Oltre alla serie di cavetti schermati utilizzata negli esperimenti in cava, si è curata particolarmente la disposizione delle apparecchiature e la presa di terra comune. Come si è già

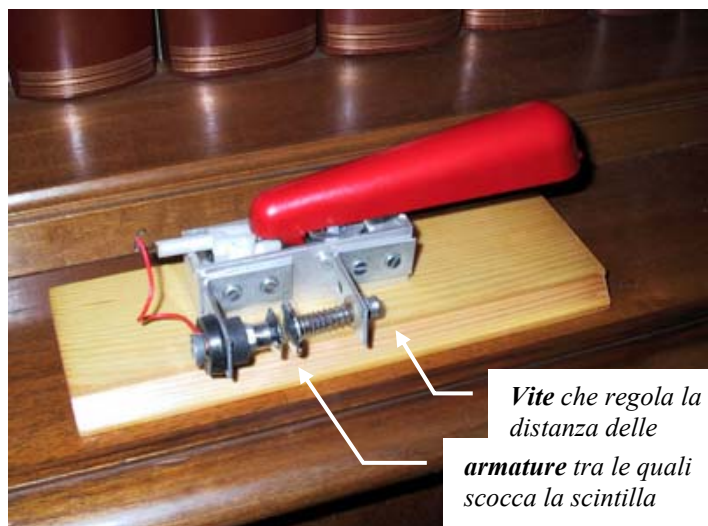
accennato, le piastre della pressa e le strutture metalliche circostanti sono state collegate al cavo di terra comune delle apparecchiature.

- Un altro importantissimo accorgimento è stato l'isolamento meccanico della sonda E-VLF. A parte il contatto elettrico infatti, il semplice contatto meccanico di qualsiasi oggetto con l'antenna avrebbe causato una vibrazione della sua struttura e soprattutto un movimento all'interno dello spinotto di collegamento dell'apparecchio. Ciò avrebbe prodotto un forte "crack" nella registrazione. La sonda quindi è stata collegata all'apparecchio in modo che esso stesso fungesse da unico supporto, del tutto indipendente dal macchinario della pressa (fig.47 e 48) e dallo schermo di protezione.
- Per tarare e verificare l'efficienza degli strumenti è stato utilizzato un segnale artificiale prodotto da un accendino piezoelettrico. Si tratta di un apparecchietto artigianale costruito con il meccanismo di un accendino per i fornelli a gas e adattato a generare scintille di lunghezza regolabile. I risultati ottenuti con questo "giocattolo" (fig.51) verranno meglio descritti in seguito, poiché i segnali che sono stati prodotti sono in qualche modo omologabili a quelli radiosismici.

*Fig.51 - Il "giocattolo" costruito per tarare e testare le apparecchiature radio.*

*Tra le due armature convesse si forma una scintilla di lunghezza pari alla separazione delle armature stesse.*

*La massima intensità nella larga banda di emissione interessa frequenze tanto più alte quanto più è corta la scintilla.*



**Vite che regola la distanza delle armature tra le quali scocca la scintilla**

## INCONVENIENTI OCCORSI DURANTE IL LAVORO

Nel corso del lavoro in laboratorio si sono succeduti alcuni inconvenienti che hanno limitato la portata dell'esperimento, pur senza comprometterne il successo. Si tratta, nell'ordine, di un guasto al sensore di pressione, il malfunzionamento della pressa e un'interferenza ambientale imprevista. Nonostante ciò, i segnali radiosismici, almeno in banda E-VLF, si sono manifestati con sistematicità ed evidenza

Il guasto all'amplificatore del microfono di pressione avrebbe potuto compromettere tutto l'esperimento. Lo scopo principale delle registrazioni in laboratorio era infatti quello di determinare con precisione la relazione temporale tra le emissioni radiosismiche e la rottura del campione. L'indispensabile ruolo del microfono di pressione è stato completamente sostituito dal microfono acustico, ma per poter determinare l'istante della rottura in base al segnale acustico, occorreva verificare che i due risultassero perfettamente sincronizzati.

Si è proceduto quindi al confronto delle coppie di segnale Pressione-Suono registrate nelle prove in cava. Entrambi i segnali sono stati opportunamente filtrati per lisciare il rumore di fondo e poter meglio valutare il punto esatto in cui avevano inizio le oscillazioni. Il filtro passa-basso FFT risultava tagliato a 600 Hz con la curva di risposta illustrata nella fig.52.

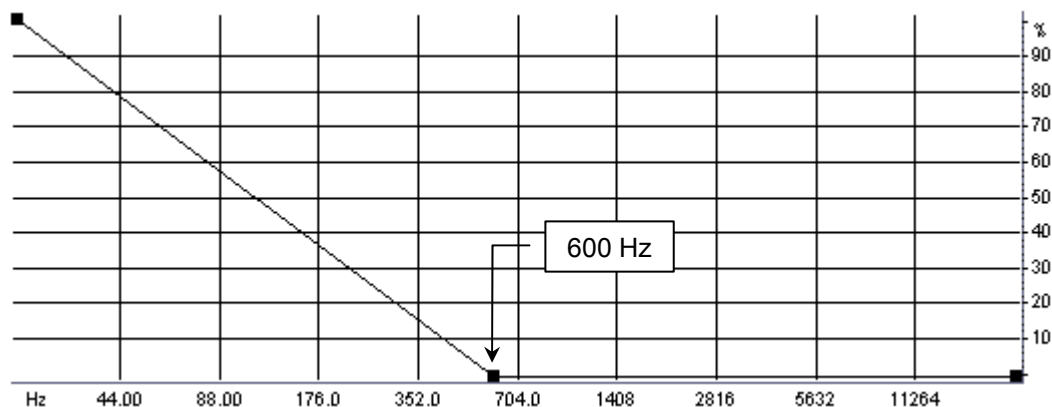


Fig.52 - Curva di risposta del filtro passa-basso FFT usato per appiattire il rumore di fondo.

Il risultato del confronto (di cui è mostrato un esempio nelle fig.53) è stato uno scarto inferiore al millesimo di secondo, quindi oltre i limiti della nostra risoluzione temporale.

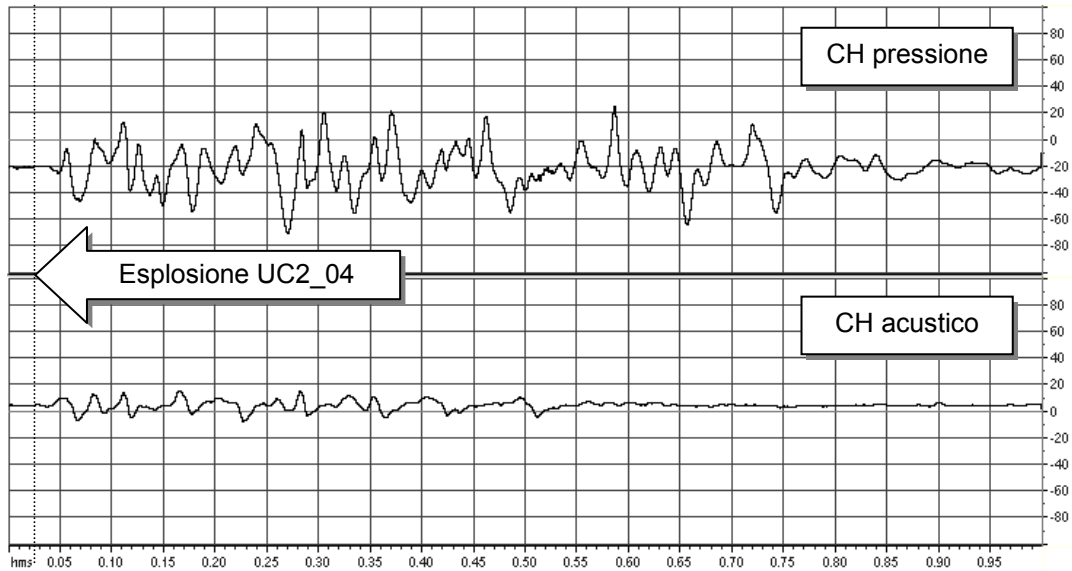
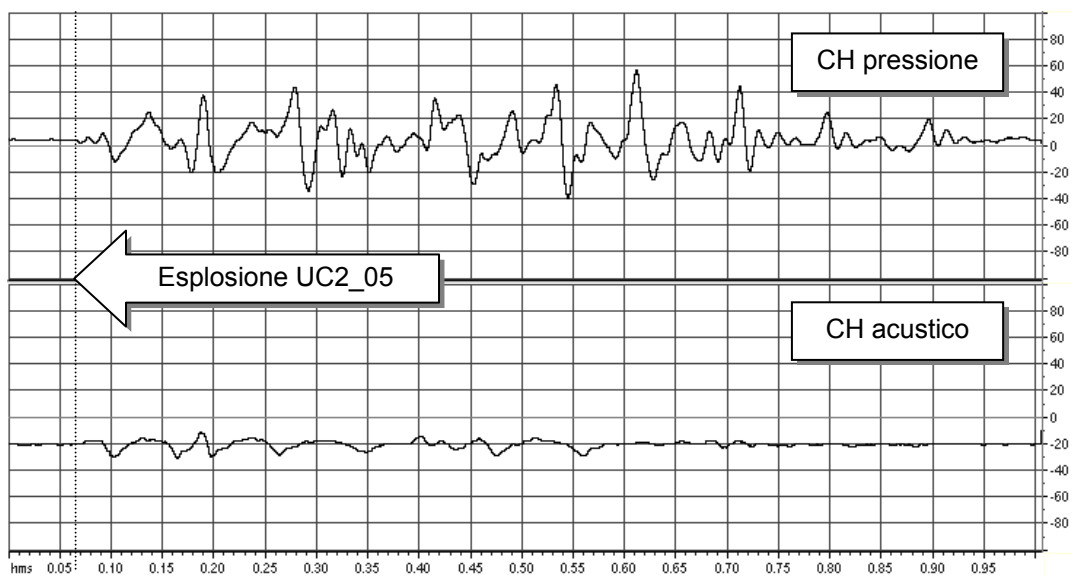


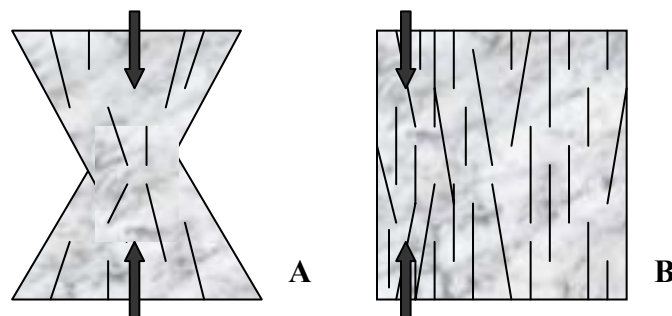
Fig.53 - Coppie di segnali relativi allo stesso evento: la linea tratteggiata indica l'inizio dell'esplosione. L'intensità è espressa in decibel ; il tempo in secondi.



Il successivo malfunzionamento della pressa è stato probabilmente il fattore negativo più determinante. Al momento della rottura dei campioni avviene letteralmente un'esplosione di schegge. La forte sollecitazione ha causato il deragliamenti della pesante piastra inferiore dai suoi binari. Questa si è trovata così ad essere ancora nella sua posizione operativa ma non più orizzontale e a causa delle sue dimensioni non è stato possibile notare ad occhio questa anomalia. L'incidente è avvenuto dopo le ultime prove su campioni non significativi (tutte eseguite senza problemi) e prima di iniziare a lavorare sulla serie operativa (iniziata subito male). Presumibilmente è avvenuto durante il ciclo di lavoro delle FS al quale ci siamo avvicinati.

Il risultato è stato che all'avvio della sperimentazione sui campioni significativi questi hanno reagito tutti in modo anomalo, sbriciolandosi completamente ed assorbendo il carico senza esplodere. La differenza morfologica tra un campione rotto nelle condizioni ottimali ed uno "sbriciolato" è facilmente riconoscibile per l'assenza del tipico "doppio cuneo", come illustra la fig.54. La differenza operativa è nel fatto che il campione B è stato compresso mediante un'azione "a morsa" lungo gli spigoli di un solo lato.

*Fig.54 - Evidente differenza morfologica tra un campione rotto per compressione uniassiale (A) e un campione rotto con compressione disomogenea che ha agito in prevalenza presso gli spigoli di un solo lato (B)*



Teoricamente però non risultava possibile che la piastra inferiore potesse operare in condizioni non ottimali, non era visibile alcuna anomalia e il piatto superiore, come fu subito osservato, era perfettamente snodato. Non fu trovato neppure alcun difetto



significativo nel parallelismo delle facce dei campioni, così, in prima approssimazione, il difetto fu attribuito al materiale. Supponendo che la roccia potesse essere stata strutturalmente disturbata dalle esplosioni subite in cava e notando anche che si trattava di un calcare brecciato con discontinuità stilolitiche, fu ritenuto opportuno sospendere le prove e raccogliere altri campioni. Il successivo ciclo, eseguito su calcare massiccio più compatto e di diversa provenienza, diede però gli stessi risultati.

Il difetto si rese evidente soltanto quando applicai tra le piaste e il campione dei fogli di cartone pressato da 3 mm di spessore, uguali a quelli utilizzati precedentemente nei test di isolamento. Dopo la compressione rimaneva su di essi l'impronta delle fratture subite dal campione, che erano evidentemente concentrate lungo un solo spigolo e sempre dallo stesso lato (fig.55). Soltanto allora, nonostante l'incredulità degli operatori della macchina, fu evidenziato il deragliamento. Nel frattempo però, gran parte dei campioni utili erano stati consumati senza successo.



*Fig.55a - I cartoncini ricalcano le fratture concentrate sempre sullo stesso spigolo, presso il vertice.*



In conclusione, la sperimentazione in laboratorio ne è risultata limitata nel numero e nella varietà dei campioni ma consente comunque di verificare l'esistenza delle emissioni e le loro caratteristiche. Il fenomeno radiosismico si è infatti riscontrato indistintamente su tutti i campioni che hanno subito una rottura uniforme e, pur con modalità differenti, sulla maggior parte dei campioni che non hanno manifestato una rottura netta. Si potrebbe quindi trarre un vantaggio dalla disgrazia, quello di sapere che il fenomeno si manifesta anche in condizioni non puramente compressive.

Un inconveniente ulteriore ma di secondaria importanza è occorso inoltre durante l'esecuzione delle ultime prove, effettuate con la pressa in condizioni ottimali. L'accensione imprevista di qualche apparecchiatura elettrica nei laboratori adiacenti ha causato un inconsueto rumore di fondo che non era mai stato registrato durante le prove tecniche e i test sul rumore di fondo eseguiti nell'arco di un anno. L'interferenza ha colpito presumibilmente il registratore, poiché si riscontrano i medesimi disturbi anche sul canale acustico. Il registratore era effettivamente l'unico strumento che, per ragioni operative, era collocato al di sopra delle strutture

metalliche schermanti. Non ostante ciò i segnali radiosismici sono ben riconoscibili e valutabili.

## CHIAVE DI LETTURA DELLE TRACCE

I segnali registrati in questo ciclo sono dello stesso tipo di quelli registrati in cava. Le differenze riguardano sostanzialmente la distribuzione temporale e il rumore di fondo. Nelle registrazioni in laboratorio i segnali sono più “puri”, mancando i disturbi elettrostatici di origine atmosferica. Talvolta però subentrano interferenze di altra natura.

Sui campioni della serie “*calcare a rudiste*”, che venivano utilizzati nell’ambito di un’altra tesi e quindi richiedevano la presenza di estensimetri elettrici, è ben visibile ad esempio il segnale continuo prodotto da questi sensori, che svanisce quando si staccano con l’esplosione del campione (fig.56).

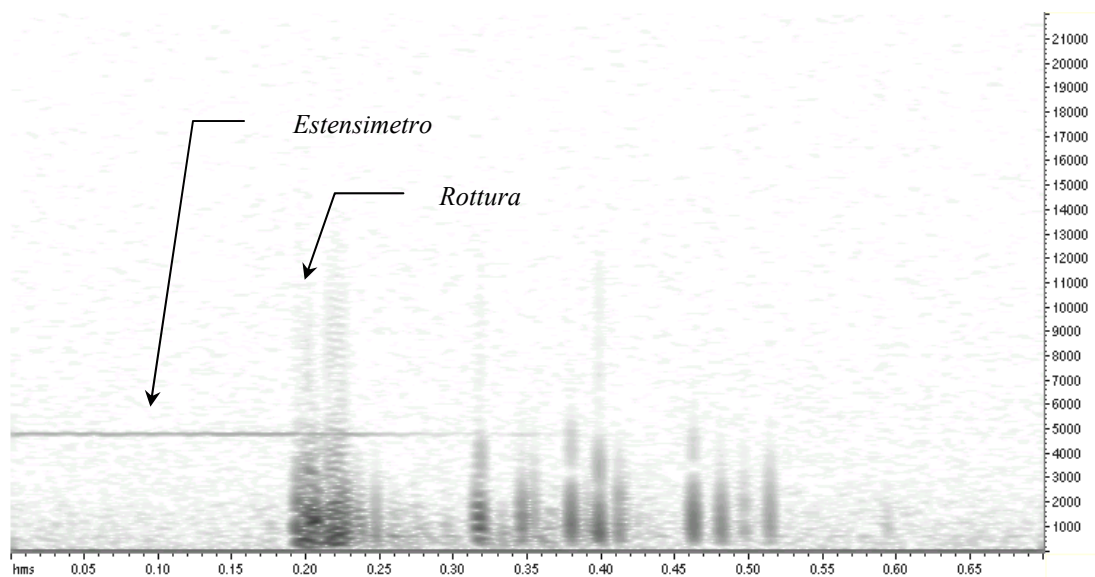


Fig.56 - Campione di *Calcare a rudiste* (FS1\_C11\_1). Sono visibili il rumore monocromatico degli estensimetri e gli urti dei cilindri con la base della macchina. Tempi in sec, frequenze in Hz.

Sempre in questa serie inoltre, i segnali radiosismici nella coda finale spesso si confondono con altri segnali simili, causati dai cilindri metallici che sostituivano le piastre della pressa a contatto con le carote campione. Questi pesanti cilindri, cadendo, colpivano elasticamente la base metallica della macchina e la sequenza smorzata di contatti che ne seguiva causava uno scambio di cariche elettrostatiche attraverso una serie di impulsi.

Quella serie dunque non poteva essere utilizzata per dimostrare l'esistenza del fenomeno ma, al contrario, sulla base di una conoscenza già acquisita, ha potuto rappresentare un ottimo esempio della sua variabilità. I campioni della serie "FS1\_C" che prenderemo in esame sono stati selezionati per essere privi di segnali fantasma.

### **3.2.3 - RISULTATI**

Come per la sperimentazione in cava, le registrazioni analogiche sono state digitalizzate abbinando due canali alla volta e quindi analizzate al computer secondo la procedura e le modalità descritte nel capitolo 2.3.

I risultati ottenuti sui vari canali sono descritti nel seguente riepilogo. E' sottinteso che i segnali, sia radio che acustici, sono riferiti ai campioni che hanno manifestato un episodio di rottura netta.

- **CANALE ACUSTICO:** tutte le registrazioni hanno avuto esito positivo. I picchi non sono necessariamente associati a quelli radiosismici. Si è potuto dimostrare che i segnali ottenuti dal microfono acustico sono sincronizzati con quelli

rilevabili dal microfono di pressione, anche se i picchi non corrispondono. Il segnale acustico può essere quindi utilizzato come marcatore di un evento meccanico (frattura) ma non come misura dello stato tensionale. La forma d'onda tipica è un'oscillazione simmetrica smorzata.

- CANALE E-VLF: i segnali si sono manifestati sistematicamente, con in rendimento dipendente dal materiale e un'efficacia dipendente dalla “qualità” della rottura. I campioni di roccia si sono rivelati sorgenti radiosismiche indipendentemente dalla litologia o dal luogo di provenienza. I segnali iniziano a manifestarsi, con incidenza sporadica, molto prima della rottura del campione e culminano in un evento parossistico in corrispondenza della rottura. La sequenza di emissioni si sviluppa per un lasso di tempo variabile ma generalmente poco più lungo della metà di quello necessario a raggiungere il cedimento, analogamente al “pianto della roccia”. Gli impulsi trovano riscontro diretto nel segnale acustico ma non sono ad esso sincronizzati. La relazione temporale tra di essi non è univoca: non si può dire che sistematicamente l'uno preceda l'altro, ma lo scarto tra di essi è piuttosto esiguo (meno di 0.1 sec). La forma d'onda è abbastanza tipica, presenta poche varianti e spesso inversioni di fase.
- CANALE RADIO HF (AM): si rilevano segnali non sistematicamente, con scarso anticipo sulla rottura e prevalentemente associati ad essa. Il livello è molto più basso dei segnali E-VLF e gli impulsi non sono necessariamente ad essi sincronizzati.

- CANALE RADIO UHF (AM): si rilevano segnali non sistematicamente e solo in associazione alla rottura. Il livello è estremamente basso e spesso confuso nel rumore di fondo. La forma d'onda risulta abbastanza simile a quella registrata nei segnali HF, forse perché entrambi sono frutto di una demodulazione in ampiezza.

In conclusione l'intensità delle emissioni appare diminuire notevolmente all'aumentare della frequenza. Il rendimento del fenomeno radiosismico appare legato al comportamento meccanico del materiale e l'efficacia dipende dal tipo di rottura. La sistematicità, il massimo anticipo sulla rottura, la massima incidenza e la massima intensità dei segnali si verificano sulla banda E-VLF.

### **SEGNALI PRECURSORI**

I segnali precursori sono singoli impulsi o brevi raffiche di impulsi, che sono stati rilevati prevalentemente in banda E-VLF, probabilmente a causa della loro bassa intensità. Lo spettro di questi segnali rivela la tipica distribuzione di una famiglia di armoniche.

La distribuzione temporale di questi impulsi ricorda quella del già citato "pianto della roccia": il fenomeno insorge con un anticipo sulla rottura di poco maggiore della metà di quello necessario al raggiungimento della rottura con un incremento di forza costante (circa 4 minuti su 6). Gli impulsi si manifestano dapprima sporadicamente, poi con sempre maggiore frequenza e in associazioni più numerose, fino alla rottura del campione, quando culminano in un episodio parossistico (fig.57).

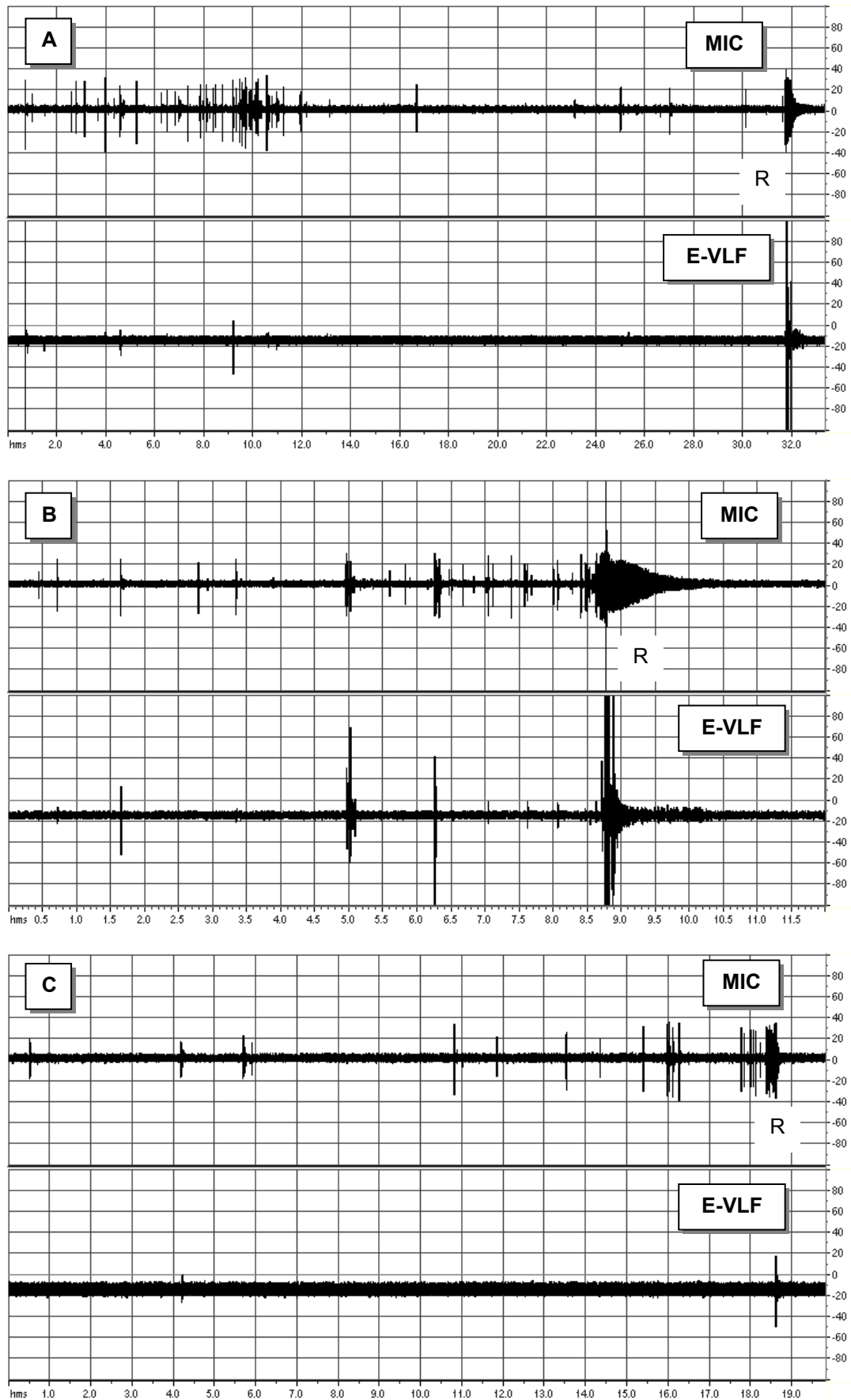


Fig.57 - Sequenze finali dei segnali precursori monitorate pochi secondi prima della rottura (R) in campioni diversi: **A)** Porfido FS2\_1\_M-E; **B)** Porfido FS2\_M2\_ME; **C)** Scaglia variegata FS2\_16\_ME. Sono raffrontati il segnale acustico (in alto) e quello radiosismico (in basso) con i tempi espressi in secondi e le intensità in %.

## **SINCRONIA DEI SEGNALI**

I segnali precursori in E-VLF presentano evidentemente un riscontro nel campo acustico. Osservando però in dettaglio i singoli impulsi si può notare come non sia possibile attribuire una relazione causa-effetto in quanto la loro incidenza non soltanto non è sincrona ma variamente asincrona (fig.58).

Nell'esempio 58-1 si può vedere come il segnale acustico anticipa l'emissione radiosismica di quasi un centesimo di secondo. Le forme d'onda sono molto diverse ma la durata dei segnali è abbastanza simile.

Il caso 58-2 mostra al contrario il segnale acustico che viene anticipato da quello radiosismico, anche se lo scarto è inferiore al millesimo di secondo. Inoltre la durata delle emissioni è decisamente diversa.

Il caso 58-3 mostra delle sequenze abbastanza rappresentativa poiché, di fatto, non è mai possibile riscontrare tra i due segnali una precisa corrispondenza. Un confronto con l'esempio della 58-4 mostra però l'unica possibile relazione: la frequente coincidenza tra l'inizio di alcune coppie di eventi, cosa che richiama la relazione che legava onda di pressione e onda acustica. In realtà esiste comunque un piccolo scarto, inferiore al millesimo di secondo.

L'esempio 58-R, che rappresenta l'emissione parossistica corrispondente alla rottura, introduce infine l'unica relazione sistematica, che verrà evidenziata in seguito: in una scala al decimo di secondo il picco massimo dell'emissione radiosismica corrisponde sempre al picco massimo dell'emissione acustica.



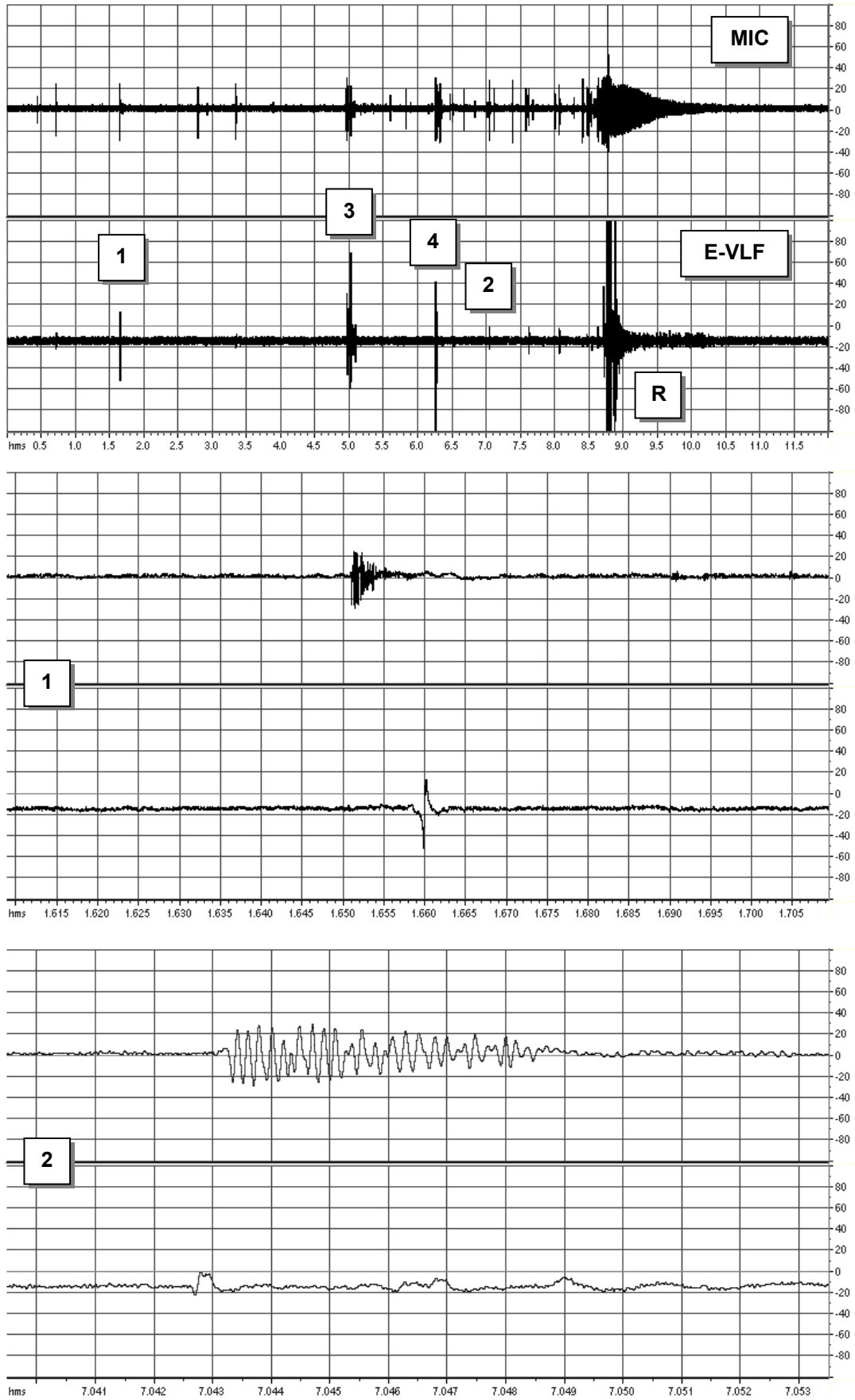
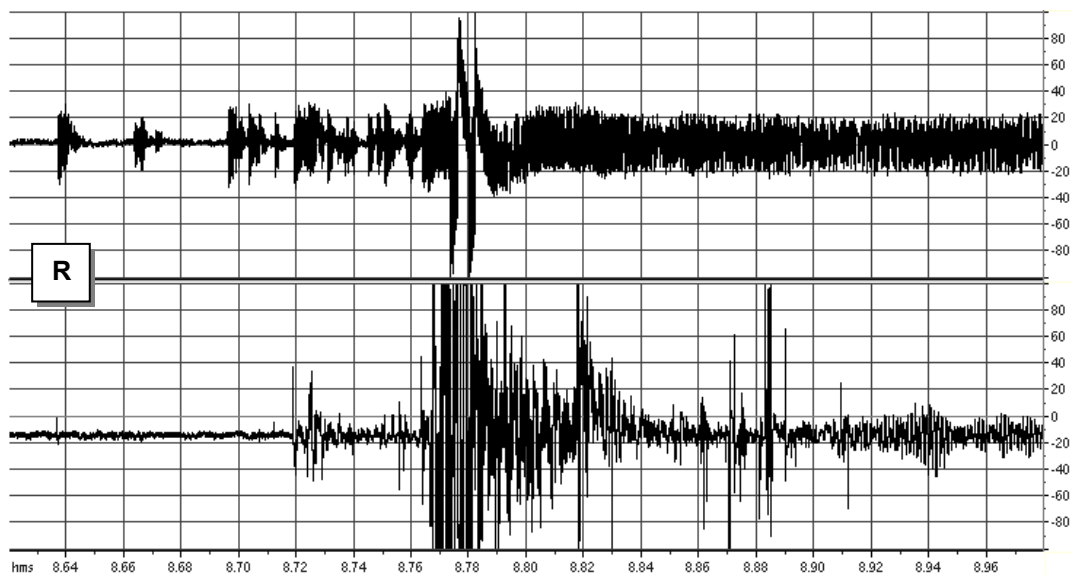
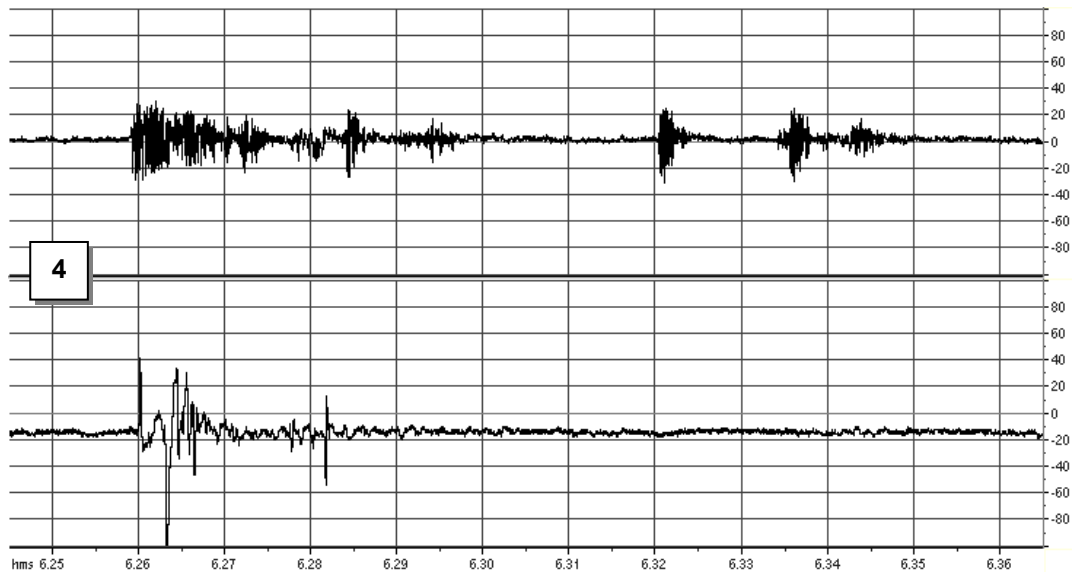
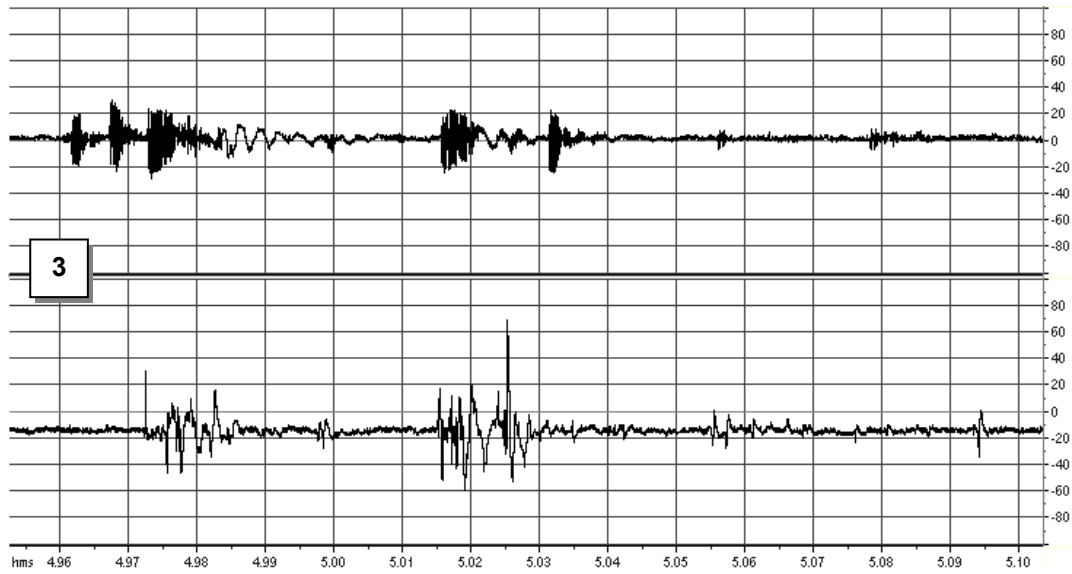


Fig.58-1,2,3,4,R - Ancora la sequenza del Porfido FS2\_2\_M-E, sulla quale sono stati marcati alcuni intervalli che vengono presentati singolarmente ad una scala più particolareggiata.



*Come sempre, e per tutti i diagrammi: in alto il segnale acustico e in basso l'emissione E-VLF, i tempi sono espressi in secondi e le intensità in %.*

Questo evento, probabilmente, corrisponde esattamente alla “rottura”. Il termine rottura però è probabilmente improprio. Forse l’evento parossistico andrebbe chiamato collasso o cedimento strutturale. Cos’è infatti la rottura? Studiando il fenomeno nella sua intera evoluzione ed osservandolo in una scala temporale al millesimo di secondo appare evidente infatti che è difficile determinare un singolo istante al quale attribuire un evento netto. La rottura è un processo lento e progressivo che si sviluppa probabilmente attraverso la dilatanza fino al totale cedimento strutturale. Probabilmente meriterebbe una visione ingegneristica più che fisica o geologica, poiché l’evento parossistico, non netto, è probabilmente relazionato ad un crack teorico a meno di molteplici fattori macro e micro strutturali, che condizioneranno anche i tempi e le modalità della rottura. Nonostante le già citate tipologie di rottura, non esistono infatti due campioni rotti che mostrino identiche caratteristiche strutturali, come non esistevano in origine due campioni realmente identici, se non nella forma e nella classificazione litologica.

## **SEQUENZA PAROSSISTICA**

La sequenza parossistica presenta la massima intensità di emissione e dalla massima concentrazione di impulsi. Questi sono infatti talmente ravvicinati da non consentire neppure un’analisi spettrale adeguata.<sup>56</sup> Confrontando diversi tipi di roccia (fig.59a,b,c,d) possiamo osservare che questa manifestazione non presenta una significativa variabilità ma piuttosto può ricordare la successione e talvolta la fusione

---

<sup>56</sup> Un’alta risoluzione spettrale richiede l’analisi di un intervallo di tempo relativamente lungo. La brevità degli impulsi e la loro scarsissima separazione non consente un’analisi non condizionata dall’interferenza degli impulsi adiacenti (cfr cap. 2.3.4). Come si vedrà tra breve, ogni impulso presenta fondamentalmente la medesima forma d’onda ma su intervalli, e dunque frequenze, del tutto proprie.

degli eventi di tipo “C” e “D” osservati nel caso delle esplosioni in cava. Apparentemente non esiste una precisa impronta spettrale o temporale in grado di contraddistinguere il materiale. Le differenze più evidenti sono in realtà condizionate dalla “qualità” della rottura<sup>57</sup>.

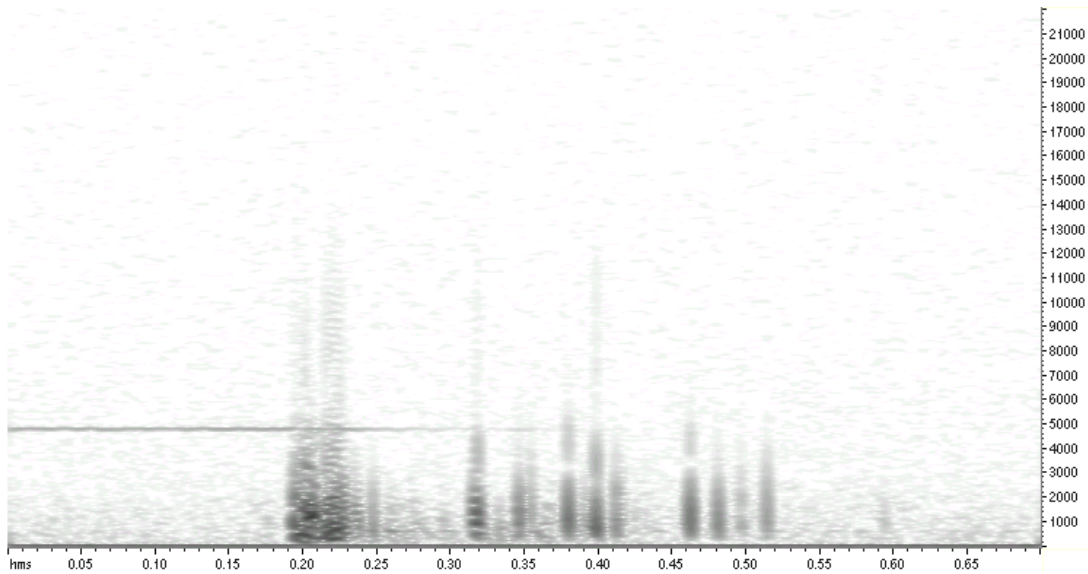


Fig.59a - Sequenza parossistica nel Calcarea a rudista CR\_C11\_1. Tempi in sec, frequenze in Hz.

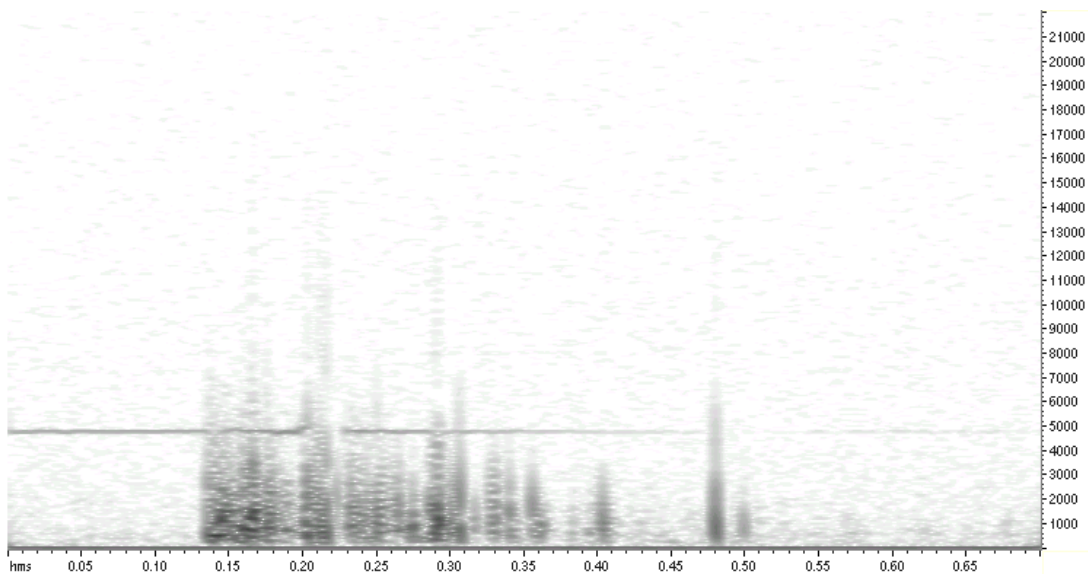
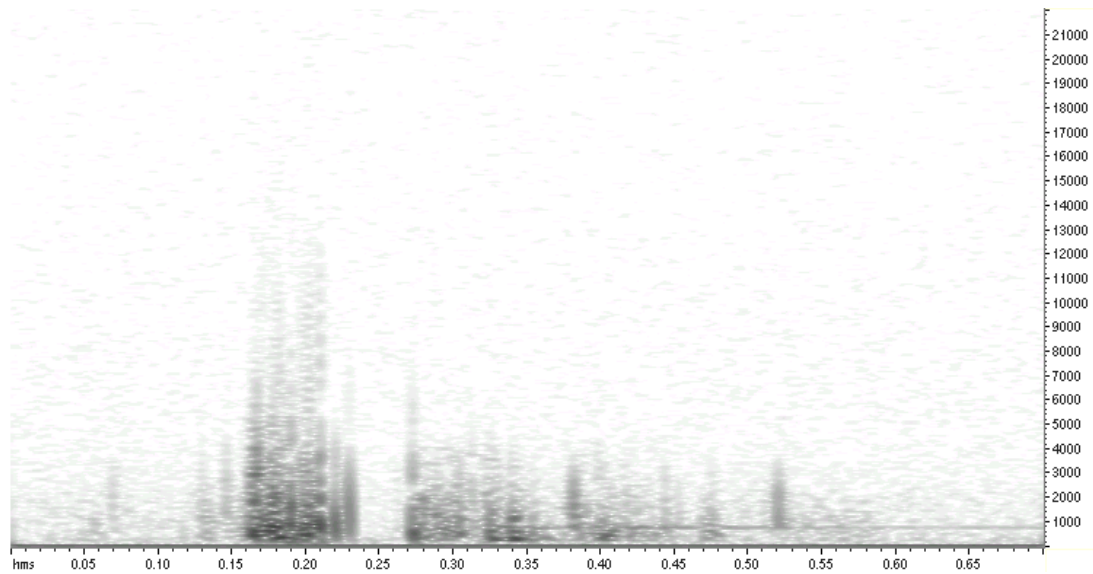


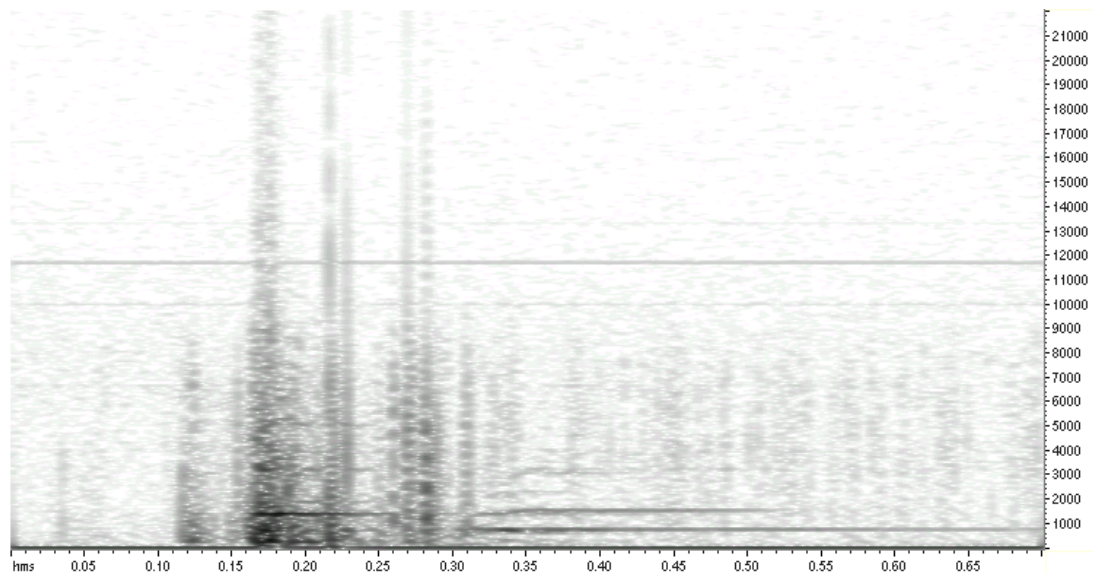
Fig.59b - Sequenza parossistica nel Calcarea a rudista CR\_C14\_4. Tempi in sec, frequenze in Hz.

---

<sup>57</sup> Parliamo dell'incidente alla pressa che ha condizionato gran parte dei campioni della seconda serie



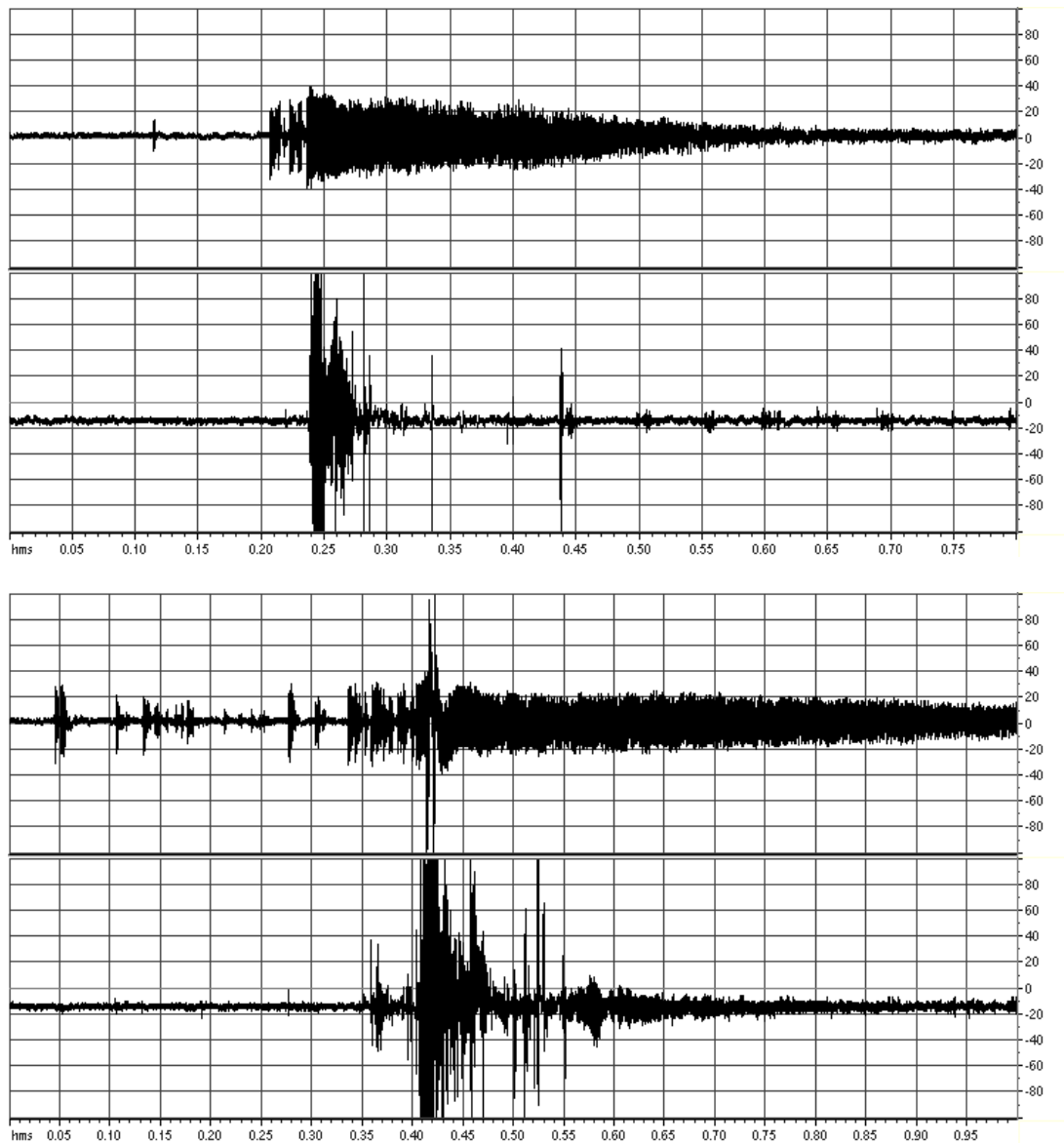
*Fig.59c - Sequenza parossistica nel Porfido FS2\_A-Ca. Tempi in sec, frequenze in Hz.*



*Fig.59d - Sequenza parossistica nel Porfido FS2\_2\_ME. Tempi in sec, frequenze in Hz.*

Come si era già anticipato, anche in questo caso il segnale radiosismico è concomitante e non coincidente al segnale acustico ma tuttavia esiste un'unica sistematica relazione dovuta alla relativa sincronia dei picchi di massima intensità. In corrispondenza di essi, nell'arco di 0,01 secondi, posizioniamo dunque l'istante formale della "rottura". I grafici delle figure 60 hanno mostrato il crack radiosismico rapportato al segnale acustico. La corrispondenza dei picchi massimi è solo

apparente poiché una scala al millesimo di secondo mostra in realtà un ordine di arrivo casuale.



*Fig.60 - Sequenze parossistiche nei porfidi FS2\_1 (A) e FS\_2 (B). Gli accoppiamenti di segnale acustico (in alto) e radiosismico (in basso) mostrano la concomitanza tra i picchi massimi. Tempi in secondi e intensità in %.*

## SEGNALI POSTUMI

Anche in laboratorio si sono spesso osservati segnali posteriori alla rottura. Tra questi riconosciamo due tipi di manifestazioni che abbiamo indicato come “Post1” e “Post2”, generalmente più tenui delle altre. Il primo (fig.61) riguarda serie di segnali

di ampiezza e distribuzione tendenzialmente omogenea che rimangono comunque entro la scia del parossismo acustico. La permanenza del segnale acustico è spesso dovuta all'oscillazione tipo "gong" di superfici metalliche colpite dalle schegge dell'esplosione. Queste emissioni si manifestano sullo spettrogramma come una scia orizzontale, ovvero come la permanenza dell'emissione su una o più frequenze determinate. La controparte radiosismica invece è da essa indipendente e si manifesta come una raffica di impulsi forse associata al collasso del materiale.

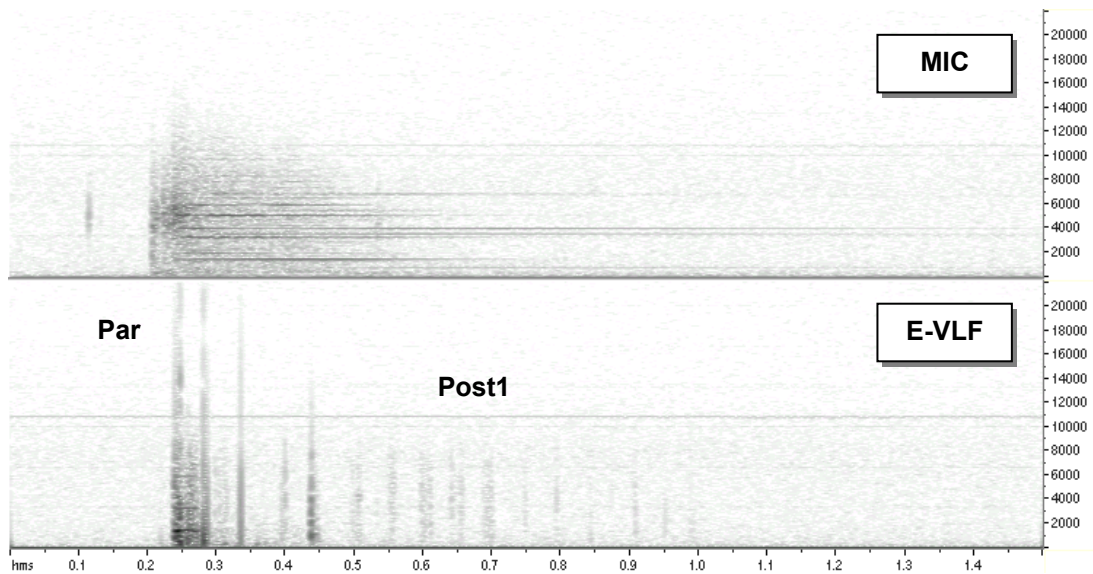
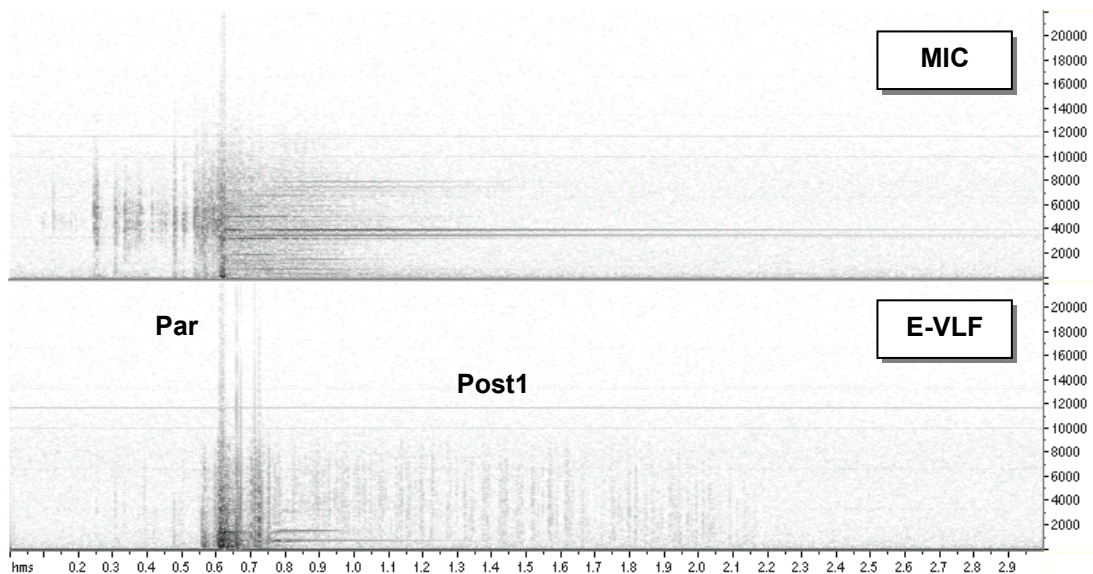


Fig.61 - Sequenza delle emissioni postume nel Porfido FS2\_1 (in alto) e FS2\_2 (in basso). Sono ben visibili le famiglie di segnali "Post1", omogenei per intensità ed estensione spettrale. I tempi sono in secondi, le frequenze in Hz e le intensità nella scala dei grigi.





Il secondo tipo di emissione è più tardivo (fig.62) e si manifesta raramente, probabilmente solo dopo lo scarico della pressa. Si potrebbe quindi attribuire al rilassamento dei frammenti più voluminosi. Queste emissioni presentano uno sviluppo di intensità inverso a quello tipico della sequenza parossistica.

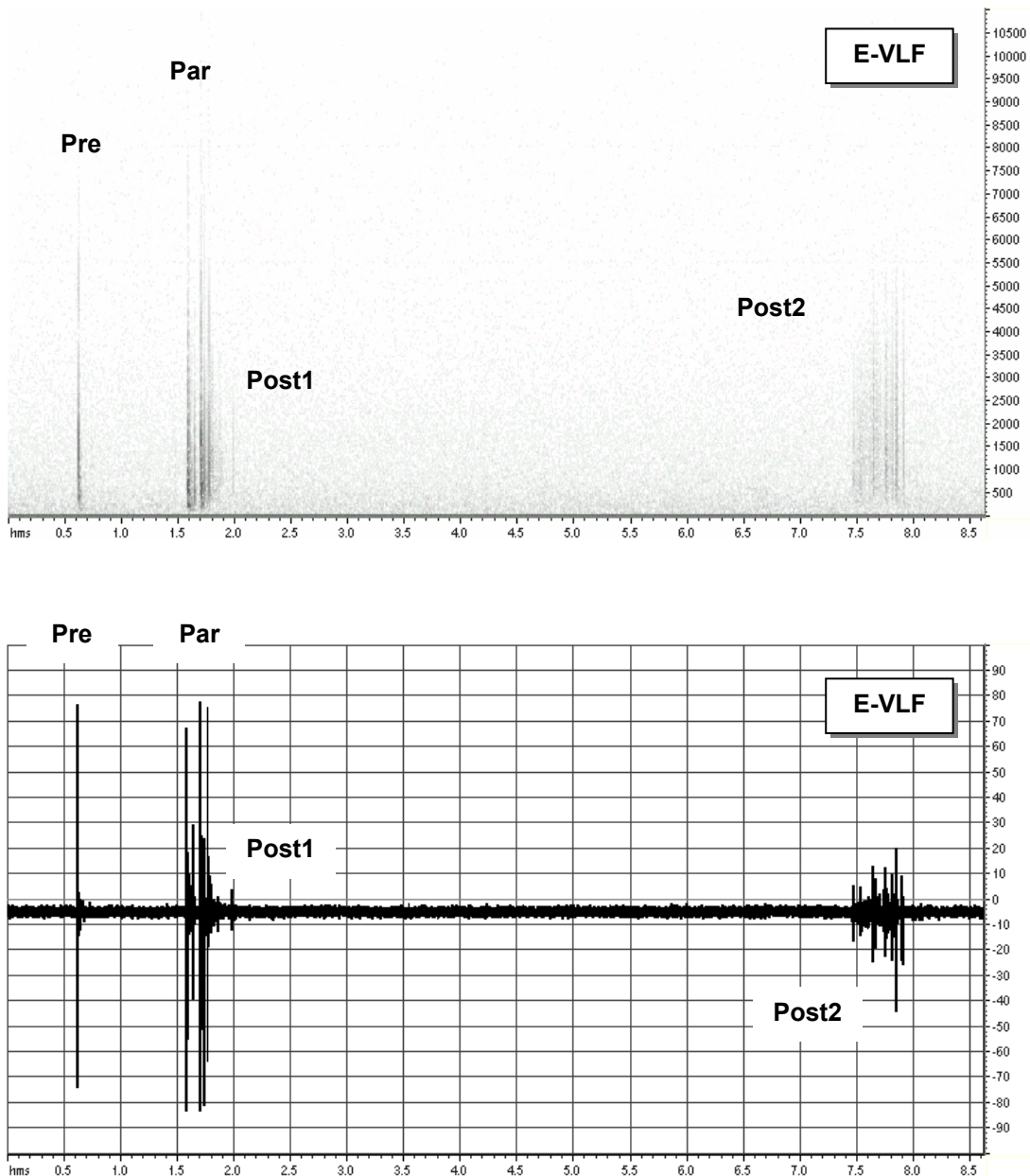


Fig.62 - Sequenza delle emissioni postume nel Porfido FS2\_A\_Cb: in alto lo spettrogramma e in basso l'oscillogramma dei segnali. Sono visibili entrambi i tipi di emissioni successive al fenomeno parossistico. I tempi sono in secondi, le frequenze in Hz e le intensità in %.



La sequenza postuma “Post1” sembrerebbe in realtà una lunga sequenza abbastanza uniforme che inizia poco prima della rottura e attraversa l’episodio parossistico per terminare più tardivamente. Lo si può notare osservando molti dei tracciati precedenti. Probabilmente l’unica emissione realmente indipendente dalla rottura è la “Post2”.

### **RENDIMENTO DELLA FENOMENO RADIOSISMICO**

In tutti i precedenti esempi si è dovuto specificare che il confronto tra materiali diversi era anche condizionato dalla qualità diversa della rottura, dovuta non soltanto alla natura del materiale ma anche al malfunzionamento della pressa che non ha agito in modo regolare e standard. Nei grafici che seguono (fig.63 e 64) sono messi a confronto tutti i canali radio per due materiali nettamente differenti.

Si può constatare dunque come materiali diversi reagiscano con diversa intensità e come, nello stesso materiale, l’intensità del segnale radiosismico diminuisce all’aumentare della frequenza. In particolare va notato che la *scaglia variegata* è naturalmente più fragile del *porfido* e pure il suo rendimento si è rivelato genericamente più basso, come se avesse subito un minor numero di microfratture. Al contrario il *porfido* è stato il litotipo più reattivo. Questo effetto è conforme a risultati sperimentali degli anni ’60 (Mogi)<sup>58</sup> che dimostrarono una maggiore incidenza di microscosse nei campioni strutturalmente più disomogenei. Nell’ambito della variabilità litologica dei nostri campioni infatti la *scaglia* rappresentava proprio il materiale strutturalmente più omogeneo mentre il *porfido* era il più eterogeneo.

---

<sup>58</sup> Rikitake, pag.207

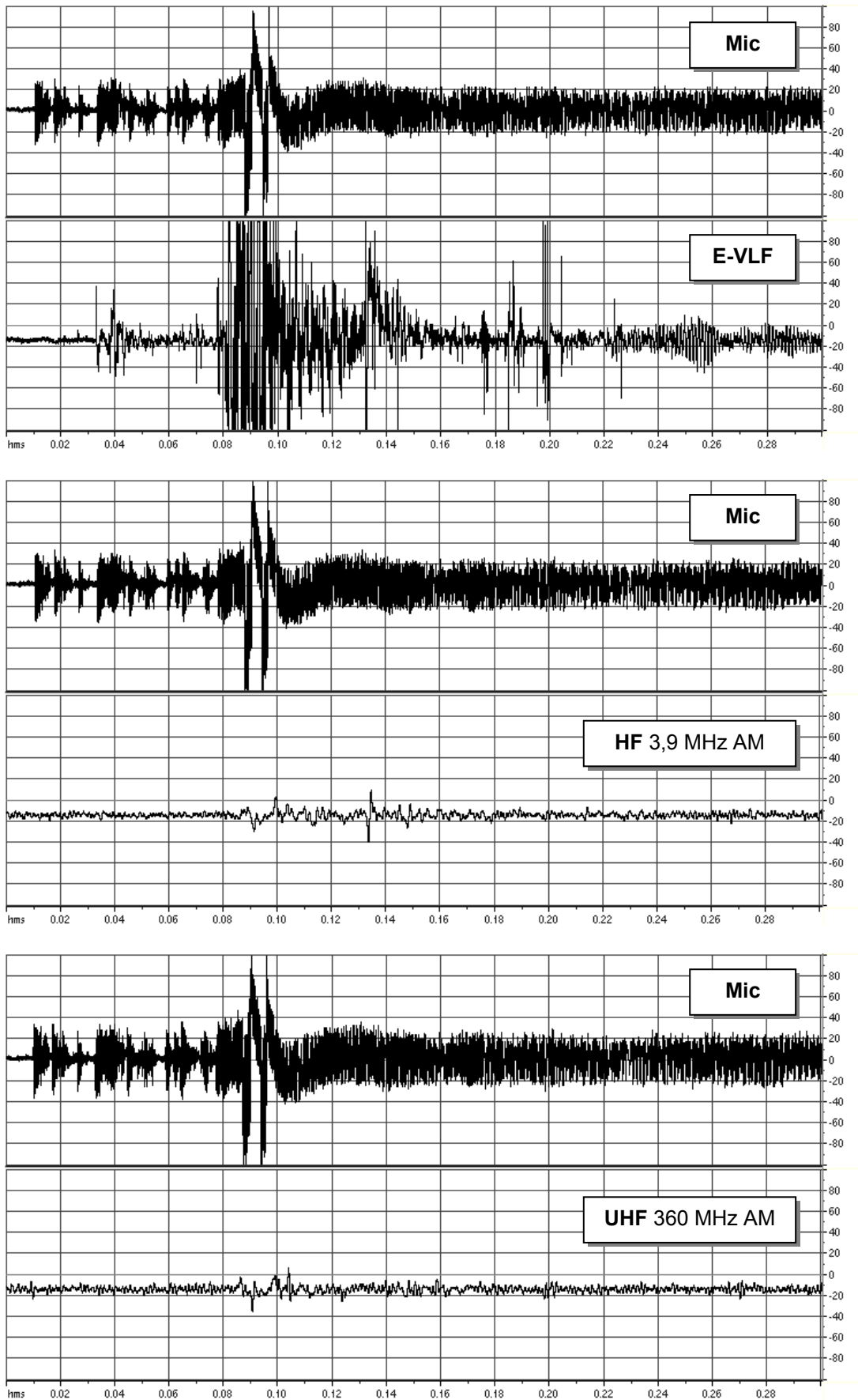


Fig.63 - Confronto tra segnale acustico (in alto) e segnale radio (in basso) nel campione di Porfido "FS2\_2". L'analogia tra le fasi dei segnali HF e VHF è legata alla modulazione di ampiezza. I tempi sono in secondi e le intensità in %.

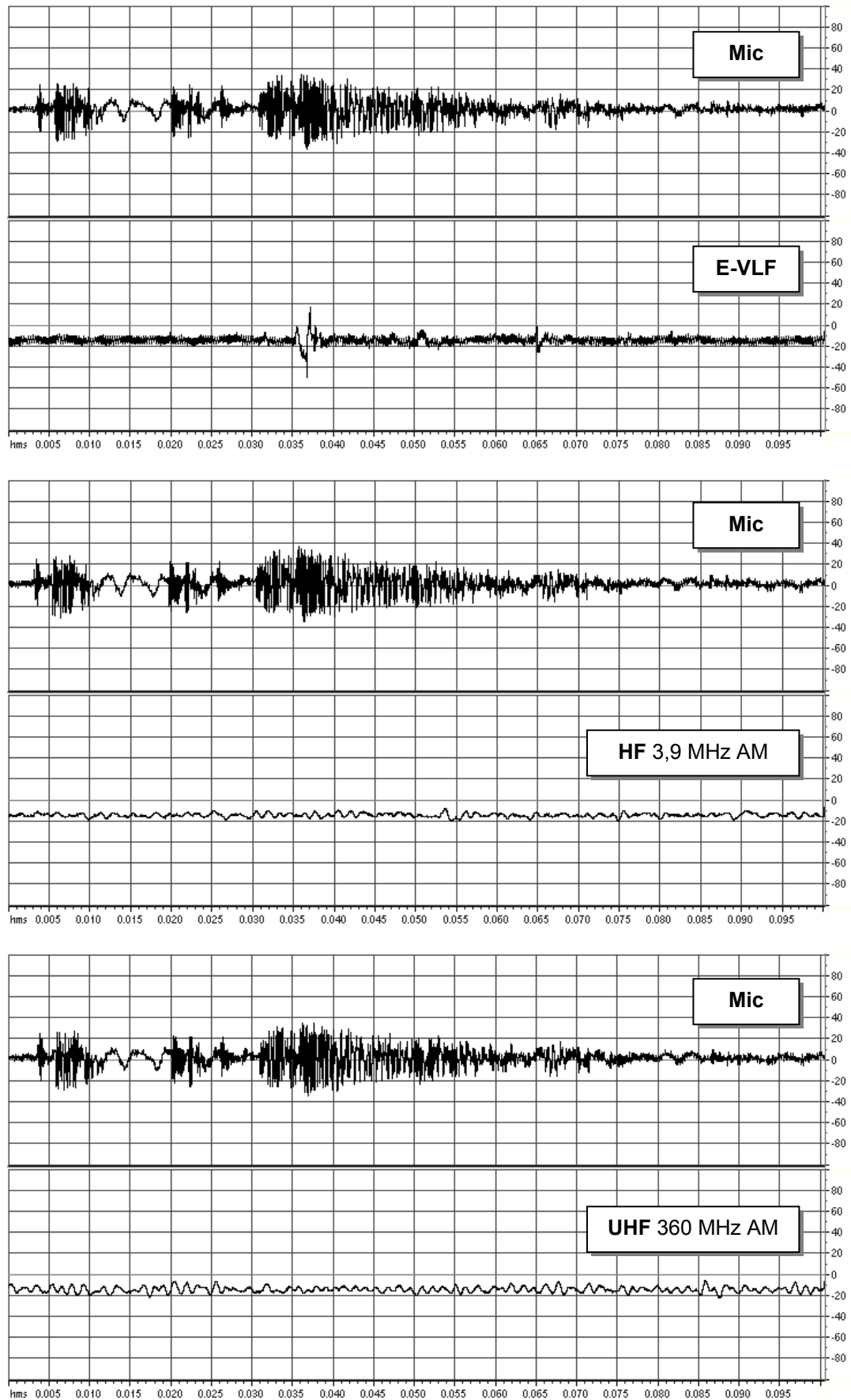


Fig.64 - Confronto tra segnale acustico (in alto) e segnale radio (in basso) nel campione di Scaglia Variegata "FS2\_16". Il rendimento del fenomeno è notevolmente più basso e il segnale UHF manca del tutto. Tempi in secondi e intensità in %.



## 4 - OSSERVAZIONI GENERALI

### 4.1 - DISTRIBUZIONE SPETTRALE E FORMA D'ONDA

Le emissioni radiosismiche registrate in banda E-VLF sono caratterizzate da successioni di impulsi. Tali successioni, come si è visto, presentano una distribuzione temporale caratteristica e legata al fenomeno di origine (esplosione e crollo o compressione uniassiale). Gli impulsi che compongono le sequenze, al contrario, hanno caratteristiche comuni e indipendenti dal fenomeno che li origina. In altre parole le sequenze osservate in cava e in laboratorio si differenziano tra loro per la particolare e caratteristica combinazione delle stesse tipologie di impulsi.

La forma d'onda degli impulsi presenta una certa variabilità ma tipicamente si può riconoscere in quella tracciata nella figura 65. E' composta da fasi di diversa ampiezza e frequenza e proprio le variazioni di questi parametri condizionano, naturalmente, la distribuzione spettrale.

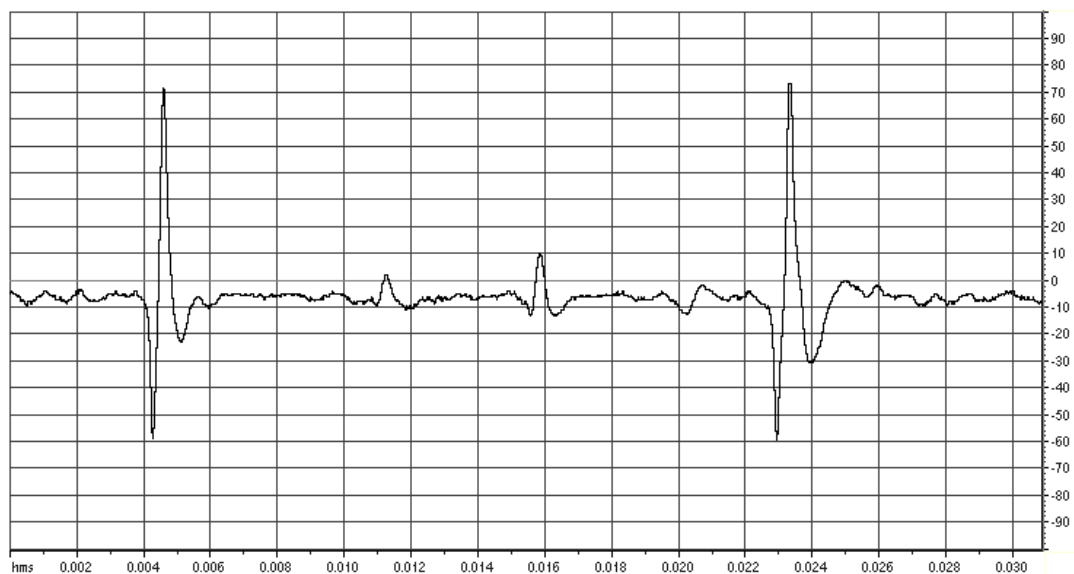


Fig.65 - Tipica forma d'onda degli impulsi in banda E-VLF.

Lo spettro dell'impulso E-VLF (osservato su un campionamento di 44100 Hz e una risoluzione di analisi di 81 Hz) presenta tipicamente la massima intensità sulle basse frequenze, tra 200 e 500 Hz e un'estensione con intensità decrescente che raggiunge dai 14000 Hz fino ad oltre 20000 Hz nei segnali più potenti. Queste caratteristiche sembrano comuni a tutti i tipi di roccia esaminati, con la sola variazione, uniforme, del livello di intensità.

Le figure che seguono (fig.66) mostrano gli spettri di due segnali precursori (colore blu) confrontati con i corrispondenti impulsi acustici (in rosso). E' evidente una differente distribuzione spettrale delle ampiezze che nel campo acustico hanno un massimo corrispondente a circa 5000 Hz.

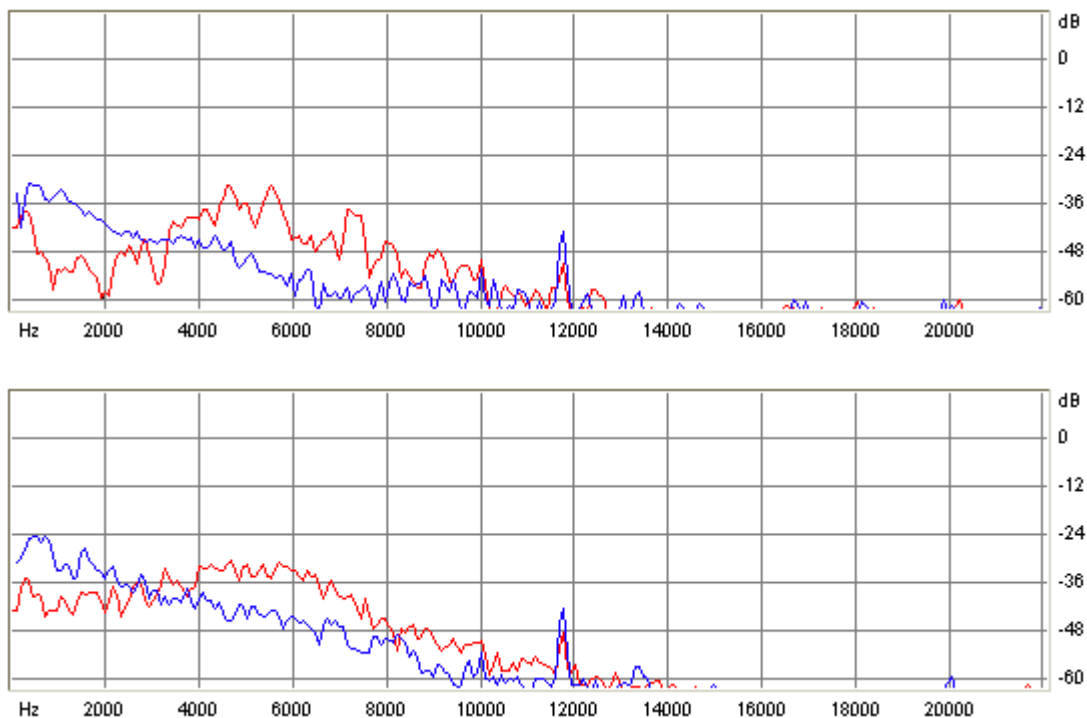
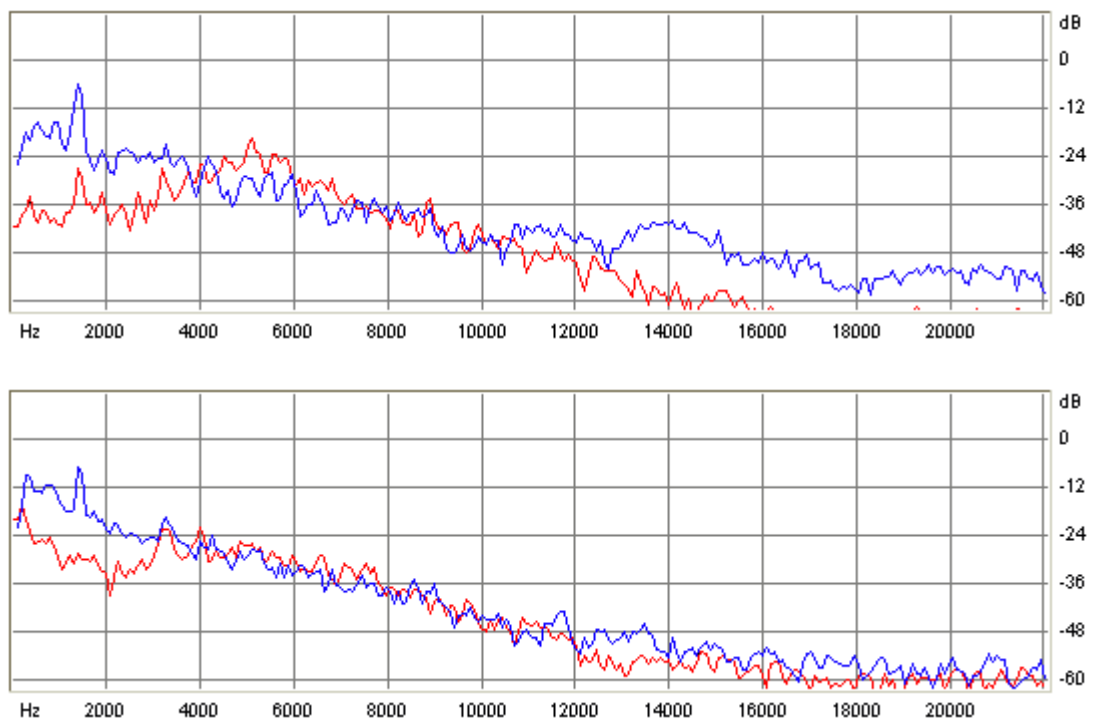


Fig.66 - Spettri della coppia di canali E-VLF (blu) e acustico (rosso). I diagrammi sono riferiti a due segnali precursori dello stesso evento compressivo. Si tratta del porfido FS2\_2\_ME, già illustrato nella fig.58 e in particolare dei segnali ivi marcati come 1 (in alto) e 4 (in basso). I picchi poco al di sotto dei 12 kHz sono dovuti ad un disturbo strumentale (la riga orizzontale osservabile in molti spettrogrammi).

Un'interessante peculiarità si può notare nei picchi massimi della sequenza parossistica. Questi, oltre a presentare la già descritta concomitanza temporale, mostrano anche analogie nello spettro di frequenza. Tra il segnale acustico e quello radio (sempre in banda E-VLF) questa volta coincidono molti picchi di emissione e in particolare si può notare un picco caratteristico nel segnale radio (circa 1350 Hz) che talvolta è anch'esso replicato nel campo acustico (fig.67). Ancora una volta dunque le uniche corrispondenze dirette tra segnale acustico e radiosismico si possono riscontrare soltanto nei picchi di massima intensità della sequenza parossistica, che poi sono anche quelli di massima estensione spettrale.



*Fig.67 - Spettri dei picchi di massima intensità di un'emissione parossistica. Per ciascuna coppia il canali E-VLF è tracciato in blu e l'acustico in rosso. In alto la rottura del porfido FS2\_1 e in basso il porfido FS2\_2. Notare in entrambi i casi un picco caratteristico dell'emissione radiosismica sulla frequenza di circa 1350 Hz e la concomitanza di numerosi picchi tra segnale acustico e radio.*

Per quanto riguarda i segnali postumi si può inoltre notare un'ulteriore differenziazione spettrale, caratterizzata da una distribuzione delle intensità spiccatamente più uniforme. In questo caso la controparte acustica sembra anch'essa

tendenzialmente più uniforme ma è influenzata dalla risonanza delle componenti metalliche della pressa colpite dalle schegge. Questi colpi causano forti emissioni persistenti su determinate frequenze, che avevamo già osservato nei precedenti spettrogrammi come striature orizzontali e che qui si manifestano nei loro picchi caratteristici.

Le figure seguenti (68) mostrano due casi che possono essere confrontati con le precedenti figure 66 e 67.

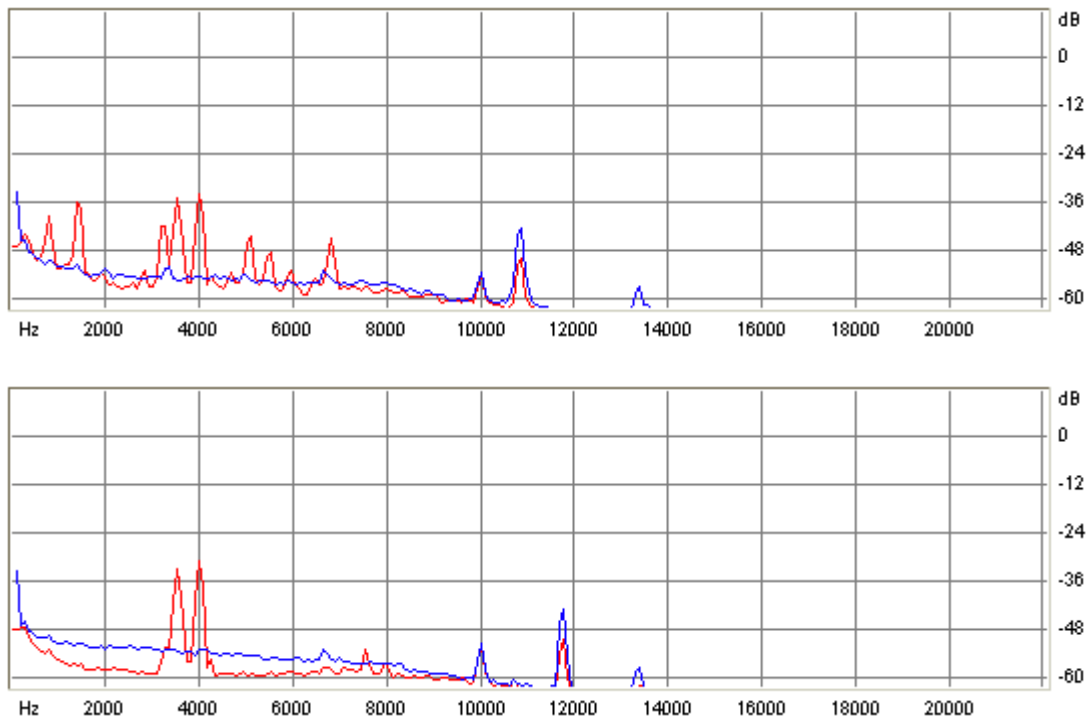
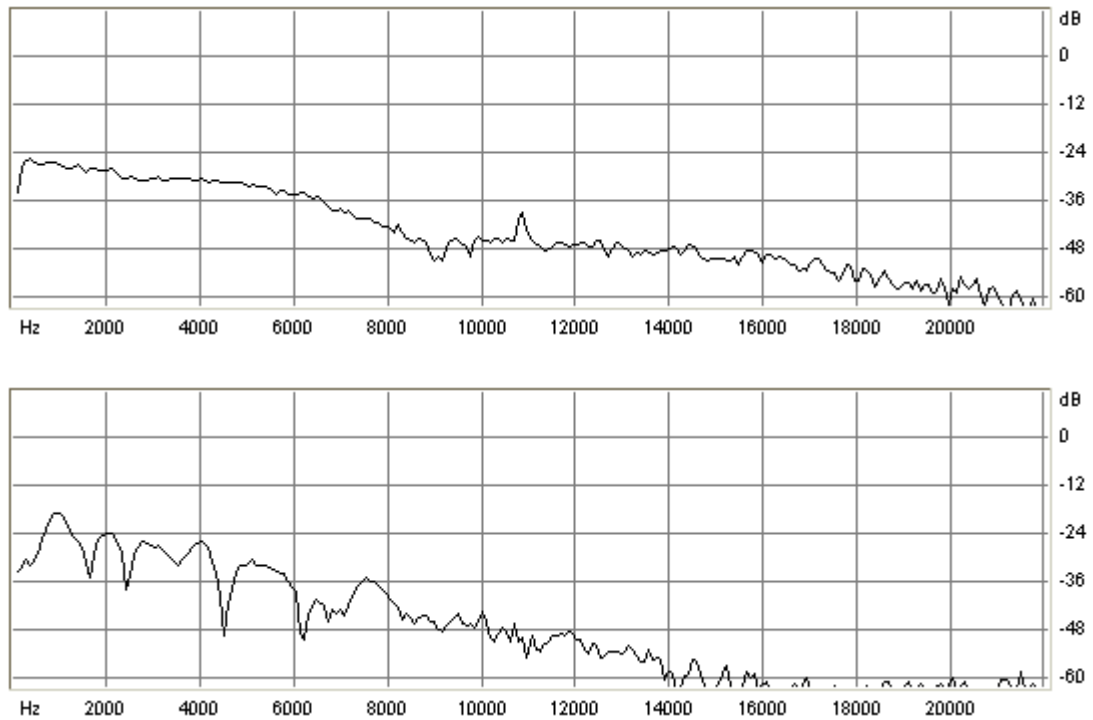


Fig.68 - Media degli spettri di emissioni postume. Per ciascuna coppia il canali E-VLF è tracciato in blu e l'acustico in rosso. In alto gli episodi postumi del porfido FS2\_1 e in basso il porfido FS2\_2. Notare in entrambi i casi il basso angolo di attenuazione del segnale radio. I picchi omologhi intorno ai 12 kHz sono interferenze strumentali.

A parte queste differenze tra le famiglie di impulsi, le successioni registrate nell'ambito delle due differenti sperimentazioni (in cava e in laboratorio) hanno mostrato sostanzialmente gli stessi tipi di impulsi, associati in modo diverso. Lo spettro tipico può essere continuo o discontinuo, ovvero mostrare variazioni ritmiche

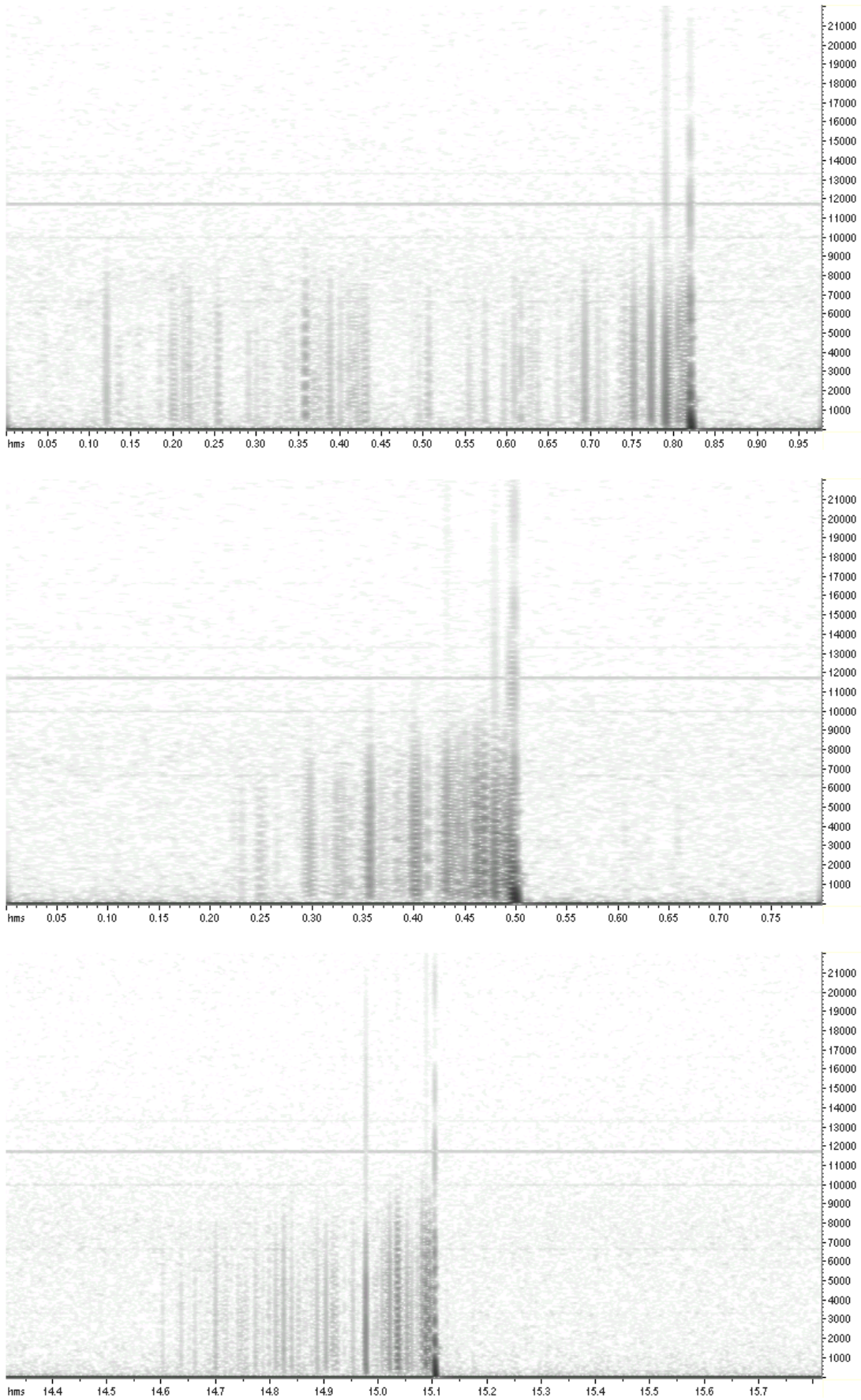


di intensità simili ad uno spettro di armoniche (fig.69). Solitamente però soltanto la parte bassa dello spettro mostra una regolare ritmicità, la quale può corrispondere ad un'ampia gamma di frequenze fondamentali comprese tra le centinaia di Hz a qualche kHz.



*Fig.69 - Esempio generico di spettro continuo (in alto) e spettro discontinuo (in basso). Il picco prossimo ai 1100 Hz è un'emissione continua causata dall'attività di apparecchiature elettroniche.*

Per concludere questa breve descrizione proponiamo un interessante confronto tra le sequenze radiosismiche e le emissioni prodotte da scintille elettriche registrate durante le prove tecniche. Per testare tutta la strumentazione senza dover rompere campioni si è infatti impiegato un generatore di scintille derivato dalla modifica di un accendino piezoelettrico di quelli diffusamente usati per i fornelli a gas (cfr. p.140, fig.51). Il meccanismo dell'accendino è stato utilizzato per far scoccare una scintilla tra due armature convesse la cui distanza era regolabile da 0 a 3 mm. In questo modo si potevano ottenere scintille sempre della medesima lunghezza.



*Fig.70 - Spettrogrammi di emissioni di tipo "radiosismico" ottenute artificialmente con piccole scintille elettriche prodotte da un accendino piezoelettrico per fornelli a gas opportunamente modificato. Tempi in secondi, frequenze in Hz, intensità in toni di grigio.*

Negli spettrogrammi della figura 70 si può vedere come le emissioni EM così ottenute sono sorprendentemente simili ai segnali radiosismici. E' importante sottolineare che mentre la lunghezza era fissata a circa 2 mm, la successione temporale delle scintille variava in funzione della pressione. Una rapida ed energica pressione sulla leva causava una scintilla visibile corrispondente ad un segnale netto e forte. La lenta pressione della leva invece causa una scarica di segnali deboli e senza scintilla visibile che culmina nella sequenza più marcata, associata a scintille.

## **4.2 - SEQUENZE TIPO**

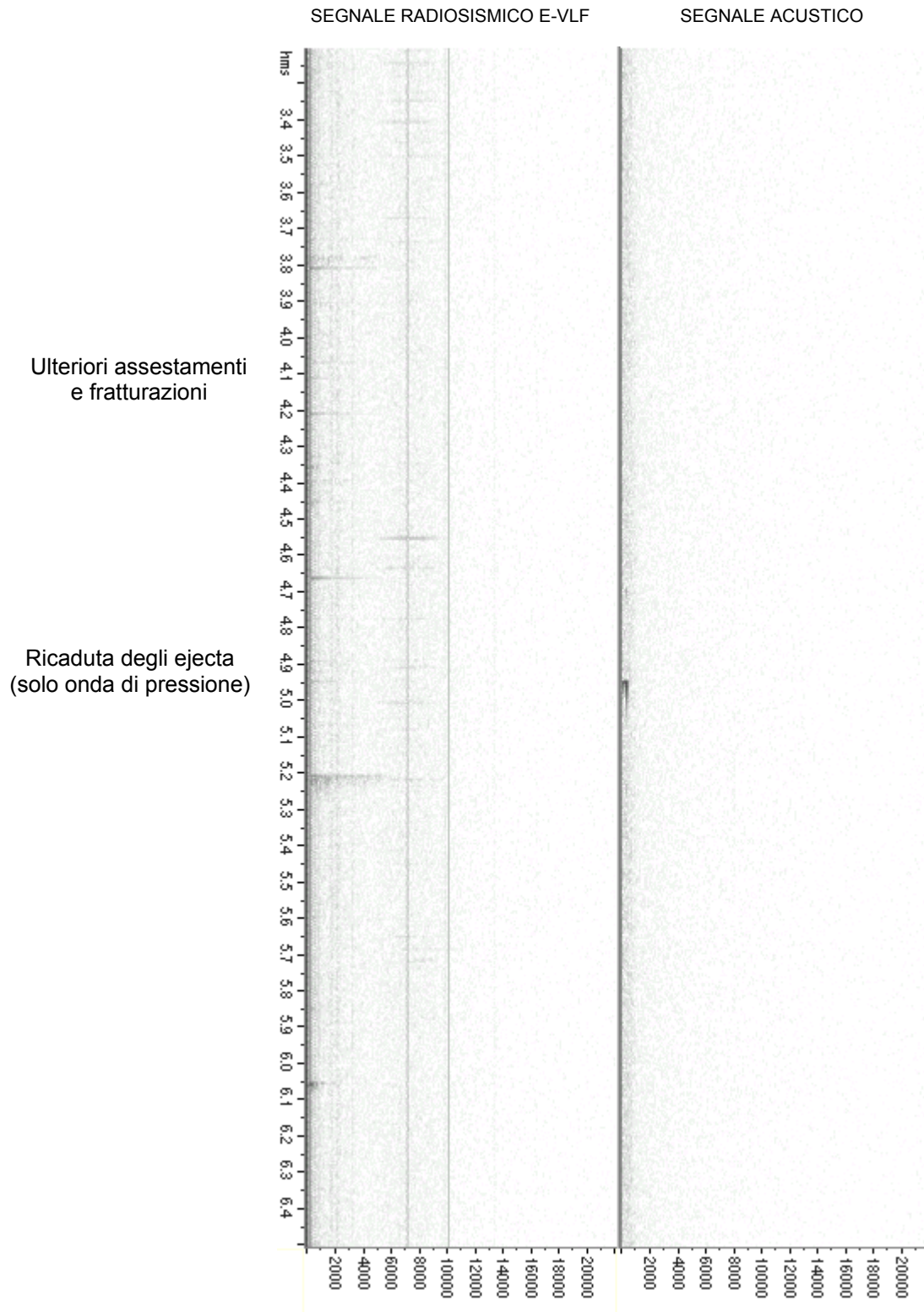
In questo paragrafo di riepilogo vengono presentate estesamente due sequenze tipo di segnali radiosismici allo scopo di evidenziarne le caratteristiche peculiari e le analogie.

La prima sequenza riguarda la registrazione "UC2\_8\_GP" effettuata nella cava di Guidonia, dove l'emissione radiosismica in banda E-VLF è confrontato con l'onda di pressione. La seconda è la rottura del porfido "FS2\_2\_ME" e l'emissione radiosismica in banda E-VLF è confrontata con l'onda acustica emessa dal campione. Naturalmente nel primo caso si osserva tutto il fenomeno mentre nel secondo è visibile soltanto un intervallo di tempo intorno alla rottura.

A fianco agli spettrogrammi sono indicate le presunte cause delle emissioni

# SEQUENZA TIPO DEI TEST CON L'ESPLOSIVO

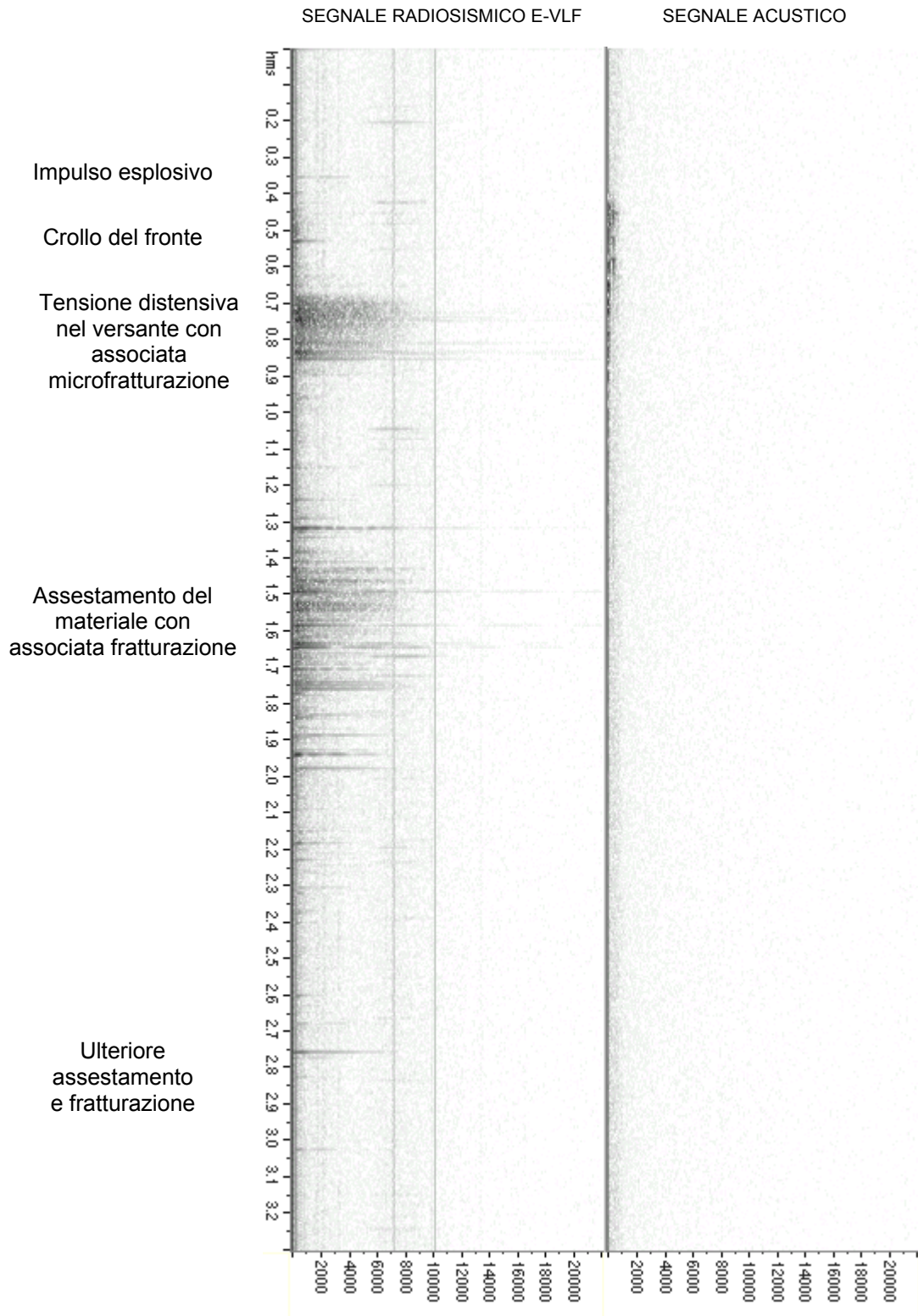
Registrazione UC2\_8\_GP - seconda parte



*Tempi in secondi e frequenze in Hz*

# SEQUENZA TIPO DEI TEST CON L'ESPLOSIVO

Registrazione UC2\_8\_GP - prima parte

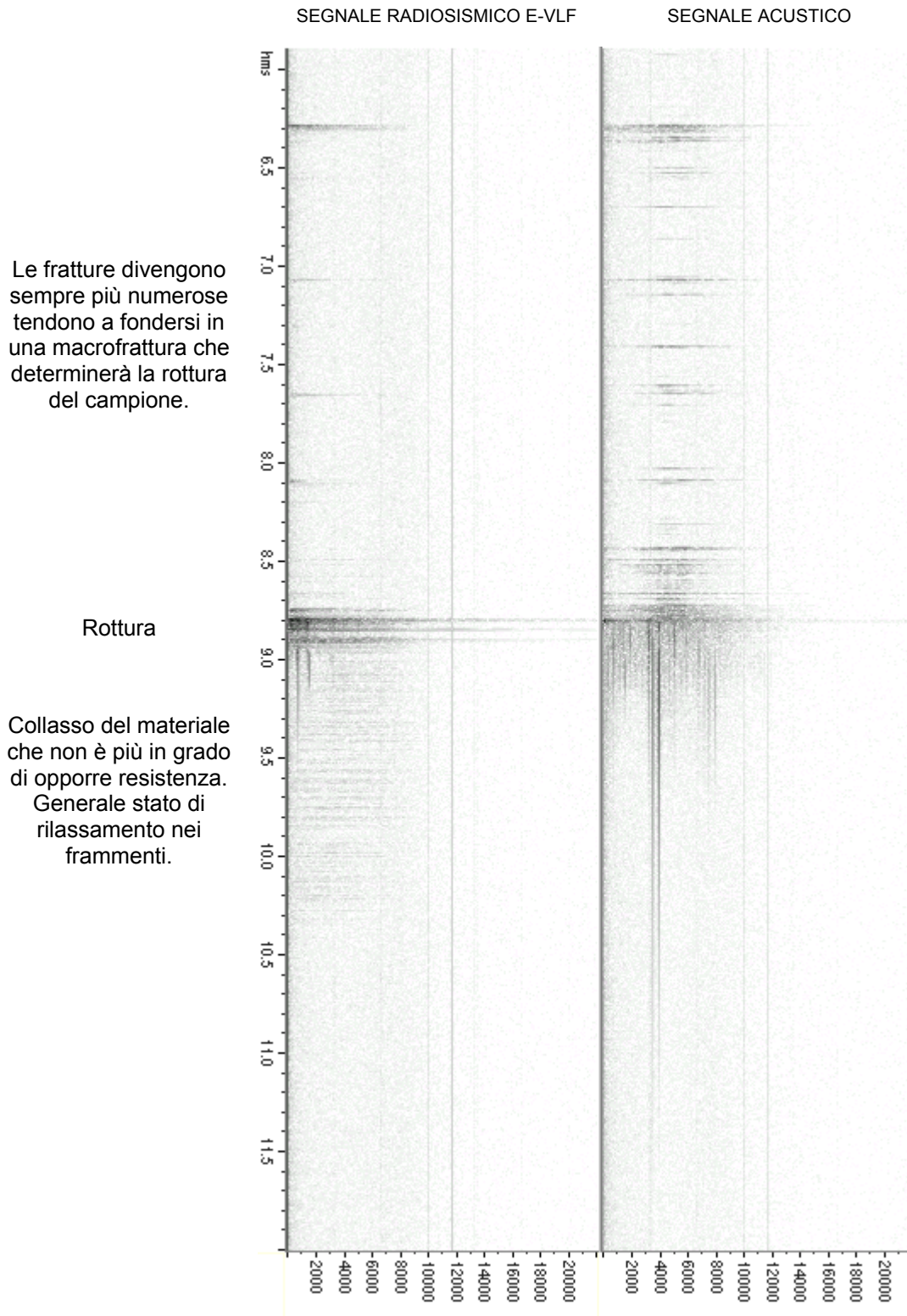


*Tempi in secondi e frequenze in Hz*



# SEQUENZA TIPO DEI TEST DI COMPRESIONE UNIASSIALE

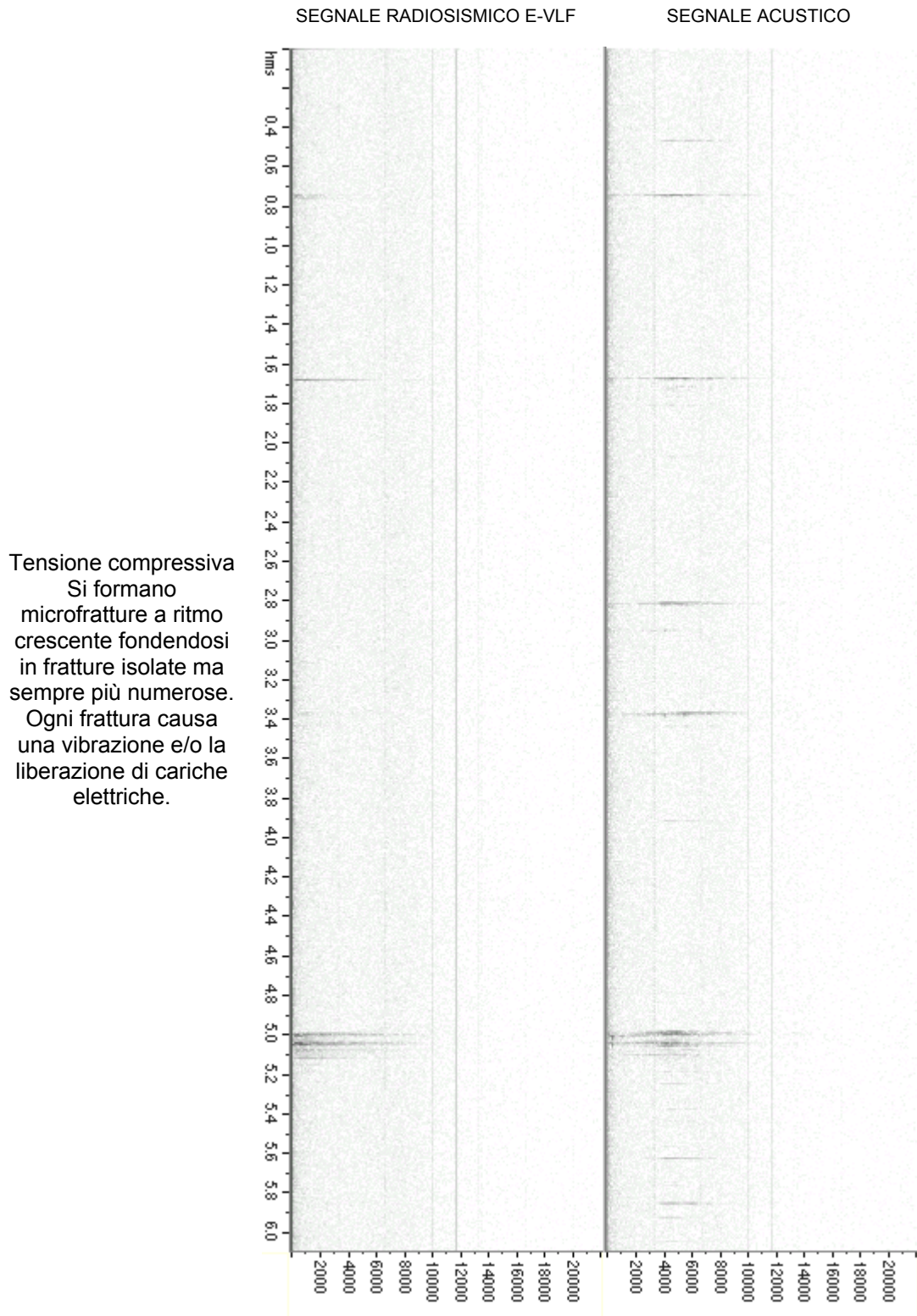
Registrazione FS2\_2\_ME - seconda parte



*Tempi in secondi e frequenze in Hz*

# SEQUENZA TIPO DEI TEST DI COMPRESSIONE UNIASSIALE

## Registrazione FS2\_2\_ME - prima parte



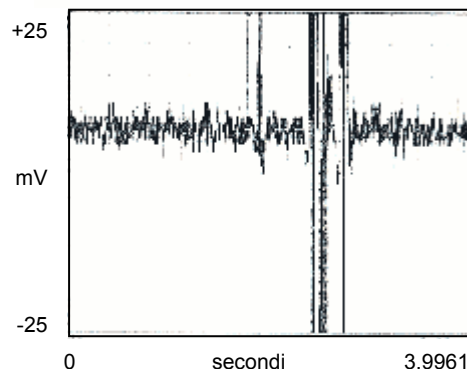
Tensione compressiva  
Si formano  
microfratture a ritmo  
crescente fondendosi  
in fratture isolate ma  
sempre più numerose.  
Ogni frattura causa  
una vibrazione e/o la  
liberazione di cariche  
elettriche.

*Tempi in secondi e frequenze in Hz*

### 4.3 - RELAZIONE CON L'ESPERIMENTO DI MOGNASCHI

Le registrazioni nelle bande radio HF e UHF avevano lo scopo di verificare l'estensione dell'emissione radiosismica alle bande radio e quindi giustificare le numerose e storiche testimonianze dei radioamatori. Come si è visto il segnale più intenso corrisponde all'evento della rottura e in generale l'intensità dell'emissione diminuisce progressivamente con l'aumentare della frequenza fino a perdersi nel rumore di fondo. Questo è un accordo con i risultati ottenuti dal prof. Mognaschi<sup>59</sup> nella banda MF (cfr. par.1.5, pag.41) dove erano ben evidenti segnali concomitanti alla rottura e spesso ma non sistematicamente si sono osservati segnali precursori. La figura che segue mostra l'oscillogramma di un'emissione registrata da Mognaschi su 500 kHz a seguito della rottura di un Gneiss della val d'Ossola.

*Evoluzione temporale del segnale a 500 kHz emesso alla rottura da un campione di Gneiss della val d'Ossola (adattato da Radioonde n.12). Esperimento condotto da E. Mognaschi (1998) con campioni cubici di 10 cm di lato, compressione uniassiale, ricevitore radio Sony KF-210D e antenna ferromagnetica alla distanza di 2 cm dai campioni.*



La sequenza non è complessa come quelle rilevabili in banda E-VLF ma risulta più evidente che nelle nostre registrazioni in HF. Nell'arco di circa un secondo si succedono un forte precursore e l'emissione parossistica. Nel nostro caso non si è potuta monitorare la frequenza di 500 kHz a causa delle forti interferenze che nel Lazio produce la stazione di Radio Vaticana (525 kHz) e inoltre l'antenna

<sup>59</sup> "Detection of electromagnetic emission from fracture of rocks and building stones under stress" – Ezio R. Mognaschi, Ugo Zezza – D.F. "A.Volta", Univ. di Pavia.



ferromagnetica da noi utilizzata per monitorare la frequenza più prossima a quella di Mognaschi (3.9 MHz, Onde Corte) per motivi di sicurezza era piuttosto distante dal campione.

Un precedente studio del prof. Mognaschi<sup>60</sup> prevedeva una regolare deriva in frequenza dell'emissione radiosismica. I calcoli si basavano sulle osservazioni di un radioamatore (Marco Eleuteri, IK0VSV) che con due giorni di anticipo sul sisma del 12.05.97 (Italia centrale) aveva ascoltato un “rumore” radio in Onde Lunghe e lo aveva seguito in una curiosa migrazione attraverso bande sempre più alte fino alla VHF (più precisamente sui 150 MHz).

Dai confronti tra le nostre registrazioni su diverse bande radio (fig.63,64 pp.161,162) ci si sarebbe dunque aspettato di notare un ritardo proporzionale alla frequenza delle emissioni radiosismiche. In realtà i rapporti di precedenza appaiono come sempre casuali. Nel nostro caso però non si tratta dei segnali premonitori ma dei picchi parossistici che, almeno in rapporto al segnale acustico, sono gli unici ad essere tendenzialmente coincidenti. I nostri segnali premonitori purtroppo non sono confrontabili poiché, a causa della loro bassa intensità, sono ben visibili in banda radioacustica (E-VLF) ma piuttosto confusi e incerti in quelle radiofoniche. La causa di ciò, ancora una volta, sono gli inconvenienti occorsi nella seconda serie di prove, ovvero le interferenze industriali ed il malfunzionamento della pressa. Sarebbe davvero interessante ripetere altre prove multicanale su bande diverse, questa volta in condizioni di emissione ideale e di minimo QRM.<sup>61</sup>

---

<sup>60</sup> Segnali radio che precedono eventi sismici – E. R. Mognaschi – Radioonde n°8, ott. 1997

<sup>61</sup> Rumore radio di fondo.

#### 4.4 - CONFERME DIRETTE

Tutti i risultati studiati nell'ambito di questa tesi provengono da simulazioni: esplosioni, rottura per compressione e scintille elettriche generate artificialmente.

E' stato premesso però che prima di iniziare questo lavoro lo stesso *radiogeofono* era stato lungamente utilizzato per studiare a livello amatoriale le emissioni naturali in banda radioacustica e che si erano già rilevati segnali precursori e cosismici associati allo sciame che ha interessato l'Umbria e le Marche nel 1997. Segnali presismici in banda E-VLF sono certamente rilevabili in natura.

A supporto delle evidenze di laboratorio presentiamo quindi qualche esempio registrato "dal vivo" da un radioamatore di Roma, anch'egli in cerca di segnali naturali a seguito di un'esperienza diretta (terremoto Friuli '76). Giuseppe Accardo (IW0BZD) utilizzando un ricevitore di campo magnetico E-VLF da lui costruito, ha potuto registrare alcuni segnali che si presentano abbastanza conformi al modello da noi proposto. Gli spettrogrammi che seguono (fig.71 e 72) hanno uno scopo dimostrativo ma evidenziano l'effettiva possibilità di registrare delle emissioni naturali e come queste presentino le medesime caratteristiche anche nella componente magnetica, essendo in realtà emissioni elettromagnetiche.

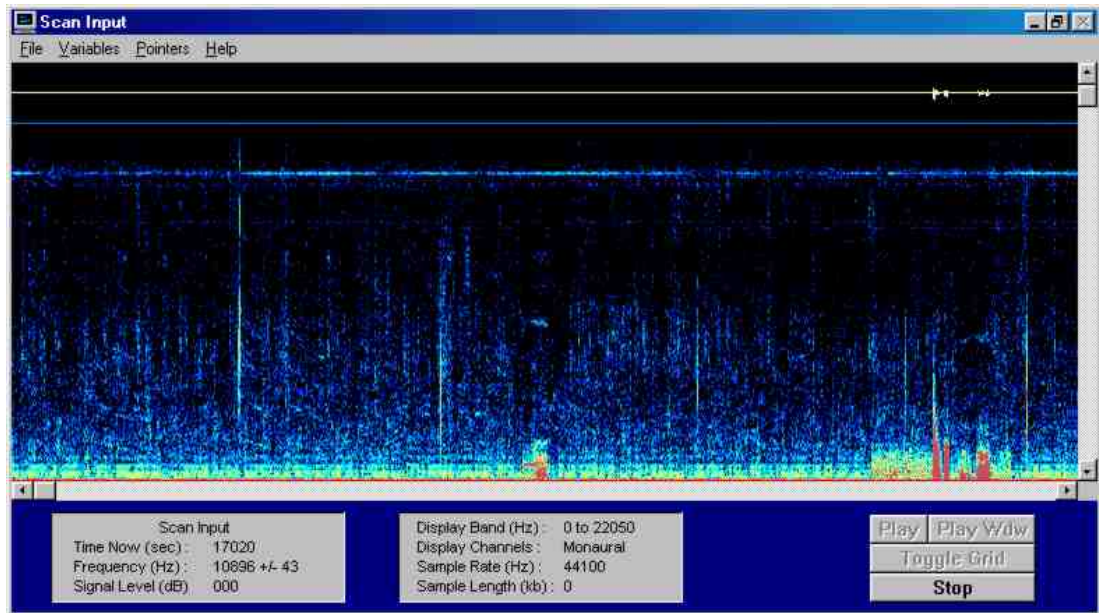


Fig.71 - Spettrogramma di una registrazione effettuata nella componente magnetica il 18.11.2000 alle 06:14 UTC (ora di fine registrazione) da Roma. La durata complessiva è di 283,6 minuti (circa 4,7 ore) e la scala delle frequenze (in verticale) va da 0 a 22050 Hz. Questo spettrogramma va letto allo stesso modo di quelli già presentati, con l'unica variante delle intensità espresse in tonalità di colore. Notare la presenza di segnali molto simili a quelli da noi rilevati in laboratorio, con una distribuzione spettrale più limitata che può essere la conseguenza della maggiore distanza della sorgente e una distribuzione temporale molto più larga che riflette un incremento di sforzo esternamente lento.

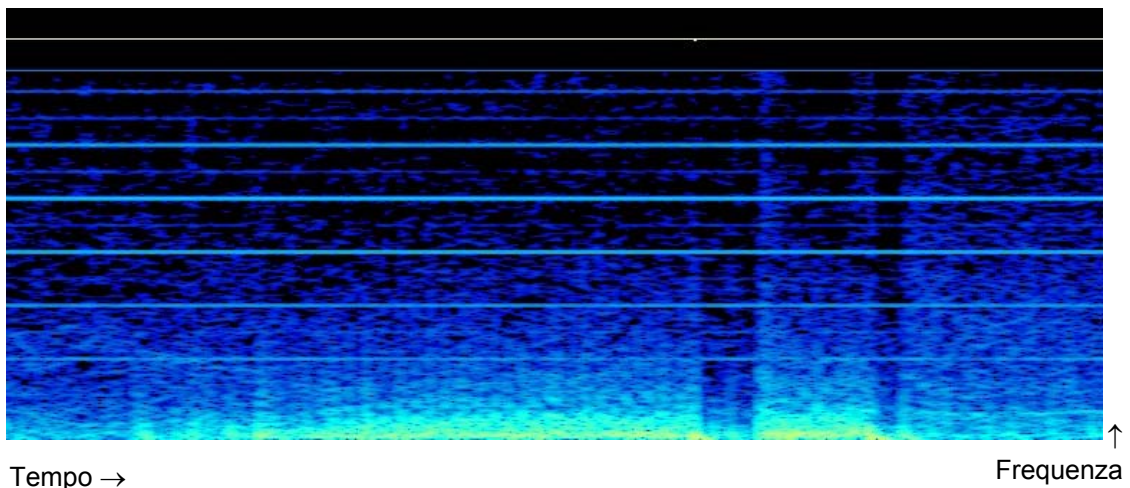


Fig.72 - Spettrogramma di una registrazione effettuata nella componente magnetica il 21.10.2000 alle 21:52 UTC da Roma. In questo caso mancano le scale ma lo spettrogramma va letto come gli altri. La durata del monitoraggio è di 689 secondi (11,5 minuti circa). Le linee orizzontali rappresentano il rumore industriale sui 50 Hz e le sue armoniche (quindi, in un certo senso, possono sostituire la scala delle frequenze). Si nota un'emissione a bassissima frequenza con caratteristiche simili agli "eventi particolare" S1 e S2 registrati a seguito dell'esplosione "UC2\_07". Anche in questo caso il segnale naturale è più diluito nel tempo ma mantiene le stesse caratteristiche di distribuzione temporale e spettrale. Notare infatti l'uniformità degli spettri e del ritmo e l'improvvisa netta interruzione che sono le caratteristiche peculiari di questo tipo di emissione.

La figura 73 mostra una sequenza tratta da una registrazione digitale di G. Accardo che è stata qui elaborata in modo analogo ai segnali presentati in questa tesi per evidenziarne la somiglianza. E' interessante notare come il fenomeno in natura potrebbe presentarsi su scale diverse.

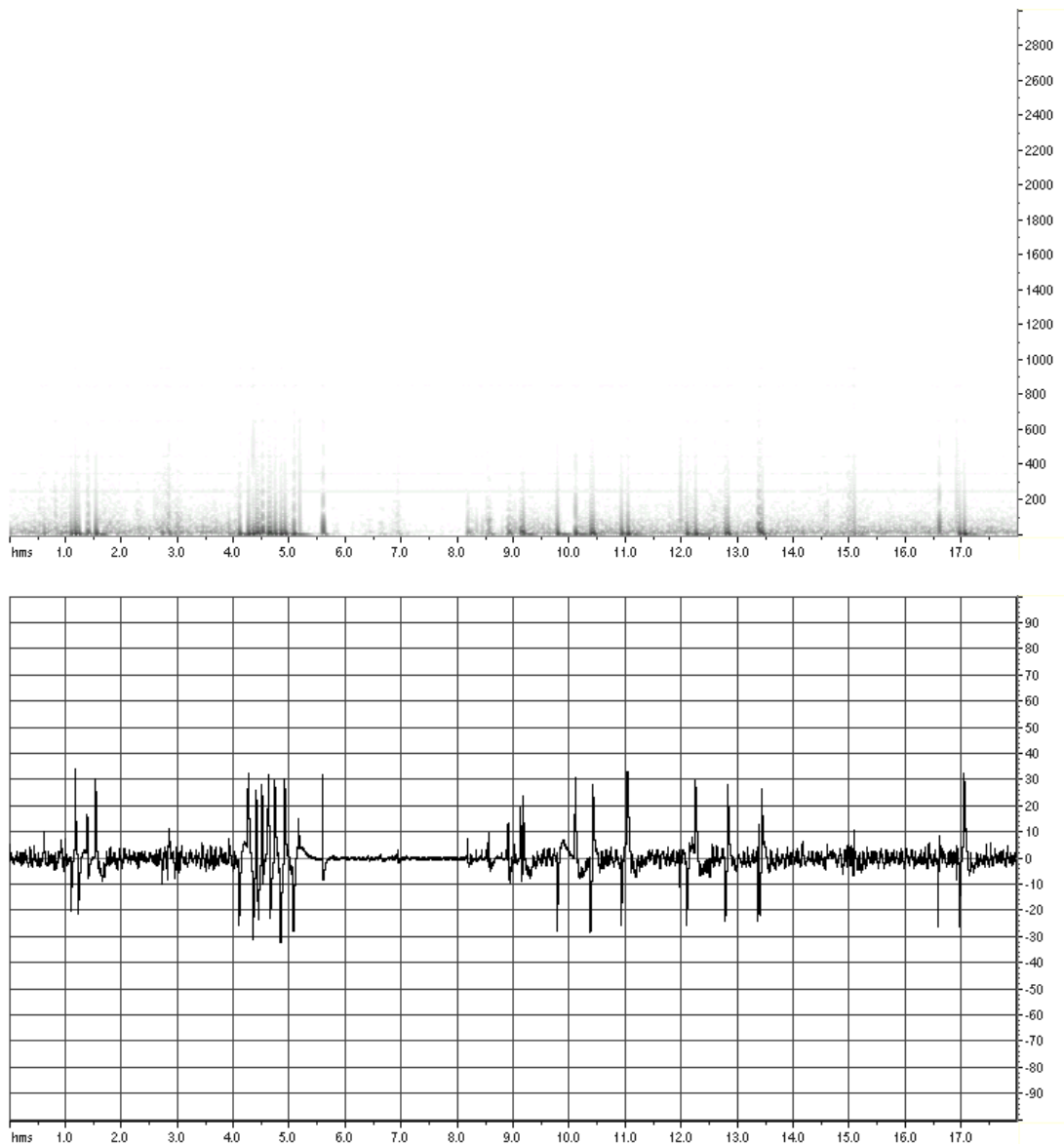


Fig.73 - Sequenza naturale tratta da una registrazione di G.Accardo effettuata a Roma il 21.10 alle 22:10 (circa) UTC. In alto lo spettrogramma e in basso l'oscillogramma. I tempi sono espressi in secondi, le frequenze in Hz, le intensità in toni di grigio (spettrogramma) o in % (oscillogramma). Questi segnali sono stati rilevati nella componente magnetica mediante un'antenna loop di 90 cm di diametro composta da 50 spire di tubo di rame da 22 mm rivestito in neoprene. L'antenna era posizionata a 40 m dal suolo; la quota locale era 52m slm.

La distribuzione temporale è più rarefatta rispetto alle sequenze registrate in laboratorio (dove i campioni venivano portati alla rottura nell'arco di 4-6 minuti) ma è perfettamente conforme alle sequenze registrate in cava a seguito di un assestamento "naturale" della massa litoide (cfr. pag.117 e successive). La durata degli impulsi è 10 volte più lunga e questo conferisce loro una distribuzione spettrale limitata ad una gamma di frequenze estremamente basse. Questo effetto può avere due concause: la maggiore distanza dalla sorgente radiosismica e la maggiore entità delle fratture naturali. Alla luce delle conclusioni tratte dalla nostra sperimentazione si potrebbe già azzardare l'interpretazione di una dinamica del fenomeno che ha prodotto questa breve sequenza. Tuttavia lo scopo di questa tesi è stato già ampiamente raggiunto. Questa testimonianza rappresenta dunque soltanto un esempio di come il metodo radiosismico trovi realmente riscontro in emissioni elettromagnetiche naturali.

## 4.5 - CONCLUSIONI

I fenomeni precursori attualmente conosciuti non sono riferibili al sisma con criteri di sistematicità e necessità e sono quindi idonei a formulare previsioni attendibili solo quando si manifestano in associazione. I precursori più importanti sembrano essere legati al sisma attraverso la teoria della dilatanza. La dilatanza è un evento osservato in prove di laboratorio ma la sua reale azione nel favorire i fenomeni precursori, valutata dal punto di vista geologico, può ritenersi valida soltanto in particolari condizioni. L'unico precursore che potrebbe essere sistematicamente correlabile alla dilatanza è il "pianto della roccia", che è anche il fenomeno che ha la minore probabilità di propagarsi fino alla superficie.

In questa ricerca è stata dimostrata l'esistenza di emissioni radiosismiche in associazione alle condizioni di sollecitazione meccanica della roccia sia in compressione (esperienze di laboratorio) che in distensione (esperienza in cava). E' stato dimostrato come queste emissioni precedono la rottura del materiale con una distribuzione di impulsi relazionabile al pianto della roccia e alla teoria della dilatanza.

E' stata provata la sistematicità del fenomeno e la sua manifestazione in tutti i tipi di roccia testati; rocce per lo più sedimentarie, di provenienza appenninica e non necessariamente ricche di quarzo o di minerali spiccatamente piezoelettrici.

La massima manifestazione del fenomeno è osservabile in banda E-VLF ed il mezzo più idoneo al rilevamento di tali emissioni è un ricevitore di campo come quello utilizzato in questa ricerca.

Tutte queste osservazioni sono perfettamente coerenti con la “teoria radiosismica” che prevede tali emissioni associate al pianto della roccia e consentirebbe, tra l’altro, di giustificare successi e fallimenti del metodo elettrico VAN.

Sono state presentate evidenze dell’esistenza in natura di emissioni che manifestano le stesse caratteristiche, già note ai radioamatori e da essi già sospettate di avere un qualche legame con i fenomeni sismici. E’ stato inoltre evidenziato come questi fenomeni siano discreti e ben definiti, non semplici fluttuazioni di un rumore di fondo, come appaiono, nell’immaginario dei fisici, dalle vane segnalazioni dei radioamatori. E’ stato anche mostrato come queste emissioni siano facilmente riconoscibili ed isolabili dai segnali naturali di origine atmosferica.

Il metodo radiosismico si presenta dunque come un mezzo di previsione realmente attuabile e a bassissimo costo. Si può sperare di vedere nel fenomeno radiosismico una soluzione alla necessità di un precursore attendibile, sebbene il metodo richieda ancora lo sviluppo di chiavi interpretative adeguate e di esperienza basata su rilevamenti diretti e non soltanto simulati.

Nello scenario di ulteriori sviluppi e applicazioni di questa tecnica si auspica una maggiore attenzione alle segnalazioni dei radioamatori, se non addirittura l’ausilio di quelle esperienze e attrezzature che soltanto loro, al momento, sono in grado di fornire con diffusione mondiale.





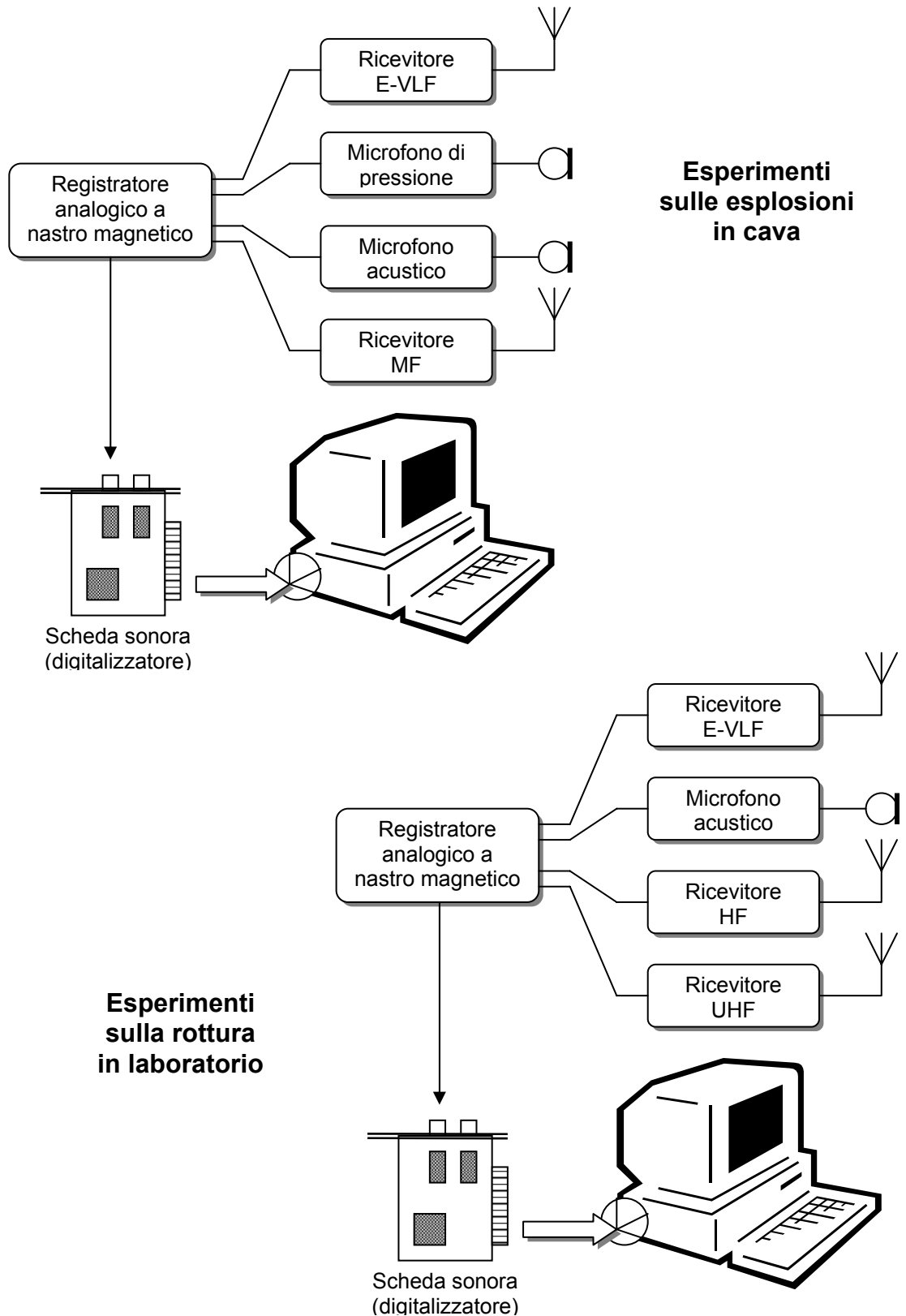
## 5 - Bibliografia

- **Antonello Angelucci** (1989): *Guida allo studio della Sedimentologia* – Ed. Nuova Cultura..
- **Michele Caputo** (1987): *Sismologia e segnali precursori dei terremoti* – Ed. Calderini, 1987.
- **Michele Caputo**: *Teoria ed analisi numerica e spettrale* (dispense delle lezioni di Sismologia 1998) – Dipartimento di Fisica, Università di Roma “La Sapienza”.
- **Pompeo Casati** (1996): *Scienze della Terra* – Città Studi Edizioni.
- **A. Griffith** (1924): *Theory of rupture* – Proc. 1<sup>DT</sup> Int. Cong. App. Mech., Delft.
- **Jacques Labeyrie** (1988): *Un moyen fiable de prévoir les séismes?* – La Recherche n°203, ott. 1988.
- **Bruno Martinis** (1995): *Il lazio prima di Saturno* – Edizioni Quasar.
- **Ezio R. Mognaschi & Ugo Zezza** (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.
- **Ezio R. Mognaschi** (1998): *Precursori elettromagnetici dei sismi* in: XVI Meeting dell'Associazione Italiana Radioascolto a Sirolo (AN) 1-3 maggio 1998; *Radioonde* n.12, maggio 1998; *Radorama*, inserto n.10 ottobre 1998; Internet: [http://web.tiscalinet.it/G2000/R\\_Mog.html](http://web.tiscalinet.it/G2000/R_Mog.html)
- **Ezio R. Mognaschi** (1997): *Segnali radio che precedono eventi sismici* da *Radioonde* n°8, ott. 1997
- **Annibale Mottana** (1989): *Fondamenti di mineralogia geologica* - Zanichelli

- **Ernest Rabinowicz** (1977): *Exoelectrons* – Proc. of Mechanical Engineering M.I.T. Boston, Vol. 236 n.1 gen 1977.
- **Tsuneji Rikitake** (1986): *Previsione dei terremoti* – Libreria Dario Flaccovio editrice, 1986.
- Tutti gli articoli pubblicati in Internet nelle pagine WEB a cui si fa riferimento al paragrafo 1.5 (*Lo stato attuale delle conoscenze*) dalla pag. 43 alla 48, per i quali, ad eccezione di rari casi, non è stato possibile reperire riferimenti ad analoghe pubblicazioni su carta.
- Le registrazioni dal vivo di segnali naturali nella componente magnetica (cap. 4.4) sono state effettuate da **Giuseppe Accardo (IW0BZD)** e rese disponibili dall'autore stesso per comunicazione diretta: iw0bzd@amsat.org  
(Home Page: [www.iw0bzd.tsx.org](http://www.iw0bzd.tsx.org) )

## 6 - APPENDICE

### 6.1 - SCHEMA A BLOCCHI DEL SISTEMA DI ACQUISIZIONE DEI DATI



## 6.2 - ANALISI DEI SEGNALI: FORMULARIO E RIEPILOGO DEI TERMINI

**f** - FREQUENZA: numero di cicli al secondo (Hz)

$$\begin{aligned}1 \text{ c/s} &= 1 \text{ Hz (Hertz)} \\1.000 \text{ c/s} &= 1 \text{ kHz (Chilohertz)} \\1.000.000 \text{ c/s} &= 1 \text{ MHz (Megahertz)}\end{aligned}$$

**T** - PERIODO: durata di un intero ciclo (sec)

**A** - AMPIEZZA: differenza tra il valore max e il valore min di un ciclo.

$$\begin{aligned}\text{RELAZIONI:} \\f &= 1/T \\T &= 1/f\end{aligned}$$

**B** - BANDA: gamma di frequenze (Hz)

SEGNALE: variazione di intensità nel tempo dove l'intensità è espressa da A e la sua variazione da valori di f compresi in un intervallo B.

**I** - INTENSITA':  $I = 10 \log_{10} (S/R)$  (dB)

dove: S = ampiezza segnale

R = ampiezza rumore

| Rapporto Segnale/Rumore | Misura in Decibel |
|-------------------------|-------------------|
| 2                       | 03                |
| 10                      | 10                |
| 100                     | 20                |
| 1.000                   | 30                |

**SEGNALE ANALOGICO**: variazione continua nel tempo

**SEGNALE DIGITALE**: variazione quantizzata in intervalli discreti

**CAMPIONAMENTO**: operazione di digitalizzazione del segnale analogico

**F<sub>c</sub>** - FREQUENZA DI CAMPIONAMENTO: numero di campioni raccolti in un secondo (Hz)

**T<sub>c</sub>** - PERIODO DI CAMPIONAMENTO: intervallo temporale tra 2 campioni successivi (sec)

**F<sub>n</sub>** - FREQUENZA DI NYQUIST: frequenza limite della banda campionata (Hz)

**Rc** - RISOLUZIONE DEL CAMPIONAMENTO: quantità di informazioni  
codificate in un secondo (bit/sec)

RELAZIONI:

$$F_c = 2F_n$$

$$T_c = 1/F_c$$

$$F_n = F_c/2$$

$$R_c = F_c * \log_2 (n. \text{ possibili valori di I}) \text{ bit/sec}$$

| Livelli di intensità | Risoluzione (bit) |
|----------------------|-------------------|
| 2                    | 1                 |
| 4                    | 2                 |
| 16                   | 4                 |
| 256                  | 8                 |
| 65.536               | 16                |

| Set scheda sonora | Fc effettiva | F <sub>n</sub> = F <sub>max</sub> |
|-------------------|--------------|-----------------------------------|
| 44K               | 44100,00 Hz  | 22050,000 Hz                      |
| 22K               | 22050,00 Hz  | 11025,000 Hz                      |
| 11K               | 11025,00 Hz  | 5512,500 Hz                       |
| 5.5K              | 5512,50 Hz   | 2756,250 Hz                       |

TRASFORMATA DI FOURIER:

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

**T<sub>a</sub>** - INTERVALLO DI ANALISI FFT (sec)

**n** - NUMERO DI CAMPIONI su cui si è operata la FFT

**Fr** - RISOLUZIONE DELL' ANALISI FFT (Hz)

RELAZIONI:

$$T_a = n/F_c$$

$$N = F_c * T_a$$

$$F_r = F_c/n$$

**F<sub>max</sub>** - MASSIMA FREQUENZA RISOLVIBILE (Hz)

**F<sub>min</sub>** - MINIMA FREQUENZA RISOLVIBILE (Hz)

RELAZIONI:

$$\mathbf{F_{max}} = F_n = F_c/2 = 1/T_c$$

$$\mathbf{F_{min}} = F_r = F_c/n = 1/T_a$$

### 6.3 - SOFTWARE E HARDWARE: GLOSSARIO DEI TERMINI E DELLE SIGLE

**AGC:** Controllo Automatico di Guadagno. Circuito elettronico che ha lo scopo di limitare le differenze tra il massimo e il minimo livello del segnale in ingresso.

**AM:** Modulazione di Ampiezza

**ASCII:** formato digitale che codifica il solo testo senza alcuna caratteristica stilistica

**BNC:** bocchettone di connessione con innesto a baionetta per cavi RG8 e RG58.

**Bufferizzare:** collocare i dati in memoria. Neologismo tecnico derivato dal termine inglese *buffer*.

**BMP:** formato digitale che codifica immagini non compresse

**EM:** acronimo di “elettromagnetico”

**FFT:** algoritmo che esegue la Trasformata Veloce di Fourier

**FM:** Modulazione di Frequenza

**HD:** sigla di “Hard Disk”, la memoria di massa del computer.

**INPUT:** canale di ingresso di un segnale analogico o digitale

**JACK:** spinotto tipicamente usato sui cavi schermati da 600 Ohm (audiofrequenza)

**JPG:** formato digitale che codifica immagini compresse

**LED:** acronimo di “diodi emmettitori di luce”

**LINE:** segnale audio a bassa intensità (non amplificato per altoparlante)

**MIC:** microfono

**Midi, MID:** formato digitale che codifica lo spartito di una melodia. La riproduzione di un file MIDI avviene attraverso una periferica hardware (scheda sonora) che sintetizza il suono dello strumento codificato e lo esegue secondo le tonalità codificate.

**OUTPUT:** canale di uscita di un segnale analogico o digitale

**PL:** bocchettone di connessione con innesto a vite per cavi RG8 e RG58.



**QRM:** rumore di fondo in un collegamento radio.

**Radiantismo:** nel gergo radioamatoriale indica l'insieme delle attività del radioamatore.

**Radiogeofono:** neologismo creato per indicare l'apparecchio usato in questa ricerca che, pur lavorando nello spettro radio, fornisce risultati confrontabili con quelli di un geofono.

**Radiosismici:** neologismo creato per indicare i segnali radio di frequenza acustica associati ad attività sismica. Si intendono comprese tutte le frequenze acustiche e manipolabili con attrezzature HiFi (da 20 Hz a 20 kHz) quindi una banda informale più estesa di quella ufficialmente denominata "VF".

**RG8:** cavo schermato a bassissima dispersione con impedenza di 52 Ohm.

**RG58:** cavo schermato con impedenza di 52 Ohm.

**S.meter:** indicatore del livello di intensità del segnale ricevuto da un radiorecettore. Usualmente la misura è espressa in decibel.

**SSB:** particolare tipo di modulazione della portante radio definita anche come "modulazione di ampiezza con portante soppressa".

**Trigger:** dispositivo di attivazione automatica di un software o di un hardware in presenza di un determinato livello del segnali di input (soglia di trigger)

**VF:** "voice frequency" è il nome della banda radio che si estende da 300 Hz a 3 kHz coprendo la parte centrale e meglio udibile dello spettro acustico.

**Wave, WAV:** formato digitale che codifica i suoni mediante campionamento

## 6.4 - BANDE RADIO: SUDDIVISIONE DELLO SPETTRO RADIO

| Lunghezza d'onda (m) | Banda di frequenze | Sigla <sup>62</sup> italiana | Sigla <sup>63</sup> internaz. | Nome <sup>64</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                           | -                         |
| 0,01 – 0,001         | 30 – 300 GHz       | -                            | EHF                           | -                         |

<sup>62</sup> Ormai quasi in disuso, era utilizzata sulle vecchie radio italiane.

<sup>63</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>64</sup> Nome comune riferito 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. Allo stesso modo sugli apparecchi domestici si usa chiamare impropriamente “FM” la banda di radiodiffusione privata che è localizzata nella gamma delle VHF.

La ricerca condotta nell'ambito di questa tesi di laurea è stata realizzata nella sua completezza grazie all'aiuto e alla disponibilità di persone ed enti a cui vanno i nostri più sinceri ringraziamenti.

In particolare si ringraziano:

Il direttore ed il personale della società **BUZZI-UNICEM** di Guidonia per aver dato il consenso ed offerto la massima disponibilità nell'effettuare presso il loro stabilimento il ciclo di esperimenti che richiedeva l'impiego di esplosivi.

Il **Laboratorio Sperimentale delle FS** di Roma (piazza Ippolito Nievo) ed in particolare il dott. **V. Misano** per aver messo a disposizione macchinari e personale che hanno consentito la realizzazione di tutti gli esperimenti di laboratorio.

Il dott. **Ugo Coppa** dell'**Osservatorio Vesuviano** di Napoli per aver fornito il registratore multitraccia e i sensori di pressione.

L'amico radioamatore **IW2GOO**, prof. **E. R. Mognaschi** (Dipartimento di Fisica dell'Università di Pavia) per la sua squisita disponibilità nel fornire tutta la documentazione sulle sue ricerche in questo campo, consigli tecnici e teorici.

I professori **Burragato, Doglioni** e **Mariotti**, del Dipartimento Scienze della Terra dell'Università "La Sapienza" di Roma per aver fornito consigli e informazioni di fondamentale importanza nello sviluppo della tesi.

L'amico radioamatore **IW0BZD**, **Giuseppe Accardo** (Computer Production Manager) per aver fornito gli spettrogrammi di alcune sue registrazioni effettuate "dal vivo", consigli tecnici e appoggio morale.