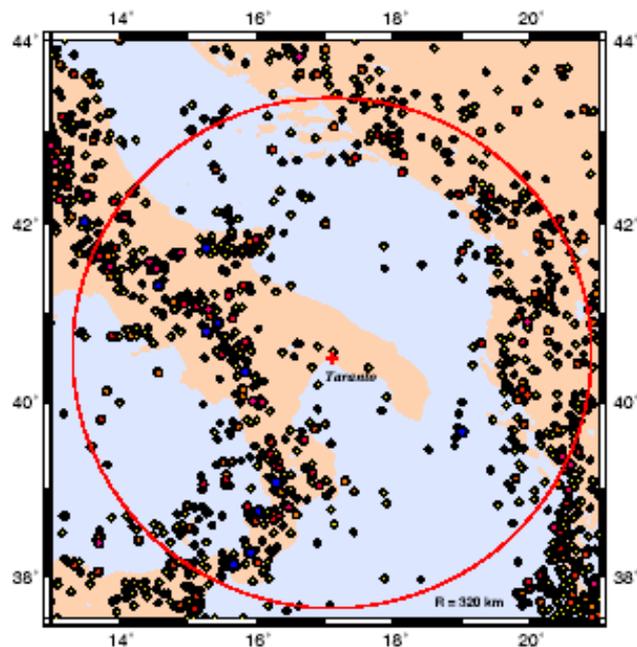


# PRINCIPIA

*Ingenieros Consultores*



**TERMINALE GNL DI TARANTO (ITALIA)**

**VALUTAZIONE DI RISCHIO SISMICO**

**INDICE**

<b>1. INTRODUZIONE</b> .....	1
1.1 Premessa .....	1
1.2 Obiettivo .....	1
1.3 Scopo .....	2
1.4 Struttura dello studio .....	3
<b>2. DESCRIZIONE DEL PROBLEMA</b> .....	5
1.1 Norme rilevanti .....	5
2.2 Approccio generale .....	5
2.3 Informazione sismica .....	6
2.4 Informazione tettonica .....	7
2.5 Informazione geotecnica .....	8
2.6 Leggi di attenuazione .....	8
2.7 Altre correlazioni usate .....	9
<b>3. VALUTAZIONE DEL RISCHIO</b> .....	19
3.1 Descrizione della metodologia .....	20
3.2 Specificazione della funzione kernel .....	20
3.3 Periodi di raddrizzamento effettivi .....	21
3.4 Rischio sismico del sito .....	22
<b>4. ANALISI DI PROGETTO</b> .....	28
4.1 Calcolo delle accelerazioni .....	28
4.2 Spettri di specifica risposta del sito .....	28
4.3 Accelerogrammi compatibili .....	30
<b>5. RISPOSTA DEL TERRENO DEL SITO</b> .....	45
5.1 Sezione trasversale idealizzata .....	45
5.2 Risposta dinamica del terreno .....	45
5.3 Valutazione del potenziale di liquefazione .....	46
<b>6. CONCLUSIONI</b> .....	60

Appendice I. Referenze .....	62
Appendice II. Il programma per computer KERFRACCT .....	66

## INDICE DELLE FIGURE

Figura 2-1 Mappa e luogo di terremoti recenti e significanti .....	10
Figura 2-2 Maggiori direzioni di risorse sismico-genetiche identificate .....	11
Figura 2-3 Schema tettonico locale di Taranto .....	12
Figura 2-4 Epicentri da fonte storica ufficiale .....	13
Figura 2-5 Epicentri con magnitudo maggiore di 4.0 .....	14
Figura 2-6 Dati SPT per serbatoi e area dell'impianto .....	15
Figura 2-7 Velocità d'onda nel foro BH1 .....	16
Figura 2-8 Velocità d'onda nel foro BH5 .....	17
Figura 2-9 Legge di attenuazione di Sabetta e Pugliese (1987 e 1996) .....	18
Figura 3-1 Curve-fits per bandwidth .....	23
Figura 3-2 Distribuzione delle magnitudini dall'anno 1000 .....	24
Figura 3-3 Distribuzione delle magnitudini dall'anno 1980 .....	25
Figura 3-4 Accelerazione spettri, $T = 0$ s .....	26
Figura 3-5 Sensibilità alla variabilità dell'esponente nella legge di potenza (formula esponenziale) .....	27
Figura 4-1 Disegno delle accelerazioni .....	33
Figura 4-2 Mappa di rischio del Servizio Sismico Nazionale .....	34
Figura 4-3 Spettri del disegno orizzontale .....	35
Figura 4-4 Spettri del disegno verticale .....	36
Figura 4-5 Accelerogrammi orizzontali SSE .....	37
Figura 4-6 Accelerogrammi verticali SSE .....	38
Figura 4-7 Accelerogrammi orizzontali OBE .....	39
Figura 4-8 Accelerogrammi verticali OBE .....	40
Figura 4-9 Spettri compatibile per SSE orizzontale .....	41
Figura 4-10 Spettri compatibile per SSE verticale .....	42
Figura 4-11 Spettri compatibile per OBE orizzontale .....	43
Figura 4-12 Spettri compatibile per OBE verticale .....	44
Figura 5-1 Inumidimento e modulo $G$ normalizzato contro sforzo effettivo .....	50
Figura 5-2 Resistenza alla liquefazione per sabbie – SPT .....	51
Figura 5-3 Resistenza alla liquefazione per sabbie – CPT .....	52
Figura 5-4 Valori corretti $(N_1)_{60}$ .....	53
Figura 5-5 CPT – Resistenza alla penetrazione del cono .....	54
Figura 5-6 CPT – Resistenza sleeve .....	55

Figura 5-7 CRR per strati 1 e 4 .....	56
Figura 5-8 Domanda sismica in termini di CSR .....	57
Figura 5-9 Paragone di domanda (CSR) e resistenza (CRR) .....	58
Figura 5-10 Valori $(N_1)_{60}$ sotto al serbatoio paragonati ai requisiti .....	59

**INDICE DELLE TAVOLE**

Tavola 3-1 Anni di riferimento per intensità differenti dell'evento .....	22
Tavola 5-1 Proprietà dinamiche .....	45
Tavola 5-2 OBE Proprietà dinamiche equivalenti .....	46
Tavola 5-3 SSE Proprietà dinamiche equivalenti .....	46
Tavola 5-4 Valori minori, medi, e superiori $(N_1)_{60}$ .....	47
Tavola 5-5 Valori minori, medi, e superiori di CRR .....	48
Tavola 5-6 Dati di frazioni percentili di $(N_1)_{60}$ inferiori a 22 .....	49

## 1. INTRODUZIONE

### 1.1 Premessa

La gasNatural ha intenzione di costruire un impianto di importazione e rigassificazione per gas naturale liquefatto (GNL) a Taranto, che include due serbatoi di stoccaggio di 150,000 m<sup>3</sup> l'uno. L'installazione dell'impianto fornirà una capacità di 8 x 10<sup>9</sup> Sm<sup>3</sup>/anno.

I requisiti espressi nella sezione 4-1.3 del NFPA 59-A (Associazione Nazionale Protezione Incendi, 2001) e nello standard Europeo EN 1473 (CEN, 1997) rendono necessaria la determinazione del rischio sismico del sito prima della pianificazione delle strutture.

L'attuale report descrive i risultati completi ottenuti durante la valutazione del rischio sismico condotte nel contesto dei requisiti descritti prima e fornisce le caratteristiche dei movimenti sismici da usare nel disegno dell'impianto. Un riassunto dello studio condotto è stato già fatto (Principia, 2005).

### 1.2 Obiettivo

Il primo obiettivo del lavoro presentato di seguito è la valutazione del rischio sismico del sito. Questo rischio è quantificato in termini di curva di rischio sismico, che esprime la probabilità annuale di eccedere ogni livello di accelerazione o ogni intensità dei terremoti sul sito.

Secondariamente, basandosi sui periodi di ritorno corrispondenti e sulla curva di rischio sismico ottenuta, l'obiettivo seguente è quello di stabilire il livello del picco di accelerazione per i due terremoti di riferimento: l'*Operating Base Earthquake* (OBE) ed il *Safe Shutdown Earthquake* (SSE).

Terzo, spettri di risposta specifica del sito deve essere adottata per il disegno. Esse sono in primo luogo governate dalle condizioni geotecniche locali e la loro forma deve essere conforme agli standard rilevanti ed alle linee guida. Saranno generati degli accelerogrammi sintetici compatibili con gli spettri di riferimento.

Alla fine deve essere determinata la risposta locale del suolo agli eventi sismici di riferimento. Ciò include l'ottenimento di proprietà di sforzo consistenti per ogni strato e la valutazione del potenziale di liquefazione dello strato granulare.

### 1.3 Scopo

Una metodologia relativamente recente verrà applicata per la determinazione della curva di rischio sismico. Questa procedura utilizza un approccio senza zona; tale approccio risolve molti dei paradossi e delle inconsistenze della metodologia tradizionale, che si basa sulla costruzione di zone sismico-genetiche di attività uniforme.

La nuova procedura è stata già applicata da Principia su tutti i siti GNL in Spagna: Huelva, Cartagena, Barcellona e Bilbao, e su alcuni impianti GNL esteri come Dahej (India), Damietta (Egitto), Lázaro Cárdenas (Messico) e Saint John (Canada). Alcuni dei risultati di questa procedura sono riassunti da Crespo e Marti (2002).

Le mansioni di base per il raggiungimento degli obiettivi descritti nelle sezioni precedenti sono:

- a) Compilazione del database del terremoto su di un'area maggiore di un circolo, centrata al sito e con raggio di 320 km.
- b) Compilazione dell'informazione geologica e tettonica dell'area
- c) Selezione di leggi di attenuazione ed altre correlazioni necessarie (es. magnitudo-intensità) applicabili a condizioni locali
- d) Se necessario, integrazioni alla base dati storica (Catalogo degli Eventi Sismici) dei terremoti per caratteristiche specifiche geologiche o tettoniche
- e) Determinazione dei valori migliori per i parametri della funzione kernel, responsabile per la levigatura della statistica per le attività sismiche che permetta di stabilire una rata di attività ovunque
- f) Combinazione delle rate di attività locali, con l'utilizzo della rilevante legge di attenuazione, per determinare la curva di rischio sismico. Studio dell'intensità dei risultati ai cambiamenti parametrici
- g) Determinazione dei livelli di picco di accelerazione, orizzontali e verticali, che hanno a che fare con i periodi di ritorno per OBE e SSE.
- h) Costruzione di spettri di risposta specifica del sito per i componenti orizzontali e verticali del OBE e SSE e spettri di riferimento
- i) Creazione di accelerogrammi sintetici compatibili con lo spettro di riferimento

Le attività di cui sopra completano la definizione della risposta all'evento sismico (*design motions*) del sito. È altresì necessario determinare le caratteristiche di base del suolo locale in risposta all'evento sismico di riferimento. Ciò include due attività aggiuntive:

- j) Analisi dell'onda di propagazione unidimensionale in modo da calcolare le proprietà di sforzo del terreno, es.: il modulo di taglio ed il rapporto di smorzamento "damping ratio"
- k) Valutazione del potenziale di liquefazione del terreno mediante comparazione delle richieste e delle resistenze cicliche negli strati che potrebbero risentire di tale problema

#### **1.4 Struttura dello studio**

Il resto del presente report comprende altri cinque capitoli e due appendici.

Il Capitolo 2 tratta le caratteristiche geotecniche e sismiche del sito e dei dintorni, rilevanti per la valutazione del rischio sismico. Le leggi di attenuazione e altre correlazioni necessarie sono anch'esse discusse in questo capitolo.

La metodologia senza zone per la valutazione del rischio sismico è descritta ed applicata al sito nel Capitolo 3. Le analisi di sensibilità sono anch'esse condotte per stabilire l'incertezza dei risultati.

Dopo aver stabilito la curva di rischio il picco delle accelerazioni sono assegnate agli eventi OBE e SSE. Successivamente sono costruiti gli spettri di risposta del sito da utilizzare come riferimento e gli accelerogrammi specifici, compatibili con i vari spettri, sono anch'essi trattati in questo capitolo.

La risposta del terreno locale è analizzata nel Capitolo 5. Ciò include la determinazione delle proprietà di sforzo (rigidità e smorzamento) e la valutazione del potenziale di liquefazione del terreno.

Il Capitolo 6 presenta sommariamente le conclusioni e raccomandazioni generate dal lavoro effettuato.

La prima appendice elenca le referenze bibliografiche e documentarie cui fa riferimento il testo del report. La seconda fornisce una descrizione sommaria del programma KERFRACCT utilizzato nella valutazione di rischio sismico.

## 2. DESCRIZIONE DEL PROBLEMA

### 2.1 Norme rilevanti

Le seguenti norme e linee guida sono state prese in considerazione durante gli studi descritti nel presente report:

- “OPCM 2003: Primi Elementi in Materia di Criteri Generali per la Classificazione Sismica del Territorio Nazionale e di Normative Tecniche per le Costruzioni in Zona Sismica” (opcm, 2003).
- “Eurocode 8: Provvedimenti progettuali per la Resistenza sismica delle Strutture” (CEN, 1994).
- “EN 1473: Installazione ed equipaggiamento per Gas Naturale Liquefatto. Design di installazioni on- shore” (CEN, 1997).
- “NFPA 59-A: Produzione, Stoccaggio e di passaggio di gas naturale liquefatto” (National Fire Protection Association, 1996).

### 2.2 Approccio generale

L’approccio deterministico per cui si era inizialmente optato per stabilire i terremoti di riferimento dovette essere abbandonato abbastanza presto. Richiedeva la determinazione del terremoto massimo credibile per ogni potenziale fonte sismica e l’ipotesi del verificarsi di tale evento alla minore distanza possibile dal sito. La ragione principale dell’abbandono del metodo era che era chiaramente molto difficile determinare un massimo terremoto credibile, anche ipotizzando che tale concetto sia significativo.

Invece, il rischio sismico è attualmente valutato tramite l’uso di un approccio probabilistico. Le rate di attività sono assegnate a ciascun punto dell’area che possa significativamente contribuire al rischio sismico del sito. Le leggi di attenuazione possono poi essere usate per calcolare, per i terremoti che possano avvenire a ciascun punto, i movimenti che si potrebbero percepire al sito. La considerazione simultanea delle rate di attività della regione di maggior influenza, insieme con le leggi di attenuazione appropriate, rischio sismico sul sito.

L’assegnazione di rate di attività per ciascun punto compreso nella regione di influenza porta alla creazione di un modello di generazione sismica. Le rate devono essere derivate sulla base dei terremoti già avvenuti (catalogo storico degli eventi sismici), migliorati dall’informazione geologica e tettonica esistente. Il problema è come costruire un modello di generazione sismica usando i terremoti del catalogo.

La procedura tradizionale (Cornell, 1968) era di usare l'informazione sismica, geologica e tettonica per la costruzione di una serie di zone non sovrapposte, congiungenti la regione di influenza (un circolo di 320 KM). Si presume che ciascuna zona abbia una sismicità uniforme. Il carattere discreto dell'informazione del terremoto da fonte storica è facilitato dalla distribuzione uniforme su ciascuna zona dei contributi all'attività successa durante i terremoti già avvenuti in quella zona.

Questo tipo di procedura pare logica quando una forte correlazione può essere stabilita tra ciascuna configurazione tettonica conosciuta e la storia dei terremoti passati. Aveva inoltre il vantaggio di richiedere solo risorse moderatamente computazionali, che obbligatorio all'epoca del suo sviluppo.

Il grande incremento nelle capacità computazionali ottenute negli anni fa sì che sia possibile di riconsiderare se una solida base scientifica esista per le zone sismicamente uniformi; certamente una ridotta capacità tecnologica non è più limitativa. La distribuzione dell'attività sismica ha una più ricca struttura sottostante di ciò che permettono le zone sismiche uniformi.

In più, particolarmente nelle regioni ad attività sismica moderata, o con cataloghi di terremoto incompleti, la costruzione di zone sismico-genetiche incorpora inevitabilmente un componente soggettivo con potenzialmente maggiori implicazioni sui risultati. Ciò permette il criticismo della metodologia e introduce incertezze considerabili nei risultati.

Come conseguenza di queste limitazioni, è stata creata una diversa procedura (Woo, 1995, 1996), di seguito utilizzata. Principia ha già usato tale procedura in tutti i serbatoi GNL in Spagna (Crespo e Martí, 2002) ed in quelli esteri come Dahej (India), Damietta (Egitto), Lázaro Cárdenas (Messico) o Saint John (Canada).

Con un catalogue di terremoto con epicentro, magnitudo e periodi di osservazione effettivi di ogni magnitudo una funzione di attività viene creata per ciascun sito. Questa funzione viene originata da una facilitazione statistica dei dati, riconoscendo la natura probabilistica dei campioni separati di osservazioni storiche disponibili; la facilitazione statistica, però, con l'uso di funzioni kernel, non richiede a priori l'esistenza di nessuna zona sismico-genetica con prescritta distribuzione di attività, uniforme o non. L'unico inconveniente di questa procedura è che richiede una maggior forza computazionale, che al giorno d'oggi è un inconveniente minore. Al contrario, l'affidabilità ed oggettività dei risultati sono considerevolmente migliorate.

La sezione 3.1 e le referenze (Woo) cui fanno riferimento i paragrafi precedenti forniscono dettagli aggiuntivi riguardanti la metodologia "zoneless".

### 2.3 Informazione sismica

Per redigere una storia sismica necessaria per il calcolo di rischio, sono stati usati due database di terremoti:

- NT 4.1 Catalogue del Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti (GNDT, 2005). Il numero totale di avvenimenti registrati è 2488, tra il 1000 ed il 1992. In questo catalogue, la dimensione del terremoto viene descritta con superficie d'onda magnitudo  $M_s$ .
- Il Bollettino Sismico (IGV-CNT, 2005) dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia ed il Centro Nazionale Terremoti registra un numero totale di avvenimenti di 50,262, tra il 1983 ed il 2003. In questo catalogue, la dimensione del terremoto è descritta con magnitudo locale  $M_L$ , durata della magnitudo  $M_D$ , o entrambi.

Questi due database sono stati riuniti in uno, con l'uso di dati NT 4.1 fino al 1983 ed del Bollettino Sismico successivo a quell'anno. Avvenimenti senza una magnitudo assegnata sono stati rimossi, risultanti in un totale di 46,862 nel database combinato. Inoltre, la magnitudo adottata, riferita come  $M$  in questo report, corrisponde alla onda di superficie con magnitudo  $M_s$  qualora le magnitudo locali  $M_L$  ed  $M_s$  siano maggiori o uguali a 5.5 e corrispondano a  $M_L$  per magnitudo minori. Questa procedura evita gli effetti di saturazione  $M_L$  per terremoti maggiori e coincide con il criterio adottato da Sabetta e Pugliese (1987 e 1996).

Il sito di Taranto si trova nel sud dell'Italia. Le coordinate del sito adottate per lo studio sono:

40° 30' Nord

17° 10' Est

Iniziando con il catalogo combinato, i terremoti selezionati per ulteriori considerazioni sono stati quelli con epicentro interno al rettangolo compreso tra le seguenti coordinate geografiche:

- latitudine: 37° 30' a 44° 00' Nord
- longitudine: 13° 00' a 21° 00' Est

Ciò diede origine ad un totale di 2.490 terremoti con magnitudo maggiore o uguale a 3, esclusi i cd. "foreshocks", e "aftershocks" e terremoti senza magnitudo o intensità assegnate. Tutti questi epicentri sono mostrati nella Figura 2-4; la Figura 2-5 mostra epicentri di terremoti con magnitudo superiore a 4.0.

## 2.4 Informazione tettonica

Paragonando la storia sismica recente e remota, usando i campi di stress e sforzo raccolti da tutti i dati disponibili (ved. Figura 2-1) e la struttura profonda ottenuta dalla tomografia sismica, i sismologi sono stati in grado di fissare migliori restrizioni sull'azione tettonica dell'Italia intorno al sito (Valensise et al, 2003):

- Una quasi continua cintura sismica segue il margine sotterraneo del microplate Adriatico sotto gli Appennini e le Alpi, ed il confine tra la litosfera Ionica e l'arco Calabro.
- Una cintura piuttosto stretta di sismicità caratterizza gli Appennini meridionali, dove i terremoti sono maggiori dell'arco settentrionale e difetti individuali arrivano a 30-50 km di lunghezza. Dati di terremoto e stress riflettono consistentemente la dominante estensione NE-SO.

Al contrario, il ruolo dei difetti laterali E-O rivelati da recenti terremoti di dimensioni moderate che colpiscono l'area appenninica è tuttora poco chiaro. Tali tremori possono risultare da complessità laterali, favorendo diverse estensioni, o rappresentano la riattivazione di difetti pre-esistenti che risalgono alla formazione degli Appennini. La parte meridionale degli Appennini è dominata da una fascia litografica staccata (o forse meno densa) che potrebbe originare il fenomeno del sollevamento e dell'estensione.

- Una zona sismica stretta è presente nell'arco Calabro. Terremoti poco profondi vengono registrati in terraferma, mentre fenomeni intermedi e profondi vengono osservati nel Tirreno meridionale. L'area di repressione è di soli 200 km ma ha un'estensione più profonda. Cifre interessanti di tale attività profonda sono la geometria della fascia Ionica, che pare sprofondare passivamente nel mantello, ed il meccanismo interno dell'evento sismico nella fascia, consistentemente soggetto a compressione.

Un modello di segmentazione difettoso dell'Italia è stato sviluppato dall'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia. Il modello è basato sull'ipotesi che la sismicità possa essere approssimata ad un numero finito di potenziali fonti sismogenetiche. Era fondato su validi dati storici, su scoperte di strumenti sismici e sulla conoscenza del difetto attivo in Italia.

Una fonte potenzialmente sismica è la proiezione superficiale di un difetto sferrato che potrebbe generare in futuro un terremoto significativo. Non tutte le fonti potenziali causeranno terremoti, e non tutti i terremoti verranno causati da potenziali fonti identificate, ma la lista delle fonti sismiche può essere utile per stime approssimative. L'attuale rilascio del modello di segmentazione (Figura 2-2) conta circa 250 potenziali fonti sismiche raggruppate secondo i loro criteri di identificazione ed i loro parametri.

Lo schema tettonico in prossimità di Taranto è dominato da una zona calcarea Mesozoica sotto quella Neozoica. Questo meccanismo produce difetti che, anche se non appaiono in superficie, esistono in grandi profondità. La Figura 2-3 (Medea, 2004) mostra lo schema tettonico locale.

## **2.5 Informazione geotecnica del sito**

L'informazione geotecnica del sito, così come le raccomandazioni preliminari per il design di fondazione del terminale on-shore, sono state prodotte da Soil (2005).

In breve, il profilo generale del suolo può essere così descritto:

- a) Strato 1: riempimento artificiale, gradualmente posto in anni recenti sopra una zona previamente sommersa. È formato da rifiuti e/o scorie, molto probabilmente prodotte da acciaierie vicine
- b) Strato 2: consiste da argille ben consolidate, molto rigide tendenti al solido
- c) Strato 3: tra le principali formazioni sopra descritte, si trova uno strato di sabbia medio densa. La sua densità varia da 1.5 a 2.5 m.
- d) Strato 4: la sua parte superiore è formata da sabbia medio densa con infrastrati limosi. La sua parte inferiore è formata da sabbie e limi argillosi, molto probabilmente normalmente consolidati.

I dati SPT registrati nei primi 14 m vengono mostrati nella Figura 2-6.

Due fori inferiori sono stati creati tramite l'uso di perforazioni al centro di ogni base dei serbatoi (perforazioni perforazione 1 e perforazione 5). La compressione (P) e il taglio (S) velocità d'onda ottenuta nei due perforazioni sono mostrati nelle Figure 2-7 e 2-8.

## **2.6 Leggi di attenuazione**

L'energia liberata nell'area focale del terremoto si propagherà in tutte le direzioni in forma di onde, che si espanderanno a distanza e, di conseguenza, aumenteranno in ampiezza.

A parte l'attenuazione geometrica menzionata, ci saranno altri effetti causati dalla in elasticità dei materiali deformanti così come dalla distribuzione di impedenza, che da luogo a riflessioni, rifrazioni e varietà di velocità di propagazione.

A causa degli ultimi fattori, le leggi di attenuazione sono normalmente dipendenti dalla magnitudo del terremoto, dalla profondità dell'ipocentro e dalle caratteristiche geologiche della regione. Per cui, se possibile, vengono usate leggi di attenuazione locale applicabili,

che tengono anche in considerazione la dipendenza da profondità focale e magnitudo del terremoto.

Per la valutazione attuale di rischio sismico, la legge di attenuazione proposta da Sabetta e Pugliese (1987 e 1996) per l'Italia sono particolarmente applicabili e sono state conseguentemente usate. La loro legge è espressa in termini di magnitudo  $M$  nella sezione 2.3. La legge di attenuazione viene mostrata nella Figura 2-9 e può essere così descritta:

$$\log y = a + bM - \log (R^2 + h^2)^{1/2} + eS \quad (2-1)$$

dove  $y$  è l'accelerazione

$R$  è la distanza dall'epicentro

$S = 0$  per terreni solidi e profondi ed  $S = 1$  per terreni poco profondi

$a$ ,  $b$ ,  $e$  ed  $h$  sono le costanti empiriche, per le quali sono stati adottati i valori ottenuti da Sabetta e Pugliese.

## 2.7 Altre correlazioni

Per svolgere la valutazione del rischio sismico, devono essere stabilite correlazioni tra le diverse misure di magnitudo sismiche. Ciò avviene a causa di misure di magnitudo differenti quotate nei cataloghi storici dei terremoti.

La correlazione  $M_s - M_L$  applicata qui è la stessa usata dal NT 4.1 Catalogue del *Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti*:

$$M_s = 1.25 M_L - 1.39 \quad (2-2)$$

ottenuta da un campione di 93 avvenimenti con una deviazione standard di 0.27.

Per sviluppare una correlazione tra  $M_L$  ed  $M_D$ , è stato usato il 27,651 degli eventi per i quali entrambe le misure di magnitudo avevano un valore assegnato. Dopodiché, è stato condotto un affinamento dei dati. La risultante correlazione corrisponde alla seguente equazione:

$$M_L = 0.979 M_D - 0.500 \quad (2-3)$$

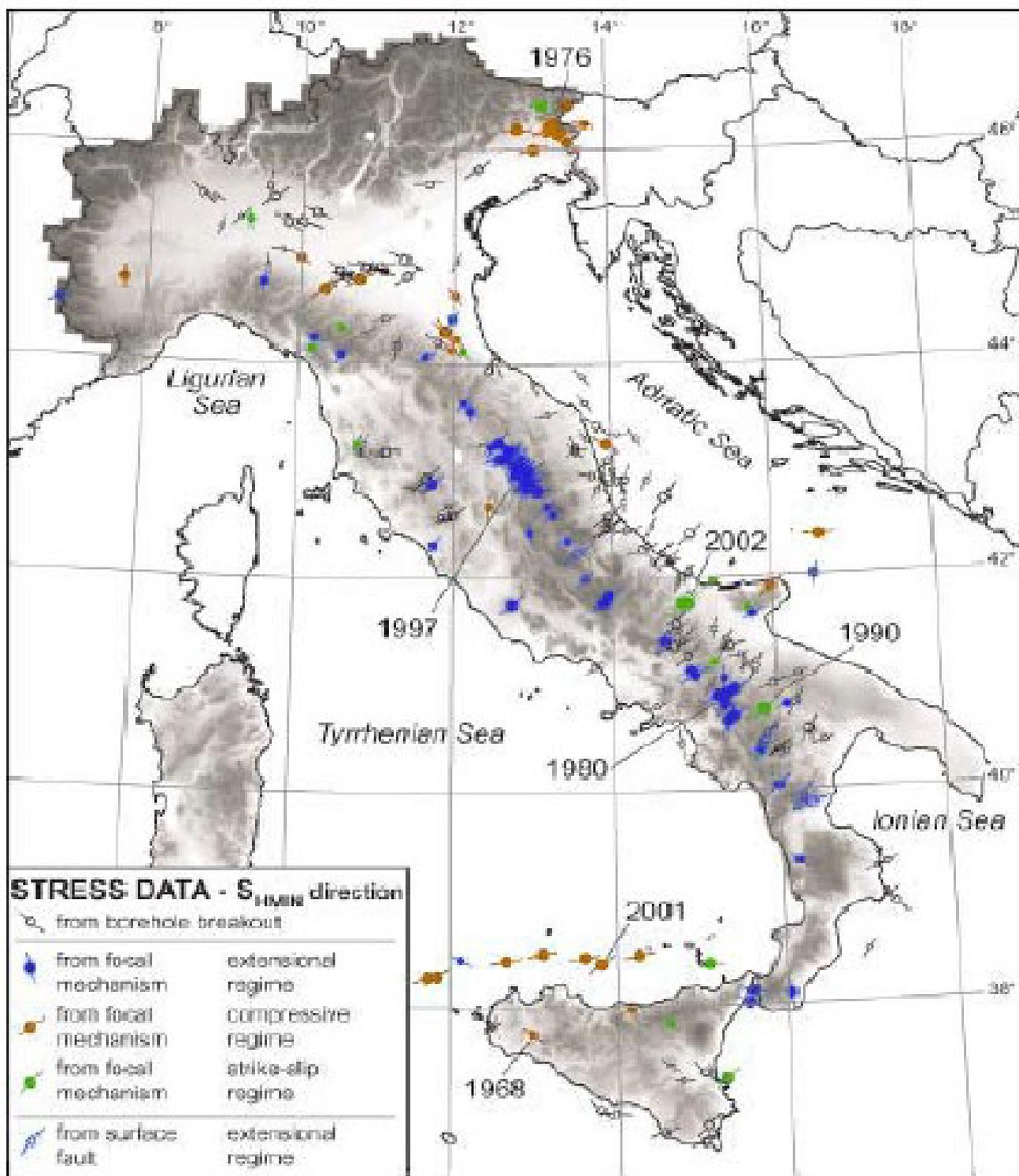


Figura 2-1 Mappa attiva di stress e posizione di terremoti recenti e significanti

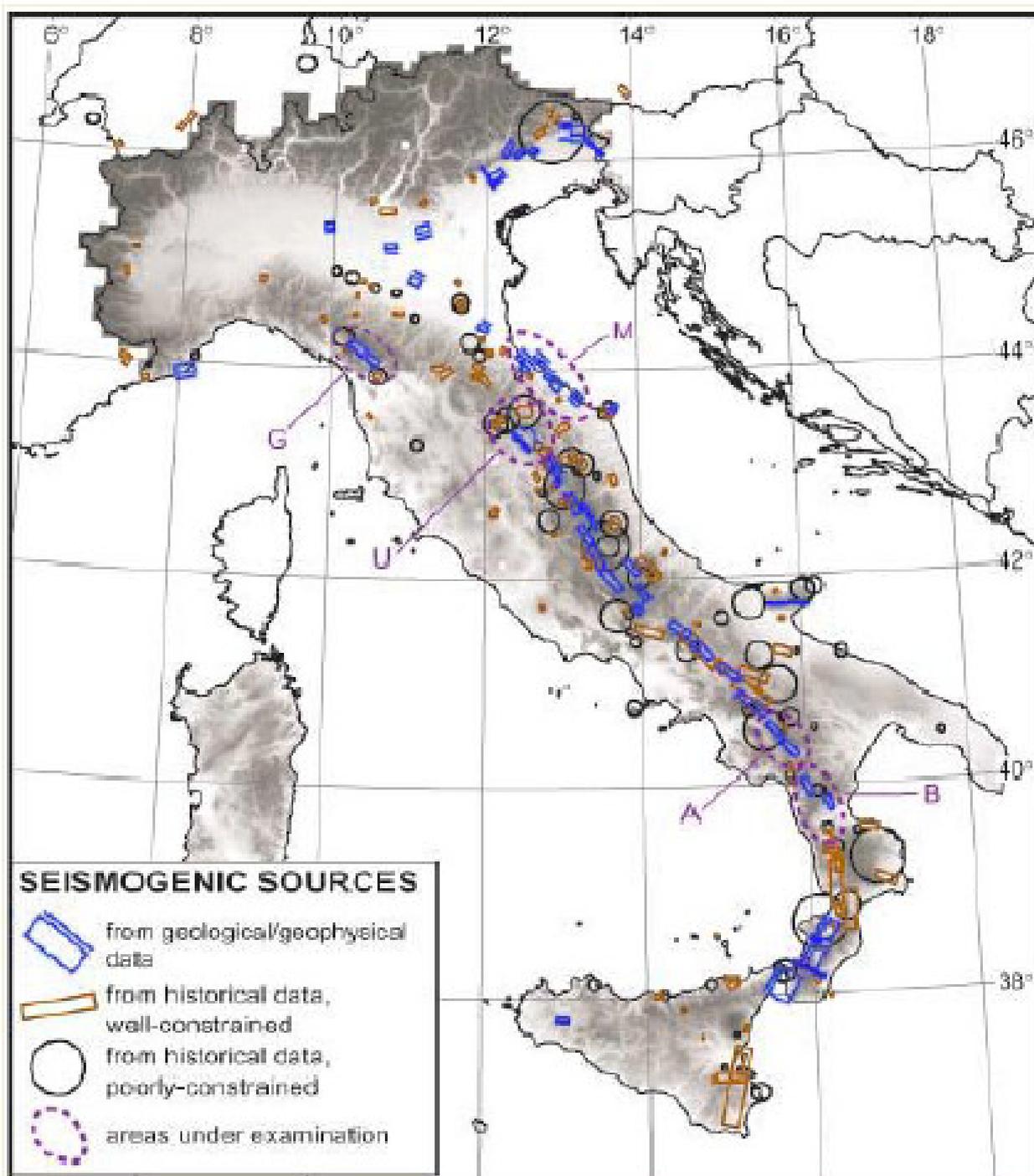


Figura 2-2 Principali andamenti delle fonti sismo-genetiche identificate

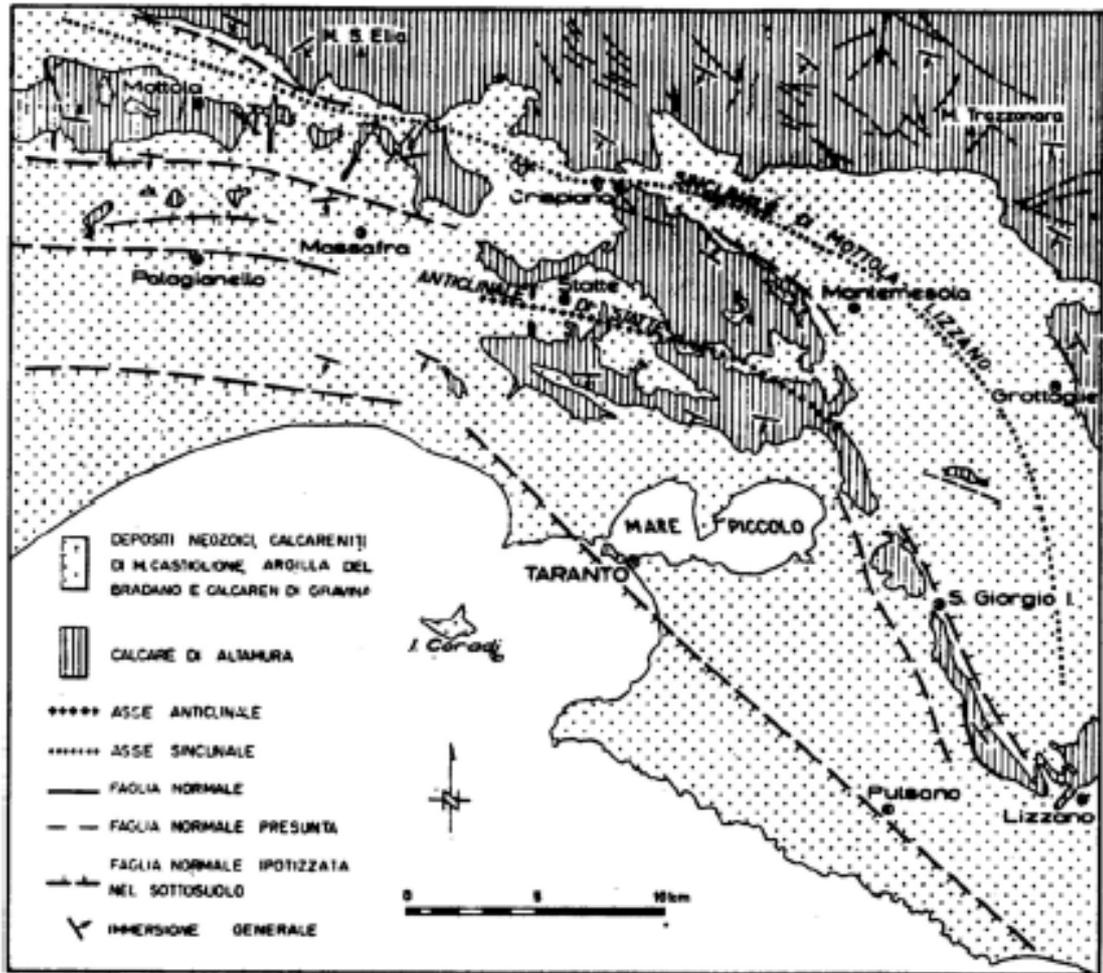


Figura 2-3 Schema tettonico locale di Taranto

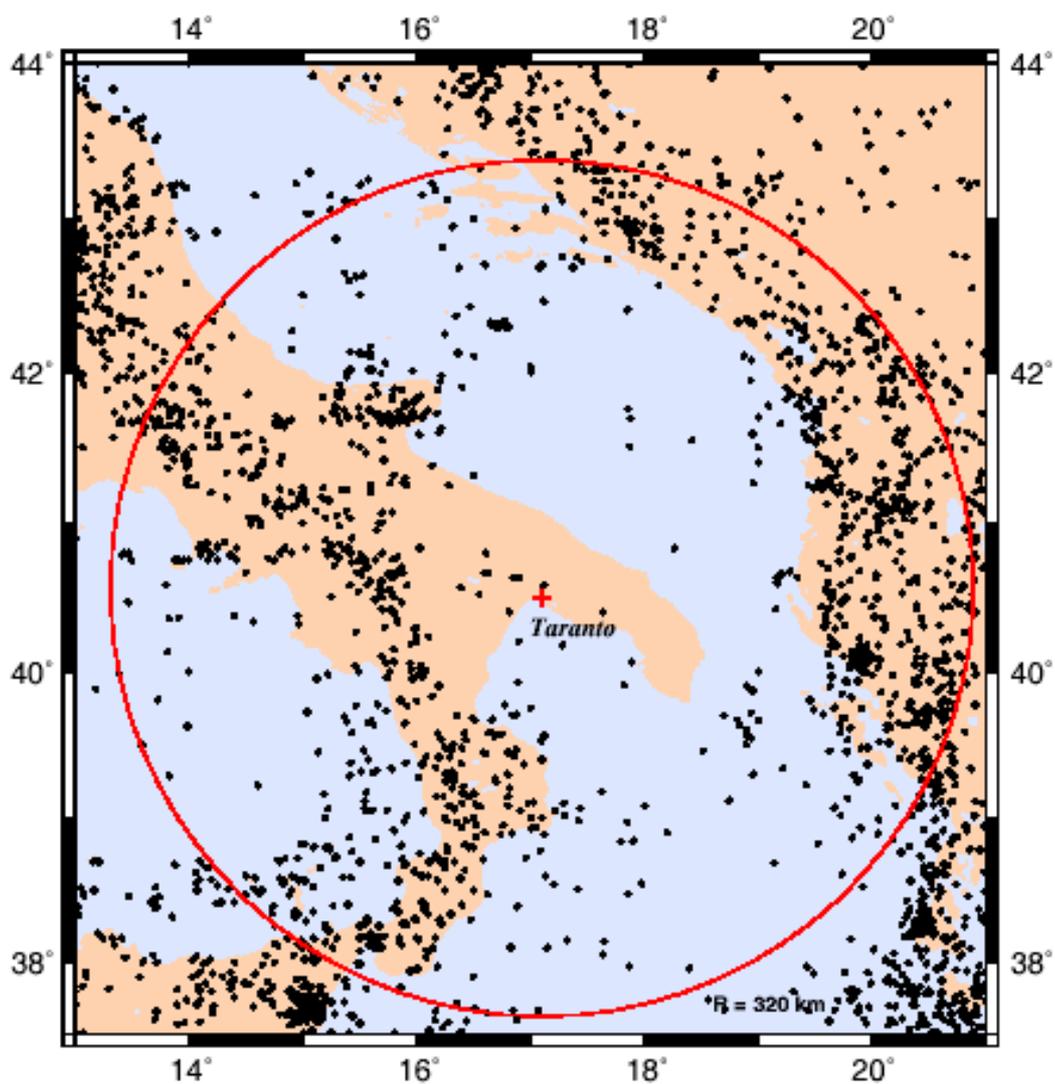


Figura 2-4 Epicentri dal catalogo storico degli eventi sismici

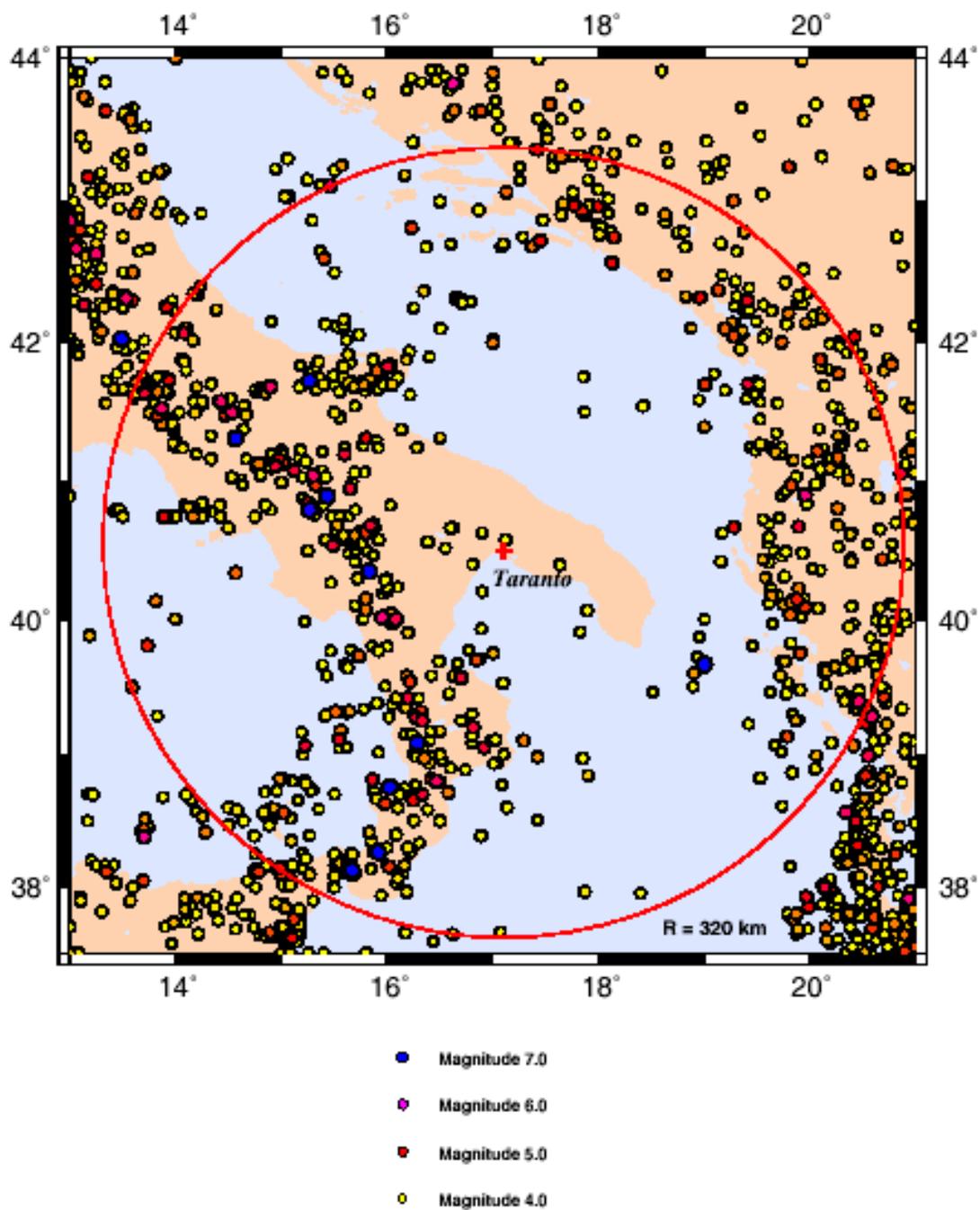


Figura 2-5 Epicentri con magnitudo maggiore di 4.0

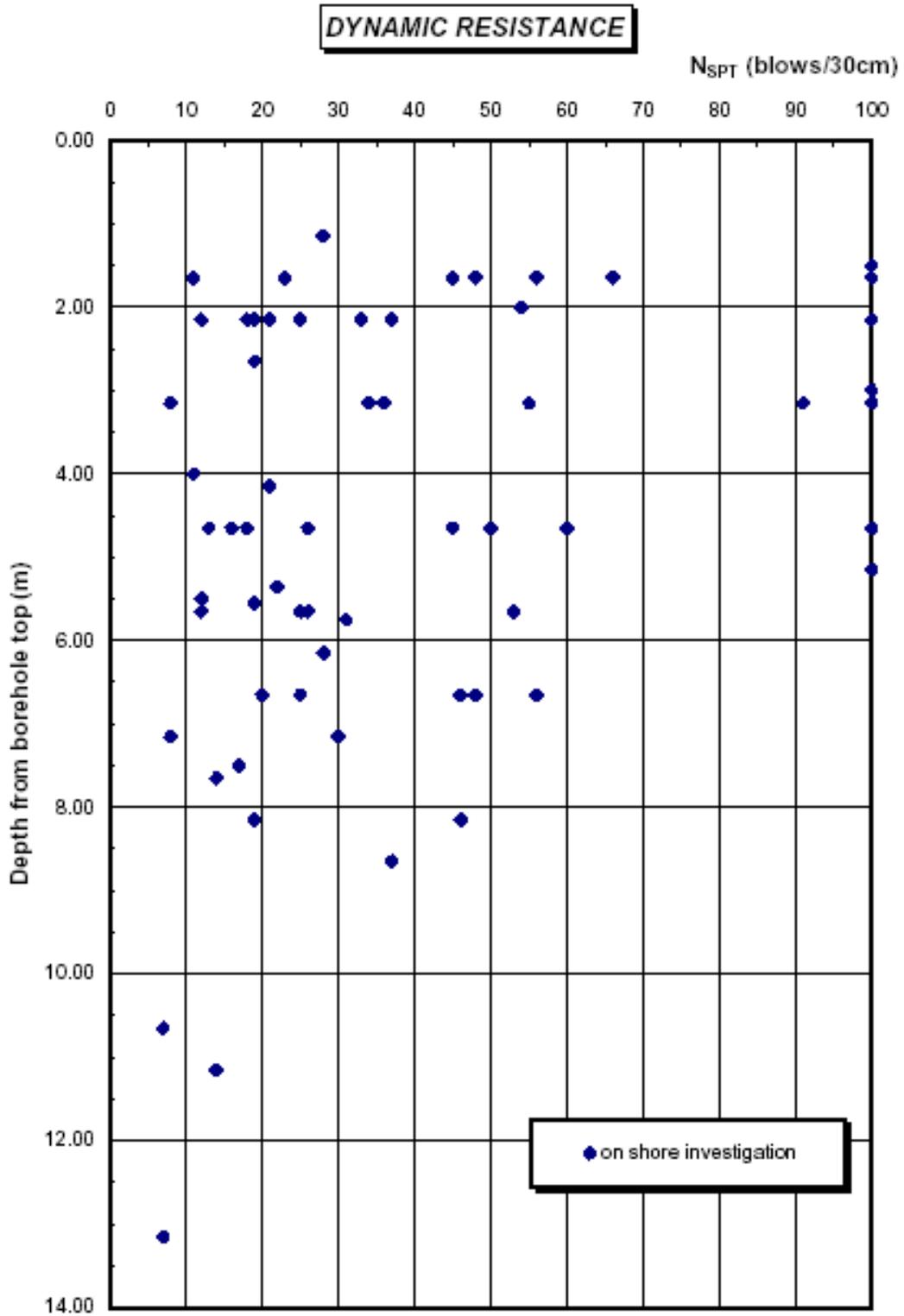


Figura 2-6 Dati SPT per serbatoi ed area dell'impianto

DOWN-HOLE (BH1)

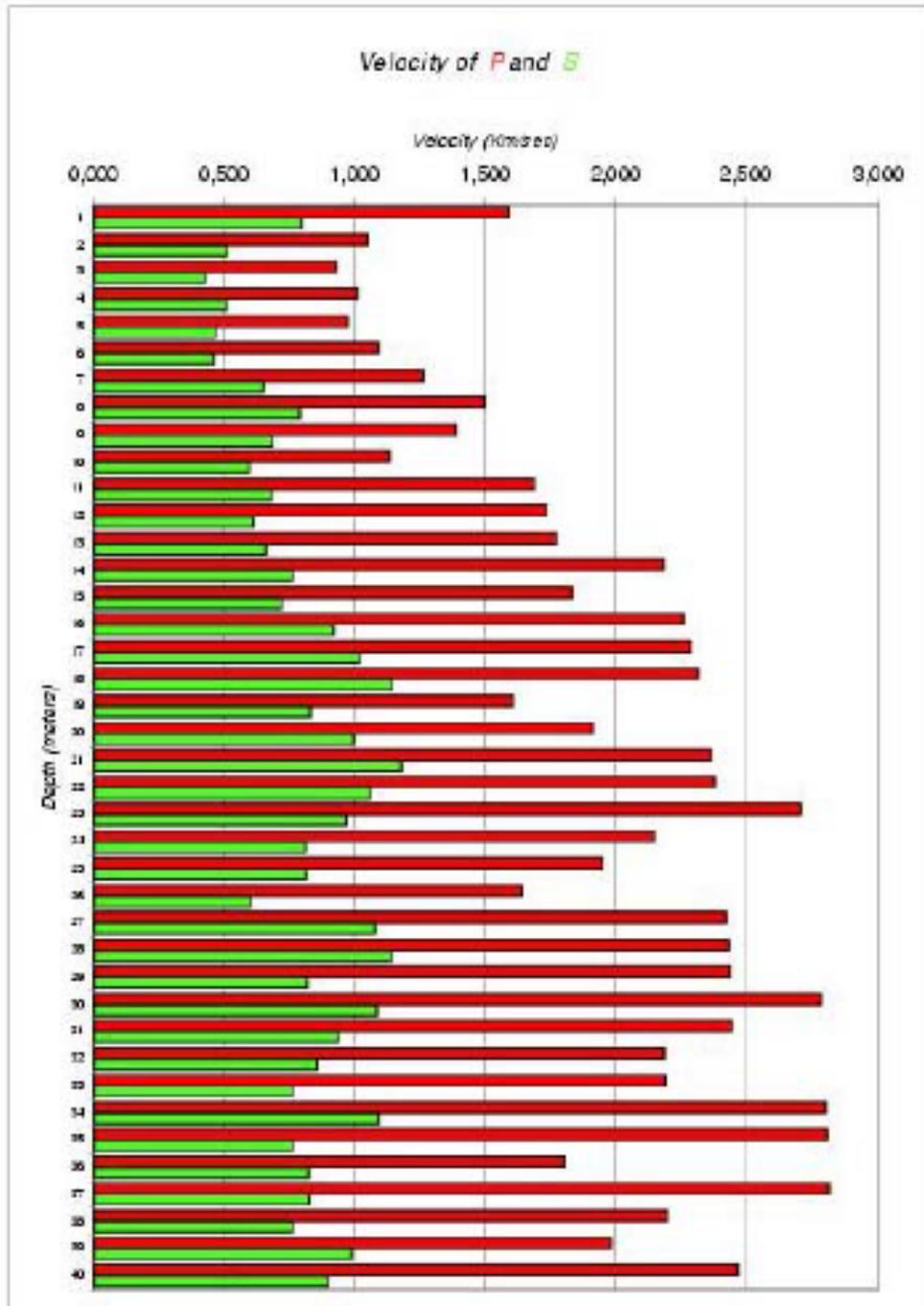


Figura 2-7 Velocità d'onda nel perforazione BH1

DOWN-HOLE (BHE)

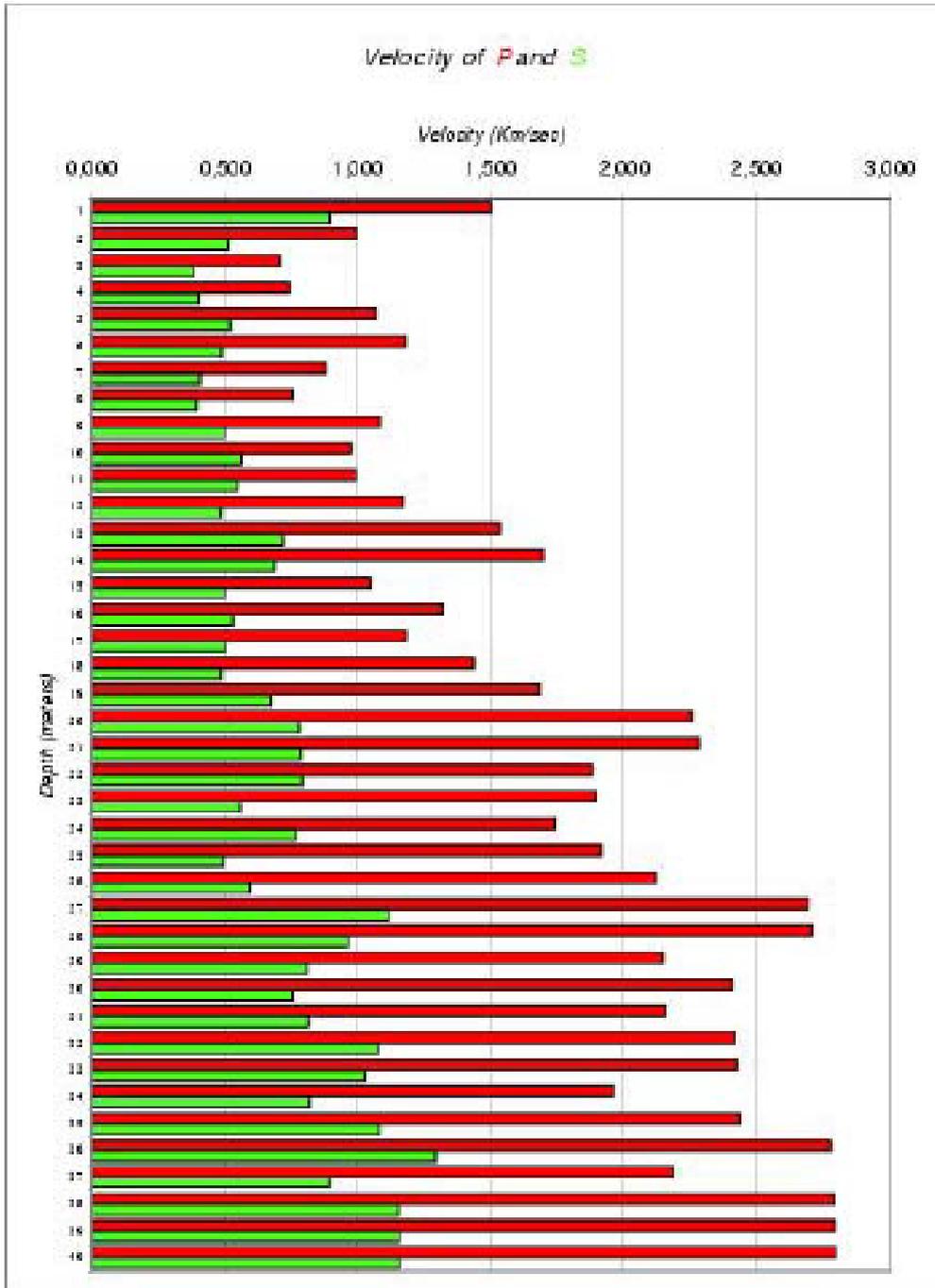


Figura 2-8 Velocità d'onda nel perforazione BH5

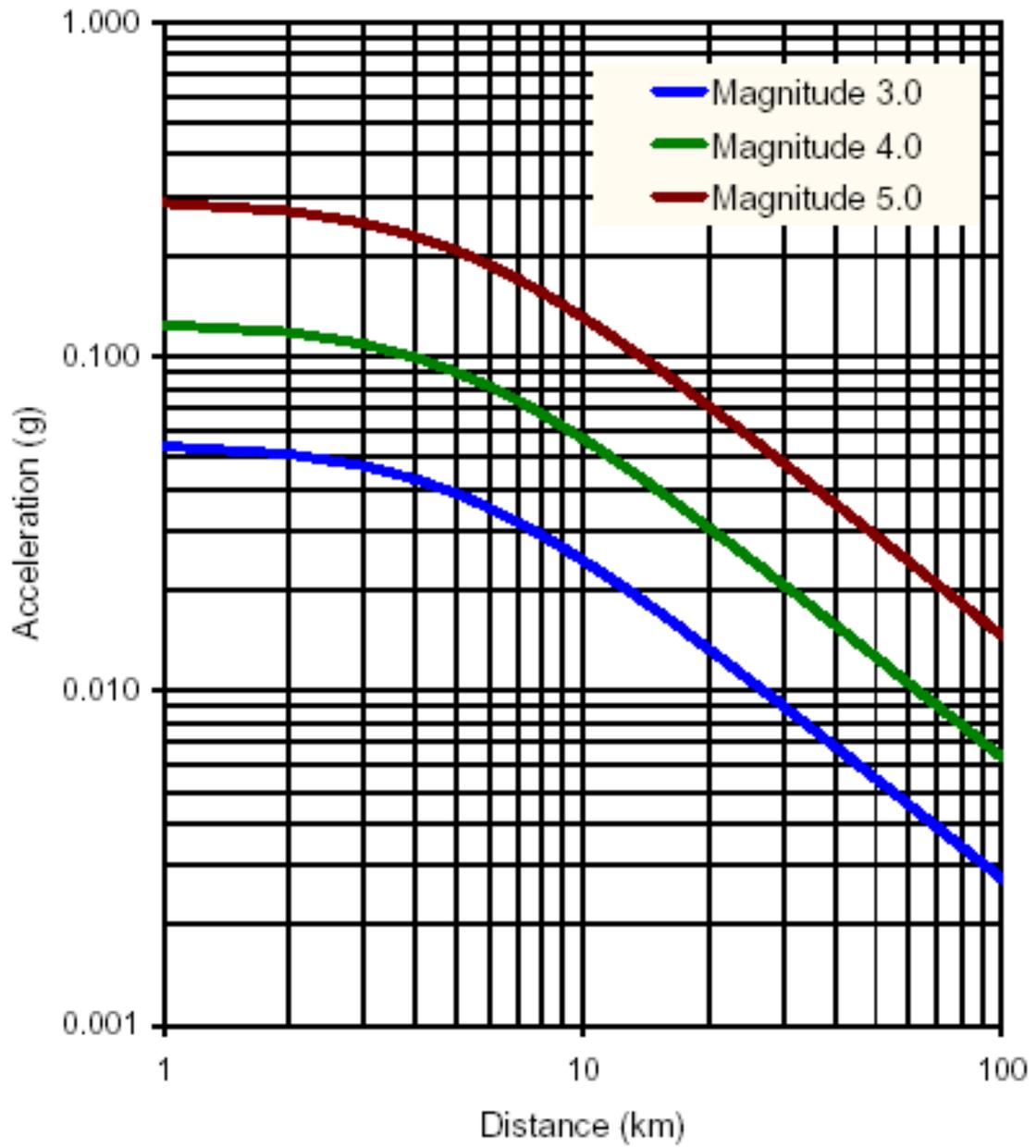


Figura 2-9 Legge di attenuazione di Sabetta e Pugliese (1987 e 1996)

### 3. VALUTAZIONE DEL RISCHIO

#### 3.1 Descrizione della metodologia

Il metodo zoneless utilizzato segue le idee proposte da Woo (1995, 1996a). L'implementazione numerica è quella nel programma del computer KERFRACT (Woo, 1996b). La procedura è la medesima già applicata per la determinazione di rischio sismico a tutti gli altri siti con serbatoi LNG in Spagna (Crespo e Martí, 2002).

I dati iniziali di base sono il catalogue degli epicentri passati e le loro magnitudo corrispondenti, insieme alla conoscenza del periodo effettivo di osservazione di ciascuna magnitudo. Ciò permetterà la costruzione di una rata di attività per ogni posizione ed evento di magnitudo.

La rata di attività stimata deve tenere conto della natura probabilistica del campione discreto fornito dal catalogo. Ciò è introdotto da una facilitazione statistica dei dati. La rata di attività viene ottenuta aggiungendo i contributi individuali di tutti gli eventi nel catalogue. La facilitazione viene raggiunta tramite una funzione kernel e tiene conto il periodo di ritorno dell'evento. Più specificamente, la rata di attività è espressa:

$$\lambda (M, \mathbf{x}) = \frac{\sum_{i=1}^{K(M, \mathbf{x}-\mathbf{x}_i)} K(M, \mathbf{x}-\mathbf{x}_i)}{T(\mathbf{x}_i)} \quad (3-1)$$

in cui  $M$  è la magnitudo dell'evento

$\mathbf{x}$  sono le coordinate della posizione dove la rata di attività è calcolata

$\mathbf{x}_i$  sono le coordinate dell'epicentro

$K$  è la funzione kernel

$T$  è il periodo di ritorno associato all'evento la cui contribuzione viene presa in considerazione

Una forma fattoriale della funzione kernel è usata, che può avere un carattere isotropico o una dipendenza direzionale. Una dipendenza Gaussiana sulla distanza permette di incorporare naturalmente l'inevitabile incertezza associata con posizioni epicentriche. Però, una legge di potenza (esponenziale) è quella che scaturisce dal carattere frattale della generazione dei terremoti.

Di seguito, una forma isotropica della funzione kernel, con una dipendenza di tipo esponenziale su distanza, verrà usata per la valutazione. La funzione kernel  $k$  prende la seguente forma:

$$K = \frac{n-1}{\pi H^n} \left[ 1 - \left( \frac{r}{H} \right)^2 \right]^{-n} \quad (3-2)$$

dove  $n$  è l'esponente della formula

$H$  è la larghezza di banda per distanze normalizzanti

$r$  è la distanza dall'epicentro

L'esponente  $n$  dipende dalla prossimità fra epicentri, che aumenta con la prossimità. Il suo valore, che sta normalmente tra 1.5 e 2, ha solamente un'influenza moderata sui risultati. Valori bassi come 1.25 sono possibili ma  $n$  non può essere meno di 1. La funzione kernel, con la crescita della distanza normalizzata  $r/H$ , si azzerava con la potenza  $-2n$  della distanza normalizzata.

La larghezza di banda  $H$  è una funzione di magnitudo. Rappresenta la distanza minima tra epicentri con la stessa magnitudo. La sua relazione con la magnitudo prende una forma esponenziale:

$$H = c e^{dM} \quad (3-3)$$

dove  $c$  e  $d$  sono costanti che devono essere determinate sulla base degli epicentri contenuti nel catalogo

$M$  è la magnitudo impiegata per la relazione di attenuazione.

### **3.2 Specificazione della funzione kernel**

Come descritto, la funzione kernel è definita completamente quando la larghezza di banda e l'esponente della formula sono specificati. La larghezza di banda è una funzione esponenziale di magnitudo (ved. eq. 3-3) che coinvolge due costanti  $c$  e  $d$ .

Per il caso sotto osservazione, basato sugli epicentri situati entro un circolo centrato a Taranto e con un raggio di 320 km, i passi seguenti sono stati presi in considerazione:

- a) gli eventi sono classificati in gruppi secondo la loro magnitudo
- b) per ciascun evento, viene determinata la distanza dall'epicentro più vicino con la medesima magnitudo
- c) tutte le distanze minime vengono calcolate in maniera approssimativa per ciascuna magnitudo
- d) un'affinamento del calcolo viene effettuato per l'ottenimento dei due parametri  $c$  e  $d$  che compaiono nell'equazione 3-3:  $c = 0.043$  km e  $d = 1.229$ .

La Figura 3-1 presenta la più significativa scossa del catalogo data con l'utilizzo di una linea retta. La linea è caratterizzata dai suoi due parametri, che in questo caso hanno valori pari a  $c = 0,043$  km e  $d=1,229$ . Siccome la scossa è piuttosto intensa, non si ritiene necessario condurre analisi di sensitività secondo questi valori. In ogni caso, l'esponente  $n$  verrà associato ad un'analisi di sensitività.

### 3.2 Periodi di localizzazione effettivi

Ogni evento deve essere assegnato ad un periodo di osservazione a seconda della sua magnitudo, cioè, una soglia di potenziale registrabilità storica se accaduto. Una distribuzione temporale degli eventi nel catalogo viene mostrata nella Figura 3-2 per tutti gli eventi e nella Figura 3-3 per i più recenti.

La procedura di Woo (1966) richiede l'assegnazione di un anno di referenza per ciascun sisma; ciò misura la probabilità di scoprire terremoti con caratteristiche identiche in tempi diversi. L'anno di referenza dipende dalle caratteristiche specifiche del terremoto. Gli aspetti seguenti verranno presi in considerazione:

- magnitudo  $M$
- posizione epicentrica: on-shore o off-shore
- anno

Terremoti che abbiano gli stessi tre criteri sopra descritti vengono riferiti allo stesso anno.

La magnitudo e l'anno di ciascun terremoto vengono presi in considerazione per determinare il periodo effettivo del terremoto come segue:

- a) la storia viene suddivisa in intervalli di tempo come mezzo di localizzazione disponibile ad ogni epoca
- b) per ciascun intervallo con durata  $D_i$  e ciascun livello di magnitudo  $M$ , una probabilità di localizzazione  $P_{im}$  è stimata sulle possibilità offerte dalla tecnologia disponibile.
- c) un anno di referenza  $A_m$  è stabilito per ciascun livello di magnitudo:

$$A_m = A_0 - \sum_i P_{im} D_i \quad (3-3)$$

dove  $A_0$  è il primo anno di registrazione

Il processo viene effettuato separatamente per epicentri on-shore ed off-shore. Si presume che quest'ultimo diventi localizzabile nell'era di strumentazione ed abbia per cui probabilità zero di localizzazione prima di quell'era.

Avendo condotto questo esercizio, gli anni di referenza assegnati ai vari terremoti appaiono nella Tabella 3-1.

Terremoti Onshore		Terremoti Offshore	
Magnitudo	Anno di riferimento	Magnitudo	Anno di riferimento
> 5.5	1425	> 5.5	1825
5.0 - 5.5	1650	5.0 - 5.5	1825
4.5 - 5.0	1825	4.5 - 5.0	1855
4.0 - 4.5	1895	4.0 - 4.5	1916
3.5 - 4.0	1916	3.5 - 4.0	1953
3.0 - 3.5	1962	3.0 - 3.5	1974

Tabella 3-1 Anni di referenza per diverse intensità degli eventi

### 3.3 Rischio sismico del sito

L'applicazione della metodologia descritta in sezioni precedenti produce i risultati, direttamente in termini di accelerazione, per ciascun periodo di ritorno o probabilità annuale di eccesso. La legge di attenuazione usata corrisponde al suolo poco profondo proposto da Sabetta e Pugliese (1987 e 1996), come spiegato nella sezione 2.6. Le accelerazioni ottenute sono riferite al periodo zero.

La curva di rischio, che mette in relazione le accelerazioni alle diverse probabilità di occorrenza, viene mostrata nella Figura 3-4. Le maggiori presupposizioni usate nella sua derivazione sono:

- Esponente nella funzione kernel:  $n = 1.75$ .
- Parametri della larghezza di banda:  $c = 0.043$  km e  $d = 1.229$ .

I parametri della larghezza di banda presentavano pochissime incertezze e c'è dunque poca giustificazione per lo studio della sensitività dei risultati alle variazioni in quei parametri. L'esponente, comunque, è leggermente più incerto. Per cui, a parte il valore centrale  $n=1,75$ , i calcoli sono stati ripetuti con 1.50 e con 2. Le curve corrispondenti sono tutte tracciate insieme nella Figura 3-5; come si può notare, gli effetti della variazione dell'esponente riguardo la sua estensione di potenza sono molto limitate, in tal modo si rafforza l'affidabilità delle scoperte.

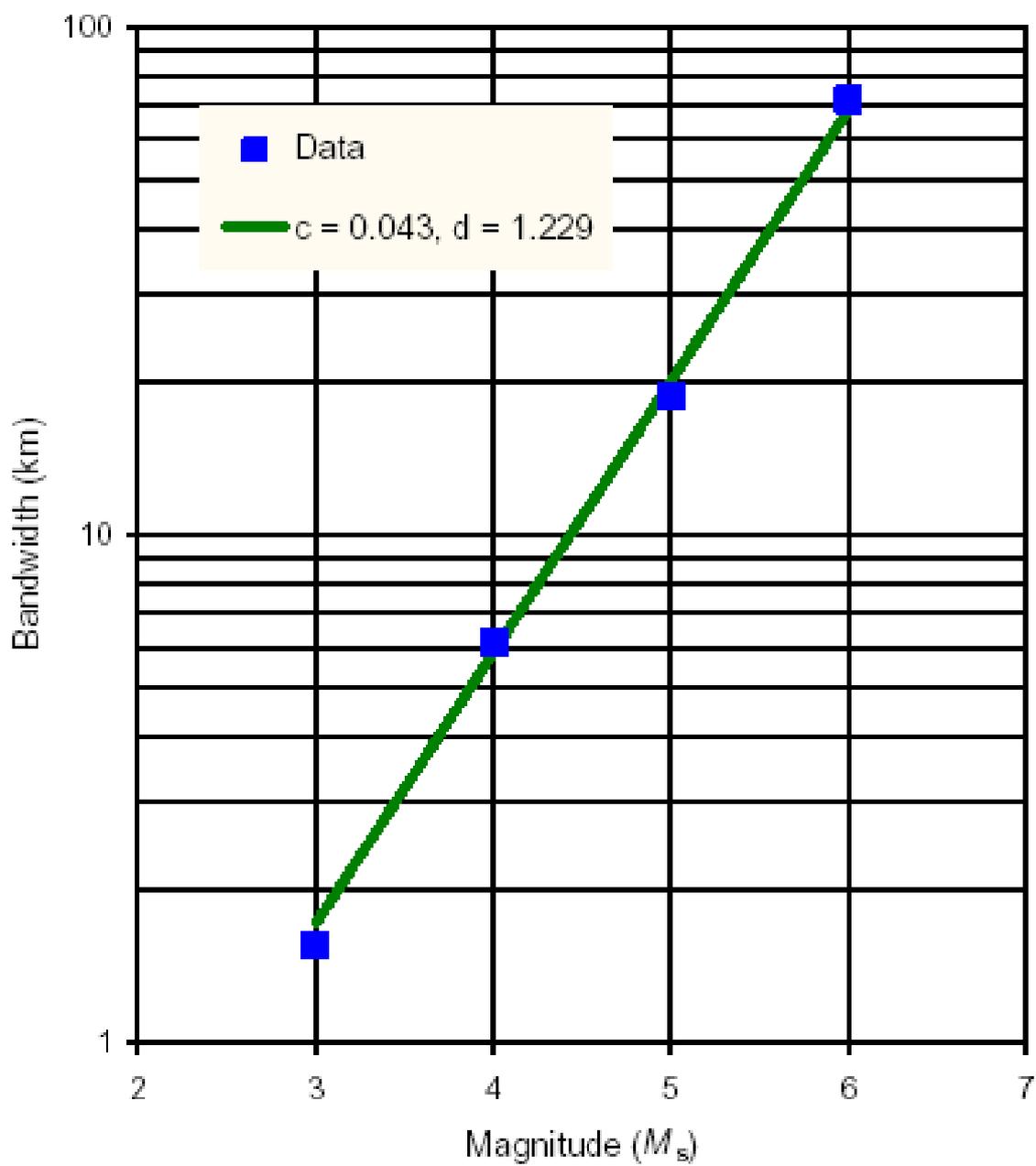


Figura 3-1 Curve per larghezza di banda

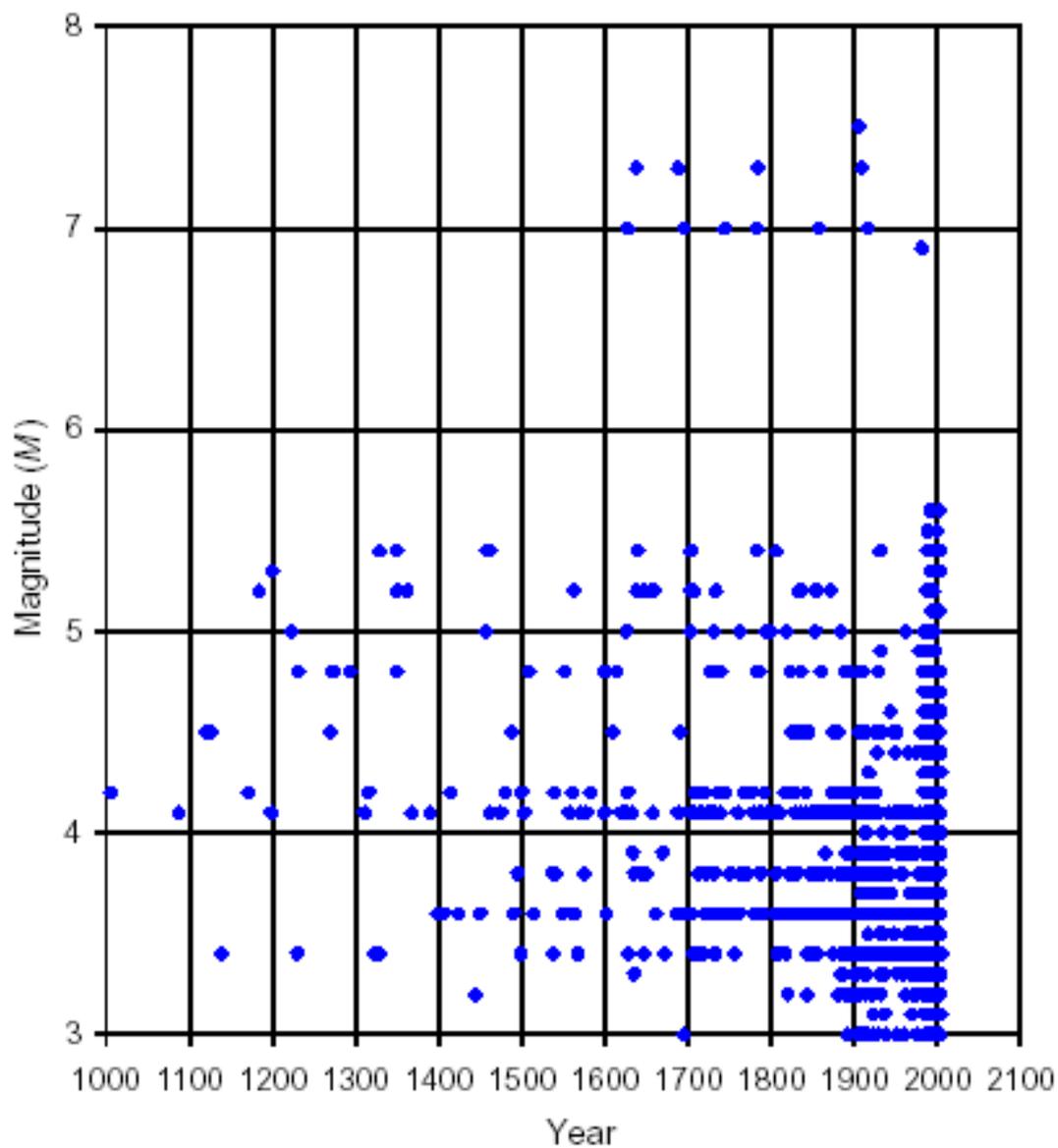


Figura 3-2 Distribuzione temporale della magnitudo dall'anno 1000

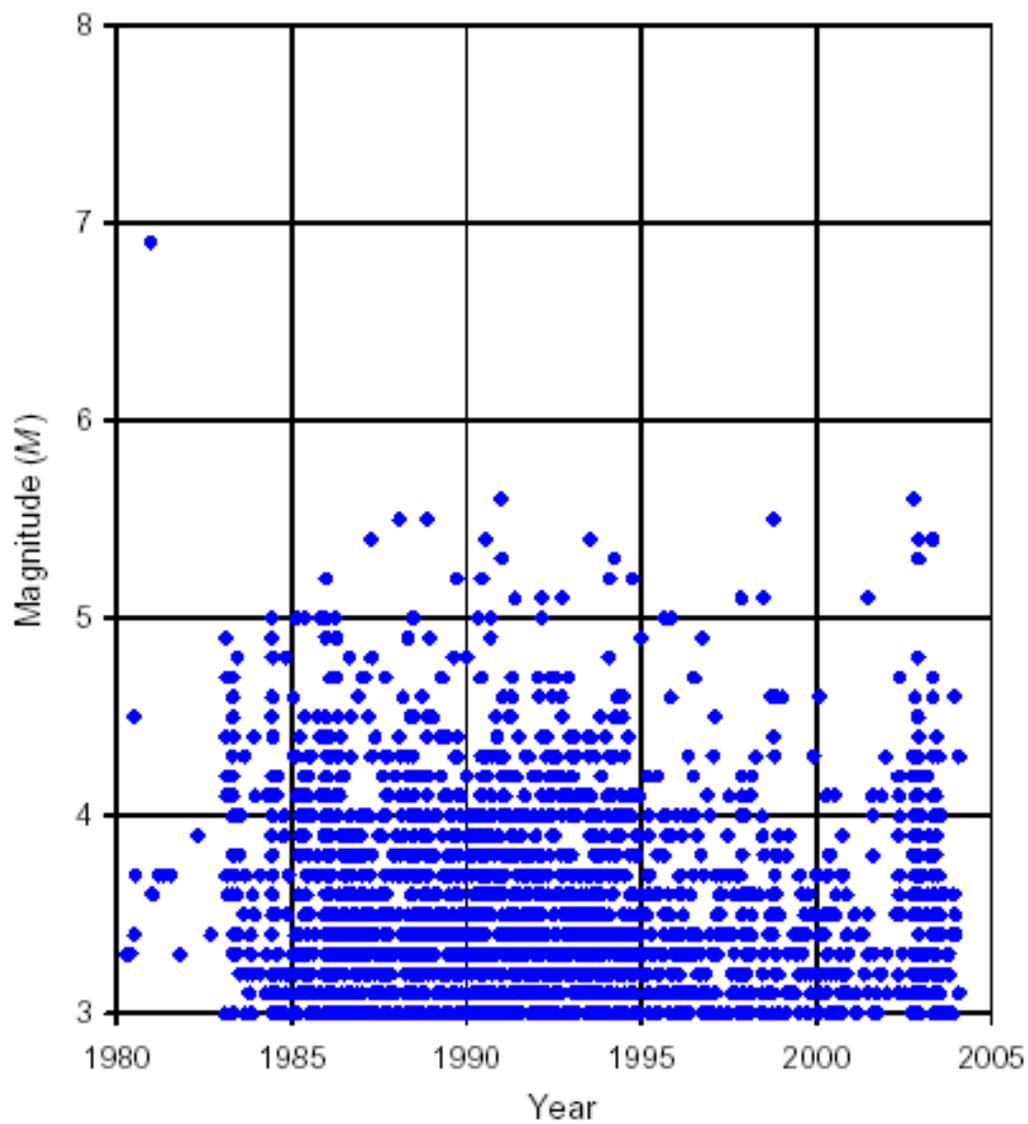
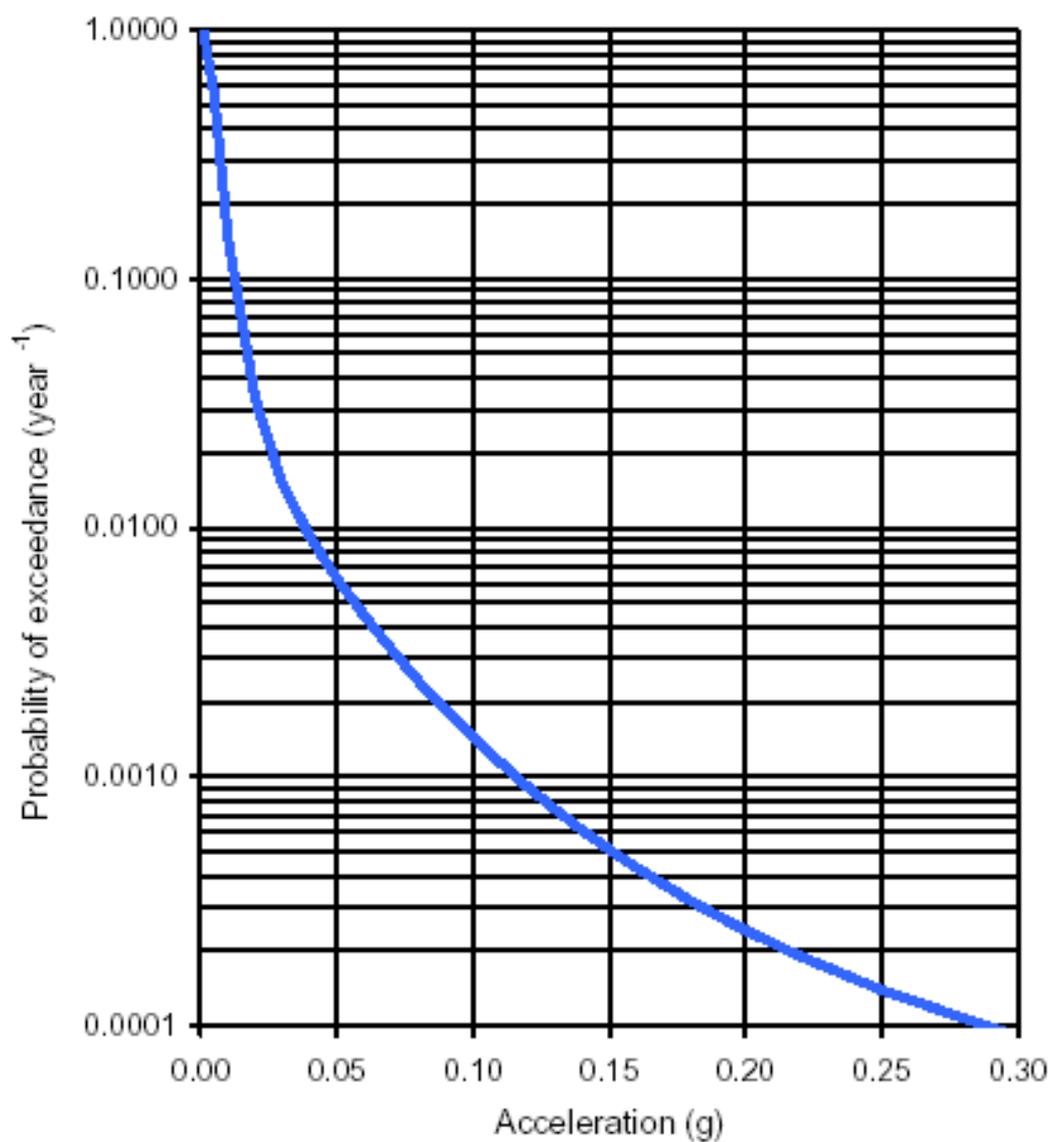


Figura 3-3 Distribuzione temporale della magnitudo dall'anno 1980

Figura 3.4 Accelerazione dello spettro,  $T = 0s$

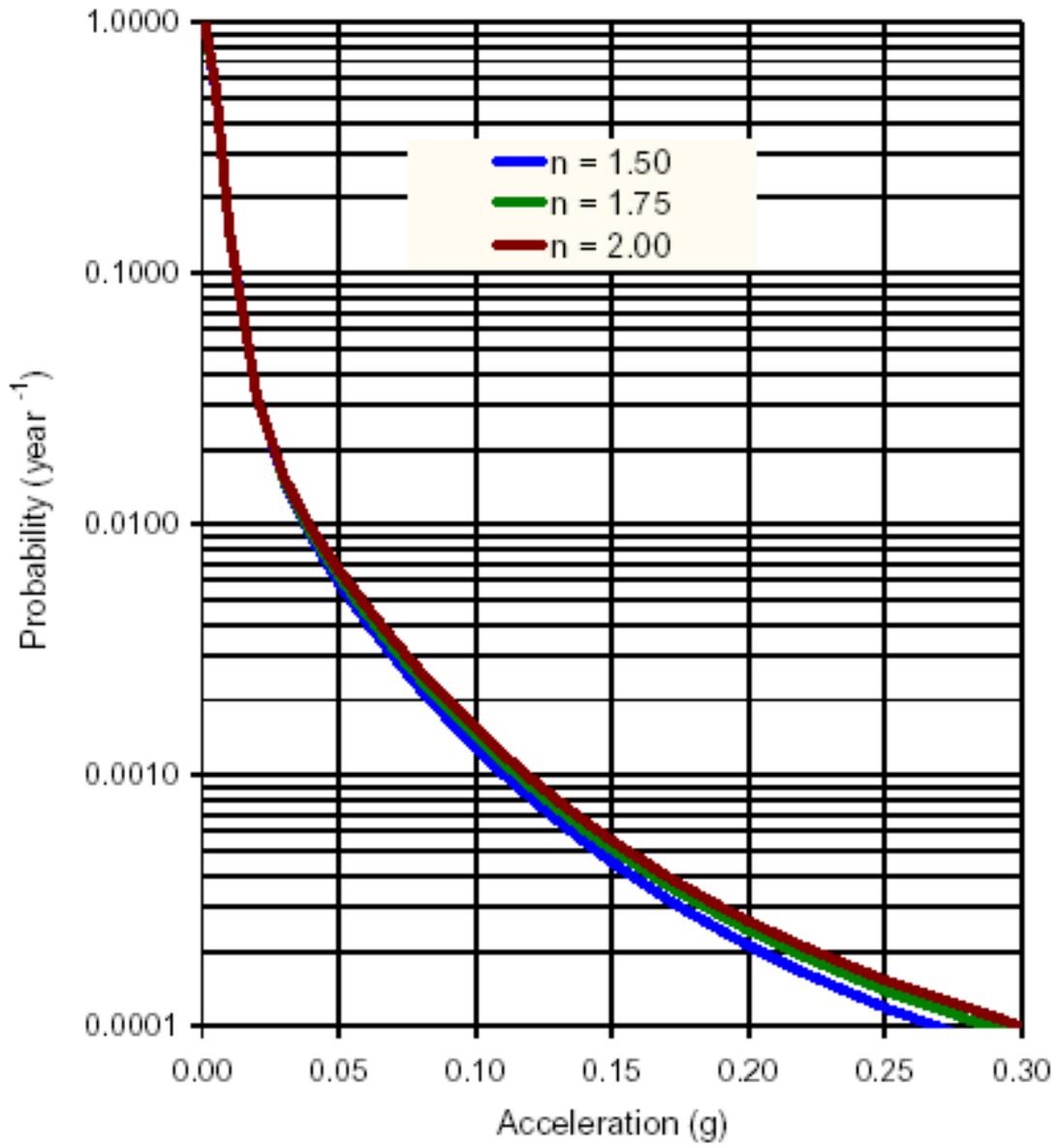


Figura 3-5 Sensibilità all'esponente

## 4. ANALISI DI PROGETTO

### 4.1 Calcolo delle accelerazioni

La curva di rischio sismico per il sito è stata già trattata nel capitolo precedente. Per l'analisi di progetto, però, questa informazione deve essere combinata con i periodi corrispondenti in modo da arrivare al picco di accelerazione per i movimenti OBE e SSE.

I periodi di ritorno dei due eventi sismici di riferimento sono 475 anni per l'OBE e 10,000 anni per il SSE. Quest'ultimo periodo è quello adottato dal NFPA 59-A fino al 2001 e l'EN 1473 è tuttora in vigore. Questo periodo può essere considerato conservativo, dato che la revisione del NFPA 59-A dà un valore più basso di riferimento. In ogni caso, un valore maggiore è assegnato dall'applicazione della norma EN 1473 per questo progetto.

Come riportato nella Figura 4-1, l'accelerazione di picco riguardante il già citato periodo di ritorno è 0.09g per l'OBE e 0.29g per l'SSE. L'accelerazione risultante per 475 anni del periodo di ritorno è il range stabilito dall'OPCM (2003) per Taranto (codice 16073027, zona 3); la legge Italiana attribuisce valori compresi tra 0.05g e 0.15g per questo sito. L'accelerazione OBE riguarda anche le scoperte del Servizio Sismico Nazionale presentate nella Figura 4-2.

### 4.2 Spettri di risposta specifica del sito

La risposta specifica del sito descrive la frequenza di distribuzione del movimento terrestre. È definita come il movimento amplificante che un oscillatore elementare sperimenterebbe come funzione della frequenza sintonizzata.

OPCM (2003) stabilisce cinque profili di terreno, caratterizzati in termini dei valori locali della velocità di onda di taglio. In questo studio gli spettri e accelerogrammi verranno sviluppati per un terreno classificato come tipo B nell'OPCM (2003); questa decisione ha a che fare con i risultati dell'investigazione geotecnica del sito (Soil, 2005), che è stata già presentata succintamente nella sezione 2.5. Questo tipo di terreno consiste di depositi di sabbia molto densa, ghiaia, o argilla molto dura, con parecchi metri di spessore, caratterizzata da un aumento graduale di proprietà meccaniche con profondità; il la velocità di onda shear media ni 30 metri superiori è compresa tra 360 e 800m/s.

Per ogni profilo di terreno, l'OPCM (2003) definisce la forma degli spettri tramite 4 segmenti. In questo caso i quattro segmenti dello spettro sono descritti con le seguenti equazioni, a seconda del periodo  $T$ :

a) for  $T < T_B$

$S_e(T)$        $T$

$$\frac{S_e(T)}{S \cdot a_g} = 1.0 + \frac{1}{T_B} \cdot (\eta \cdot 2.5 - 1) \quad (4-1)$$

b) for  $T_B < T < T_C$

$$\frac{S_e(T)}{S \cdot a_g} = \eta \cdot 2.5 \quad (4-2)$$

c) for  $T_C < T < T_D$

$$\frac{S_e(T)}{S \cdot a_g} = \eta \cdot 2.5 \left[ \frac{T_C}{T} \right] \quad (4-3)$$

d) for  $T_D < T$

$$\frac{S_e(T)}{S \cdot a_g} = \eta \cdot 2.5 \left[ \frac{T_C \cdot T_D}{T^2} \right] \quad (4-4)$$

Il fattore di correzione dello smorzamento  $\eta(\xi)$  è espresso come una funzione del rapporto di smorzamento  $\xi$  tramite la seguente equazione:

$$n = \sqrt{\frac{10}{5 + \xi}} \quad (4-5)$$

e non può essere minore di 0.55.

Nelle espressioni precedenti,  $S \cdot a_g$  è l'accelerazione massima del terreno del sito come discusso nella sezione 4.1, dove il fattore  $S = 1.25$  prende in considerazione il profilo del terreno;  $T_B$  e  $T_C$  dipendono dalle caratteristiche del terreno (in questo caso  $T_B = 0,15$  s e  $T_C = 0,5$  s) e  $T_D = 2$  s è il periodo oltre il quale lo spettro corrisponde a deriva costante. Lo spettro orizzontale per l'OBE e per l'SSE con  $\xi = 5\%$  sono mostrati nella Figura 4-3.

Lo spettro dei movimenti verticali viene definito nell'OPCM (2003) come:

a) for  $T < T_{BV}$

$$\frac{S_{eV}(T)}{S \cdot a_g} = \frac{1}{S} \cdot 0.9 S_V \left[ 1.0 + \frac{T}{T_{BV}} (\eta \cdot 3.0 - 1) \right] \quad (4-6)$$

b) for  $T_{BV} < T < T_{CV}$

$$\frac{S_{eV}(T)}{S \cdot a_g} = \frac{1}{S} \cdot 0.9 \cdot S_V \cdot \eta \cdot 3.0 \quad (4-7)$$

c) for  $T_{CV} < T < T_{DV}$

$$\frac{S_{eV}(T)}{S \cdot a_g} = \frac{1}{S} \cdot 0.9 \cdot S_V \cdot \eta \cdot 3.0 \cdot \left[ \frac{T_{CV}}{T} \right] \quad (4-8)$$

d) for  $T_{DV} < T$

$$\frac{S_{eV}(T)}{S \cdot a_g} = \frac{1}{S} \cdot 0.9 \cdot S_V \cdot \eta \cdot 3.0 \cdot \left[ \frac{T_{CV} T_{DV}}{T^2} \right] \quad (4-9)$$

In questo caso  $S_V = 1.0$ ,  $T_{BV} = 0.05$  s,  $T_{CV} = 0.15$  s e  $T_{DV} = 1.0$  s.

Gli spettri verticali per l'OBE e per l'SSE con  $\xi=5\%$  sono mostrati nella Figura 4-4.

#### 4.3 Accelerogrammi compatibili

Per la generazione di accelerogrammi sintetici, oltre alle accelerazioni e spettri già prodotti, è necessario specificare la durata. Per ottenere una durata, le magnitudo e le distanze epicentriche più probabili sono state trovate sia per l'OBE che per l'SSE. I risultati sono i seguenti:

- per l'OBE: magnitudo 5.5 a 24 km
- per l'SSE: magnitudo 6.9 a 24 km

Dopodiché, un numero di correlazioni tratte da pubblicazioni specializzate è stato impiegato per la valutazione delle durate più probabili dei movimenti. La dispersione delle previsioni scaturite dalle varie correlazioni è un riflesso della considerevole incertezza di tali formule.

Per la durata totale dell'OBE, i risultati prodotti usando le varie correlazioni sono:

- Esteva e Rosenblueth (1964): 8 s
- Housner (1965): 9 s
- Dobry *et al* (1978): 3 s
- Trifunac e Brady (1975): 12 s

Per la durata totale dell'SSE, seguono i risultati corrispondenti:

- Esteva e Rosenblueth (1964): 11 s
- Housner (1965): 24 s
- Dobry *et al* (1978): 14 s
- Trifunac e Brady (1975): 15 s

Comunque, la nuova legge Italiana ha un approccio piuttosto conservativo alla specificazione della durata sismica per eventi piccoli e moderati, perché prescrive una durata minima di 25 s per tutti gli eventi. Questa durata è maggiore di quelle previste dalle correlazioni esistenti ed è stata quindi adottata sia per i movimenti dell'OBE che per quelli dell'SSE.

La generazione di accelerogrammi sintetici è stata basata sull'uso del seguente software:

- SIMQKE (Gasparini, 1975), che genera accelerogrammi che si addicono approssimativamente allo scopo dello spettro di risposta
- POSTQUAKE (Woo, 1987), un programma basato sulla metodologia suggerita da Kaul (1978), che spinge gli acceleratori SIMQKE a diminuire le deviazioni dallo spettro target al di sotto di una tolleranza specifica (10% in questo caso).

La storia dei movimenti deve essere divisa in tre fasi: movimenti in aumento (increasing ramp), movimenti forti (plateau) e movimenti in diminuzione (decreasing ramp). La durata totale è stata distribuita nello stesso modo sia per l'OBE che per l'SSE accelerogrammi. La durata di ciascuna delle tre fasi è:

- Increasing ramp: 5,0 s
- Plateau: 12,5 s
- Decreasing ramp: 7,5 s

Come richiesto dalla normativa Italiana, tre diversi accelerogrammi sono stati generati per ciascuno dei quattro spettri design presentati nelle Figure 4-3 e 4-4; essi appaiono dalla Figura 4-5 fino alla 4-6 per l'SSE e 4-8 per l'OBE. Gli accelerogrammi sintetici soddisfano il criterio dell'ASCE Standard 4-98 (ASCE, 1999).

Le figure che vanno dalla 4-9 alla 4-12 sono sovrapposte, per ciascuno dei quattro tipo di evento sismico in oggetto, lo spettro target e quello corrispondente agli accelerogrammi sintetici. È chiaro che lo spettro degli accelerogrammi rientra bene nello spettro di progetto.

Si dovrebbe notare che gli accelerogrammi generati rientrano nello spettro design con un rateo di scarico del 5%, valore intermedio tra gli scarichi strutturali del serbatoio. È noto che ciò che rientra in un certo valore di scarico non garantisce che ciò sia mantenuto per altri valori;

l'approssimazione si deteriora normalmente con l'aumento della differenza di scarico. A conseguenza di ciò, se il rateo di scarico è molto diverso dal 5%, gli accelerogrammi forniti non devono essere usati senza verificare che l'approssimazione allo spettro di progetto sia accettabile per il rapporto di smorzamento in oggetto.

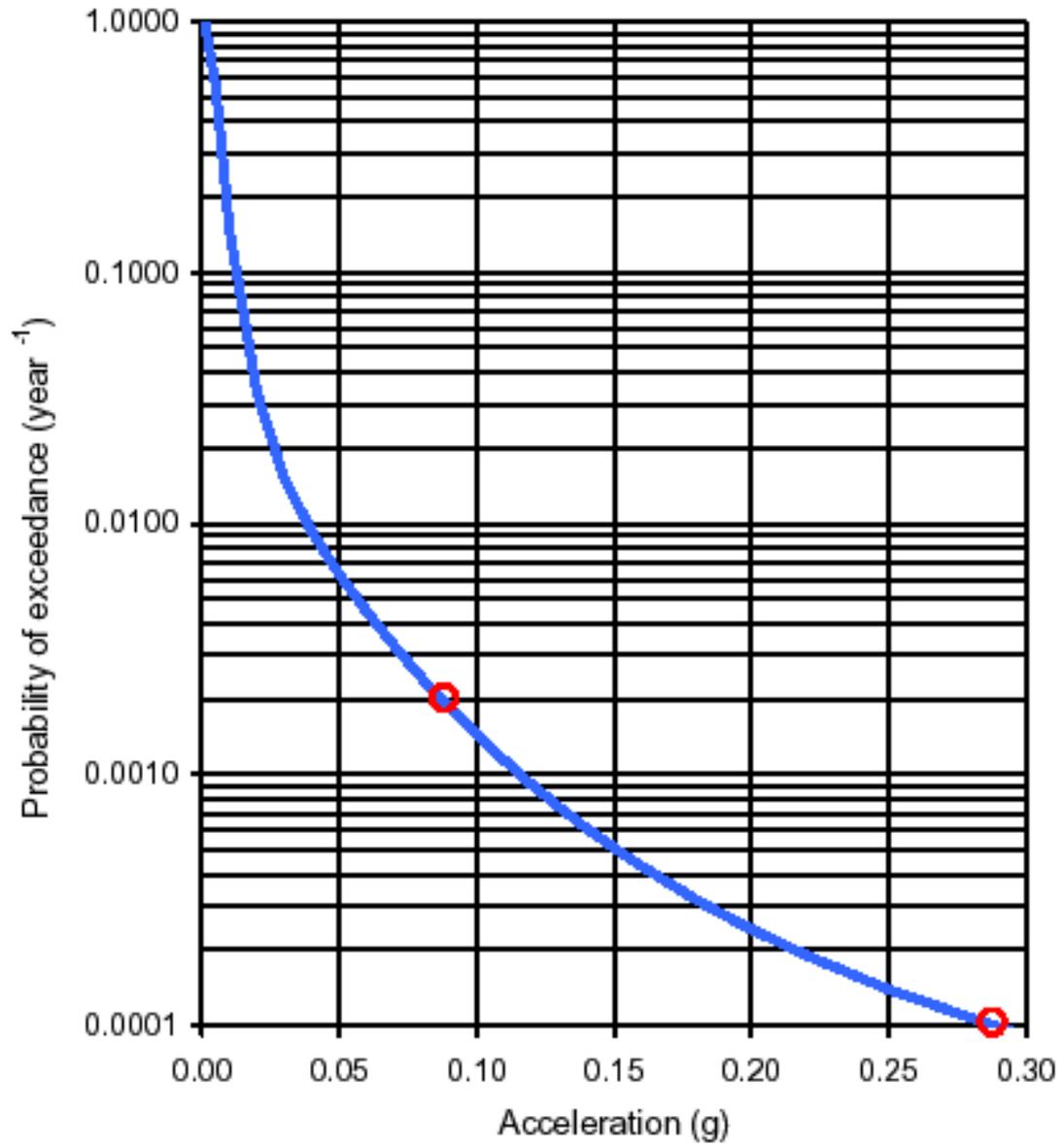
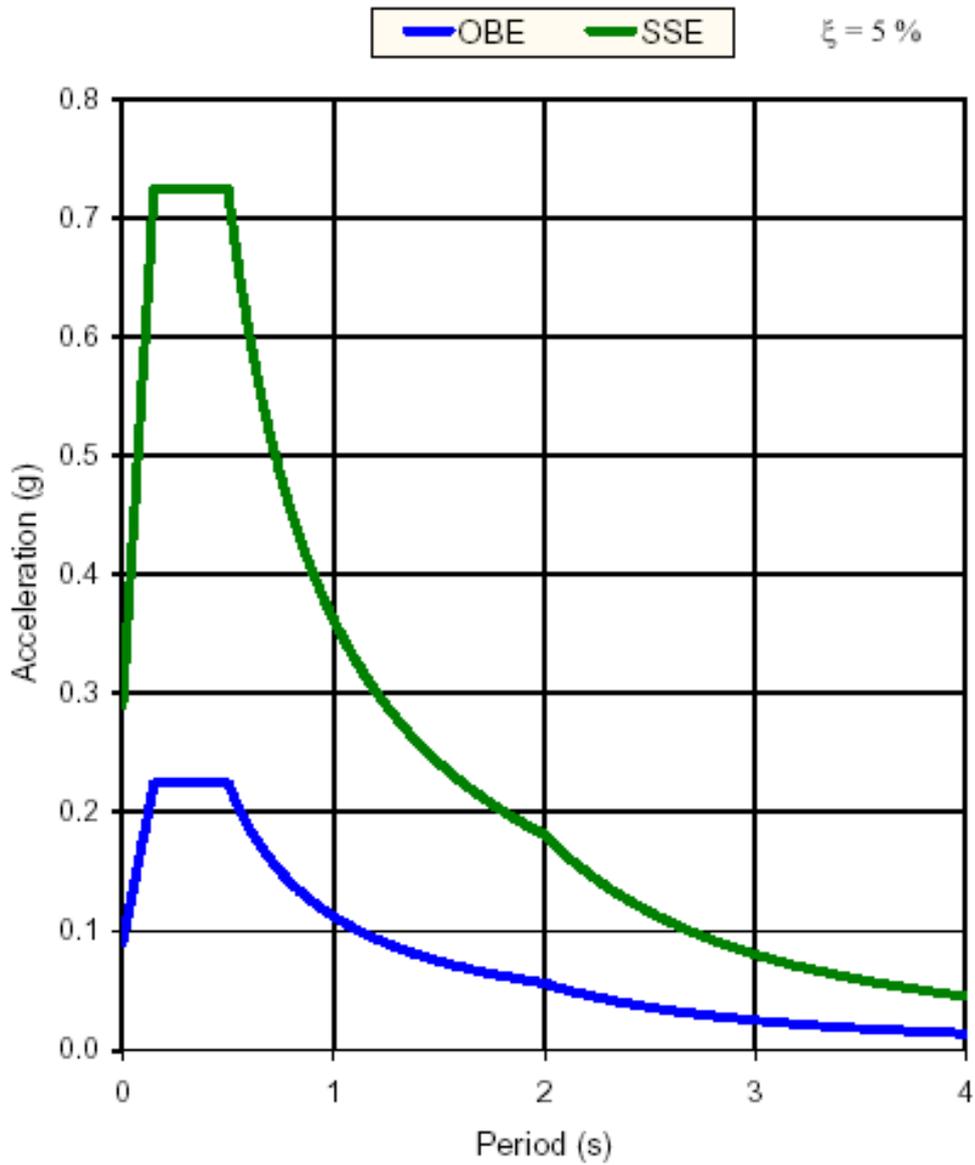


Figura 4-1 Accelerazioni di riferimento

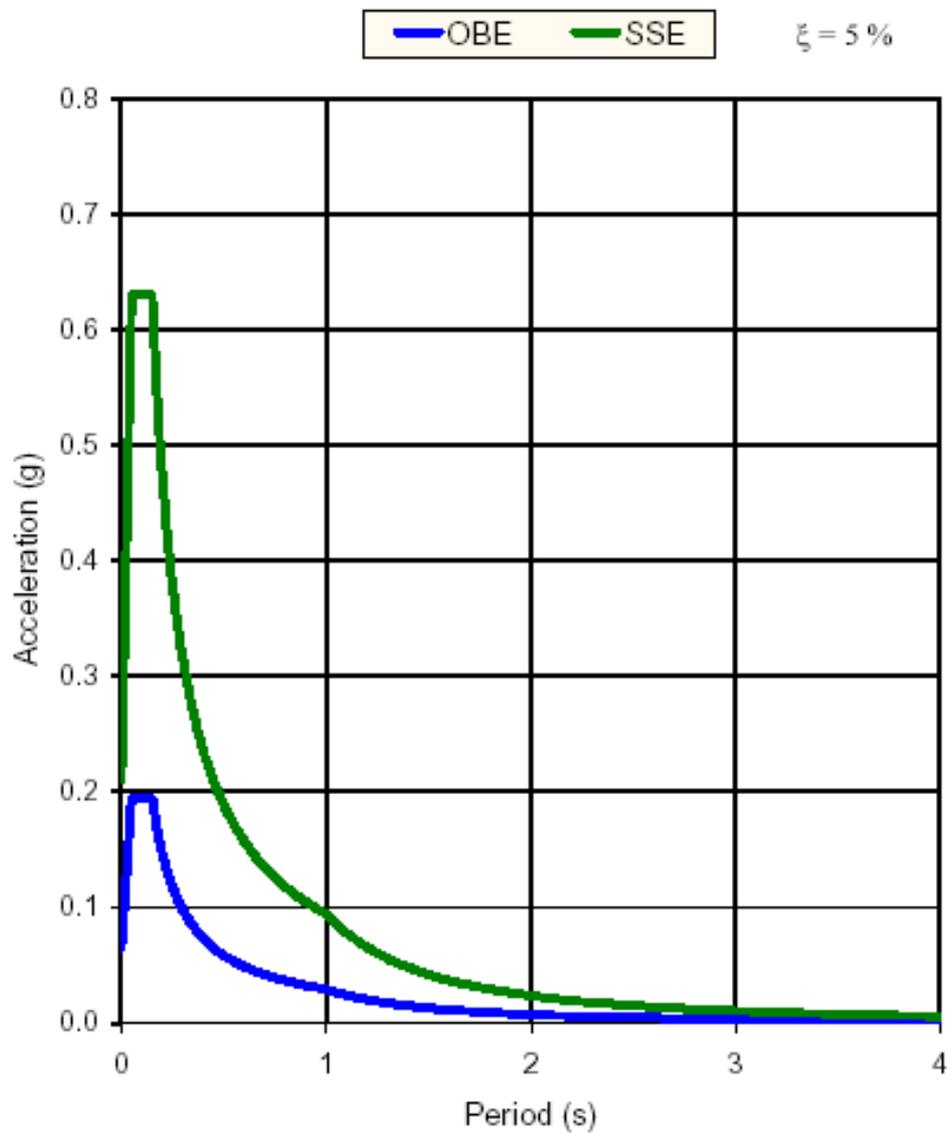




T (s)	0.00-0.15	0.15-0.50	0.50-2.00	> 2.00
OBE	$\left[1.0 + \frac{20}{3}T(2,5\eta - 1)\right] 0.09$	$0.225 \eta$	$0.1125 \frac{\eta}{T}$	$0.225 \frac{\eta}{T^2}$
SSE	$\left[1.0 + \frac{20}{3}T(2,5\eta - 1)\right] 0.29$	$0.725 \eta$	$0.3625 \frac{\eta}{T}$	$0.725 \frac{\eta}{T^2}$

Damping correction factor:  $\eta = \sqrt{\frac{10}{5 + \xi}}$  with  $\eta \geq 0.55$

Figura 4-3 Spettro orizzontale di riferimento



T (s)	0.00-0.05	0.05-0.15	0.15-1.00	> 1.00
OBE	$[1.0 + 20 \cdot T \cdot (3.0 \cdot \eta - 1)] \cdot 0.065$	$0.195 \cdot \eta$	$0.02925 \frac{\eta}{T}$	$0.02925 \frac{\eta}{T^2}$
SSE	$[1.0 + 20 \cdot T \cdot (3.0 \cdot \eta - 1)] \cdot 0.21$	$0.63\eta$	$0.0945 \frac{\eta}{T}$	$0.0945 \frac{\eta}{T^2}$

Damping correction factor:  $\eta = \sqrt{\frac{10}{5 + \xi}}$  with  $\eta \geq 0.55$

Figura 4-4 Spettro verticale di riferimento

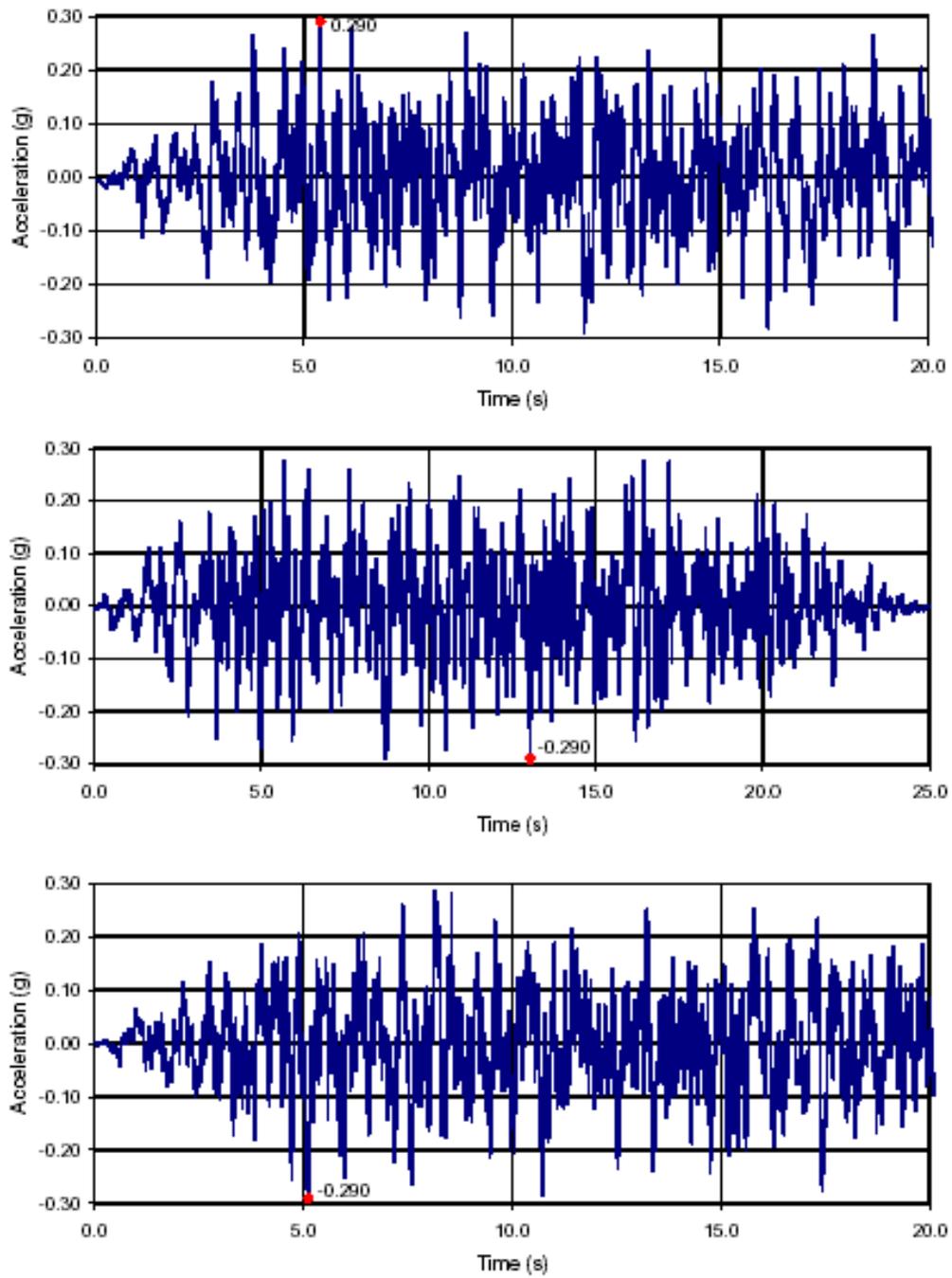


Figura 4-5 Accelerogrammi SSE orizzontali

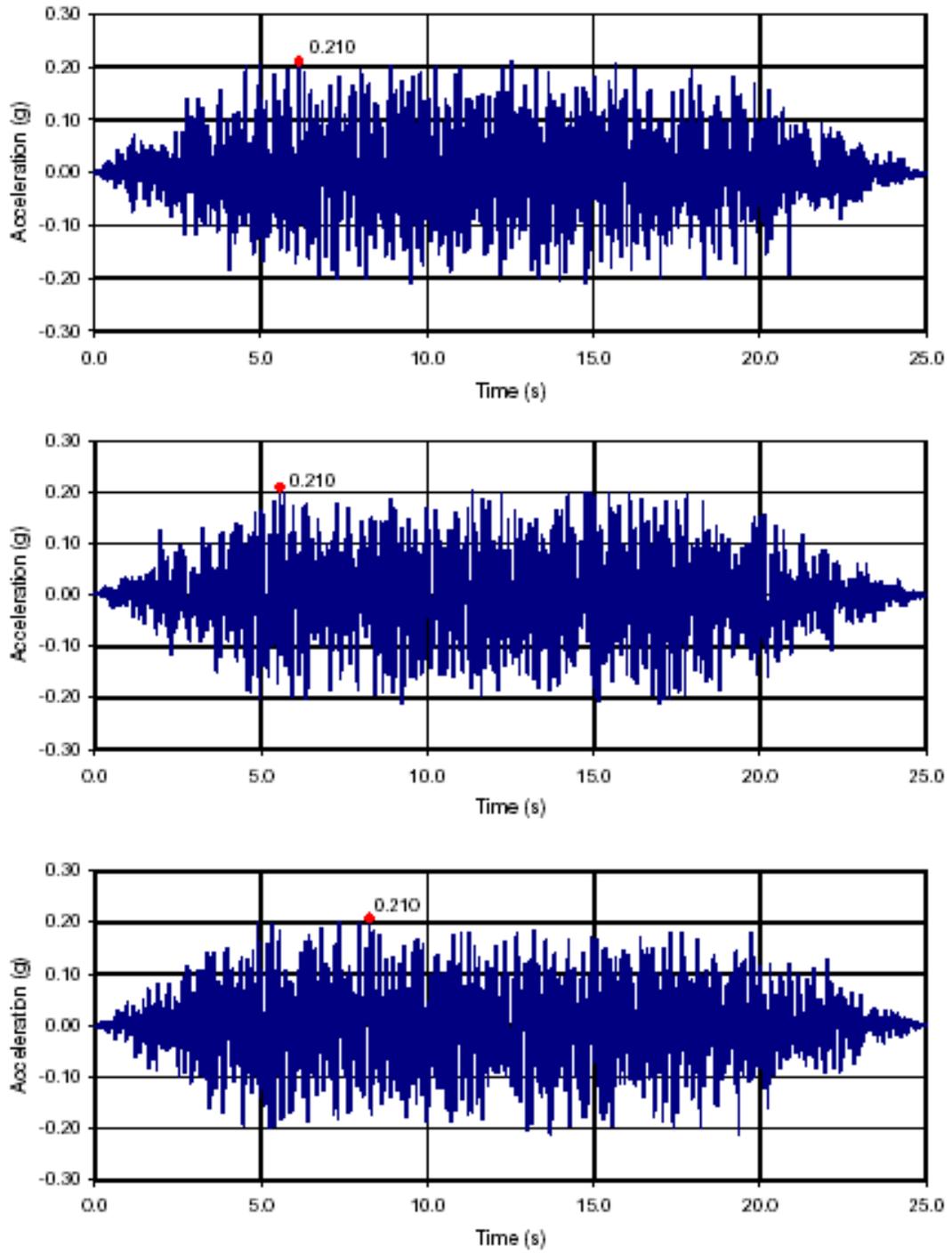


Figura 4-6 Accelerogrammi SSE verticali

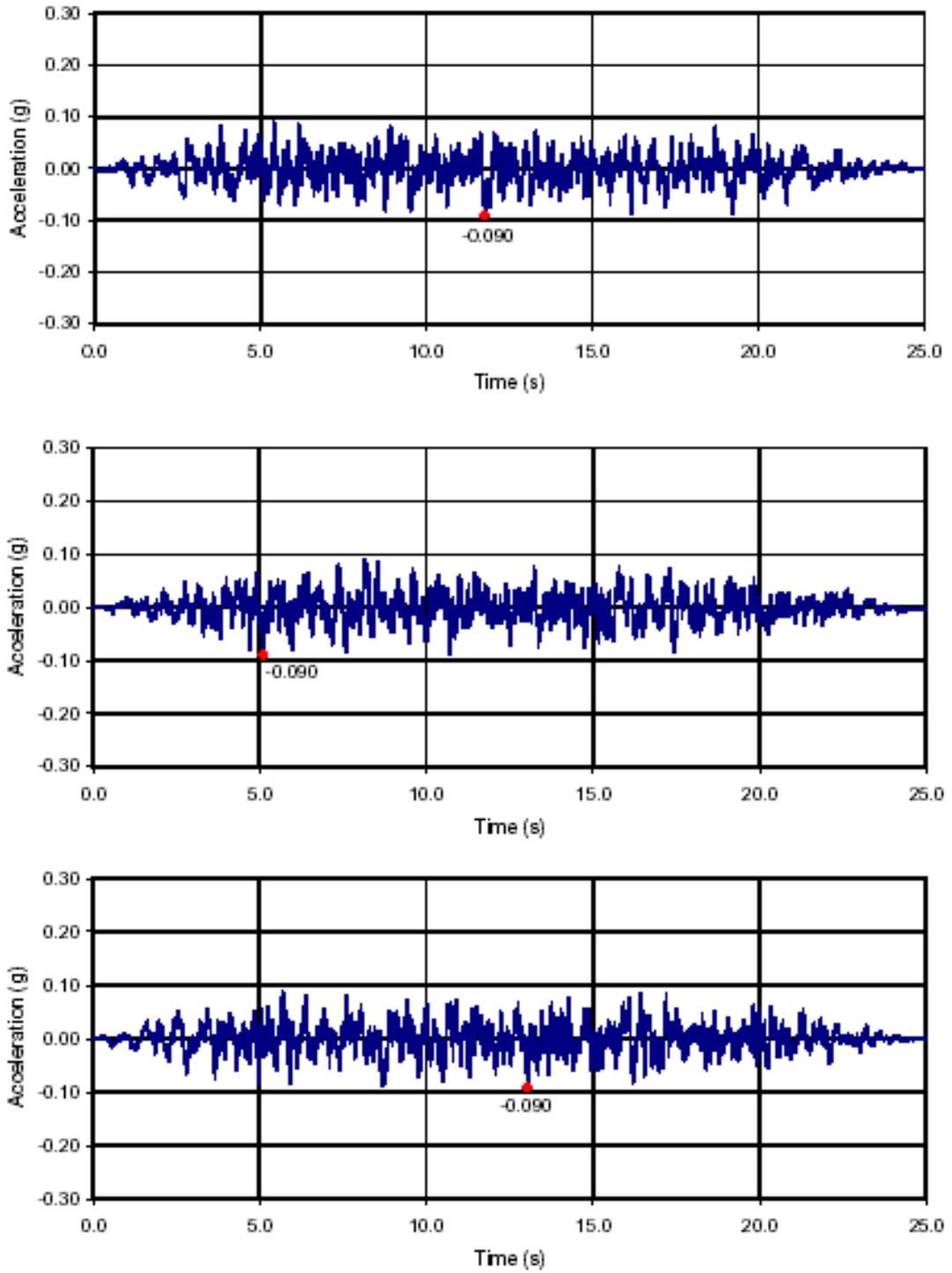


Figura 4-7 Accelerogrammi OBE orizzontali

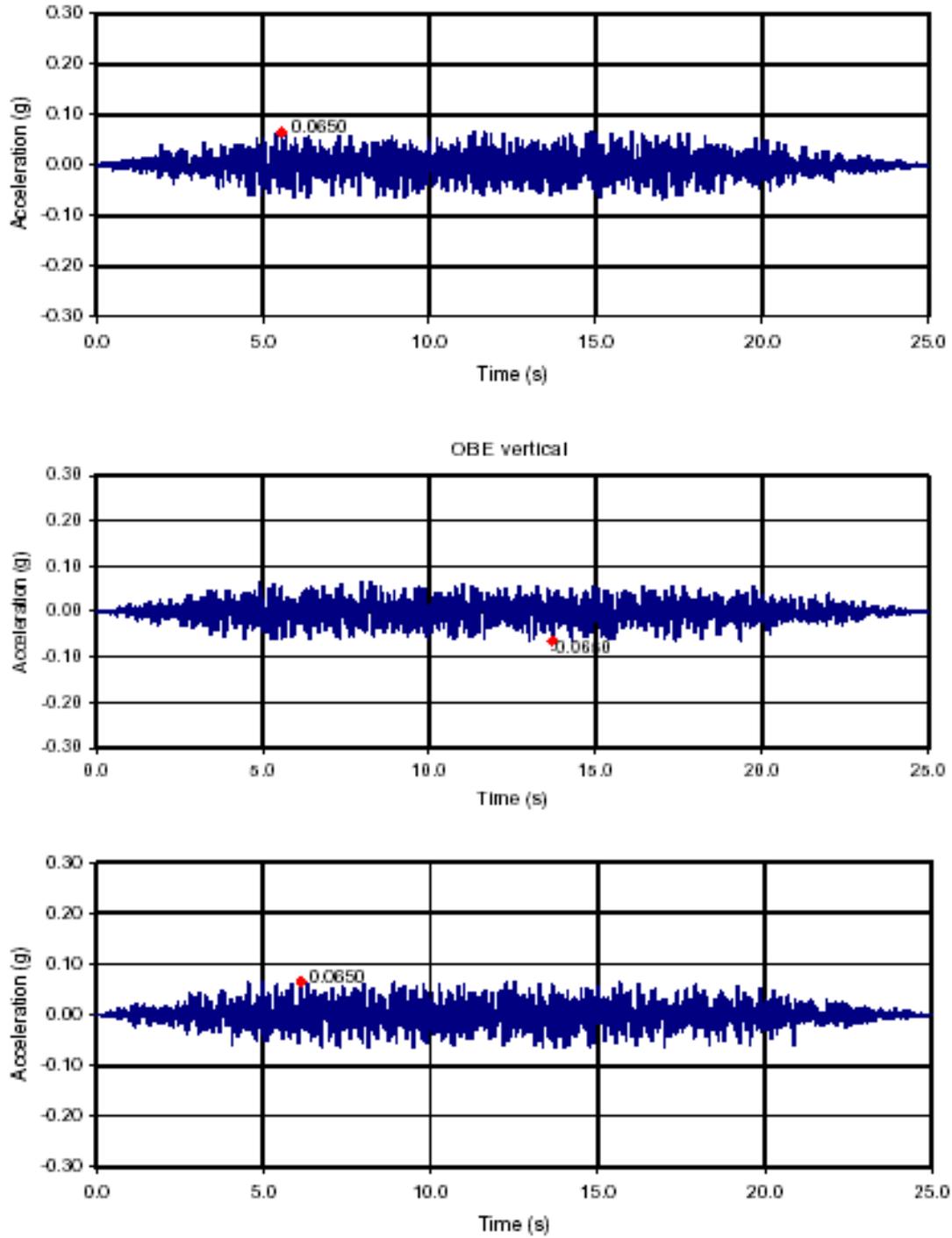


Figura 4-8 Accelerogrammi OBE verticali

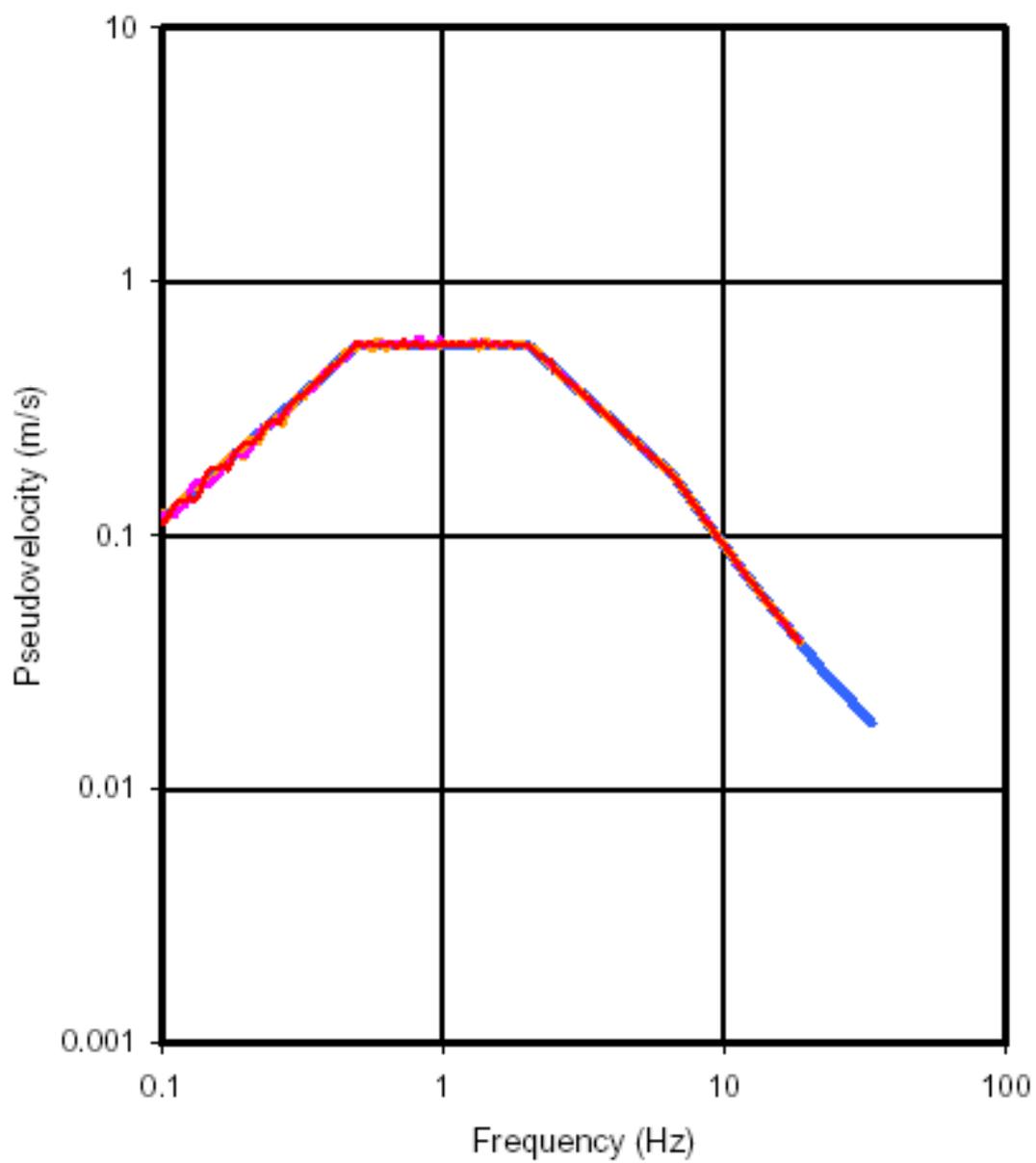


Figura 4-9 Spettro compatibile per l'SSE orizzontale

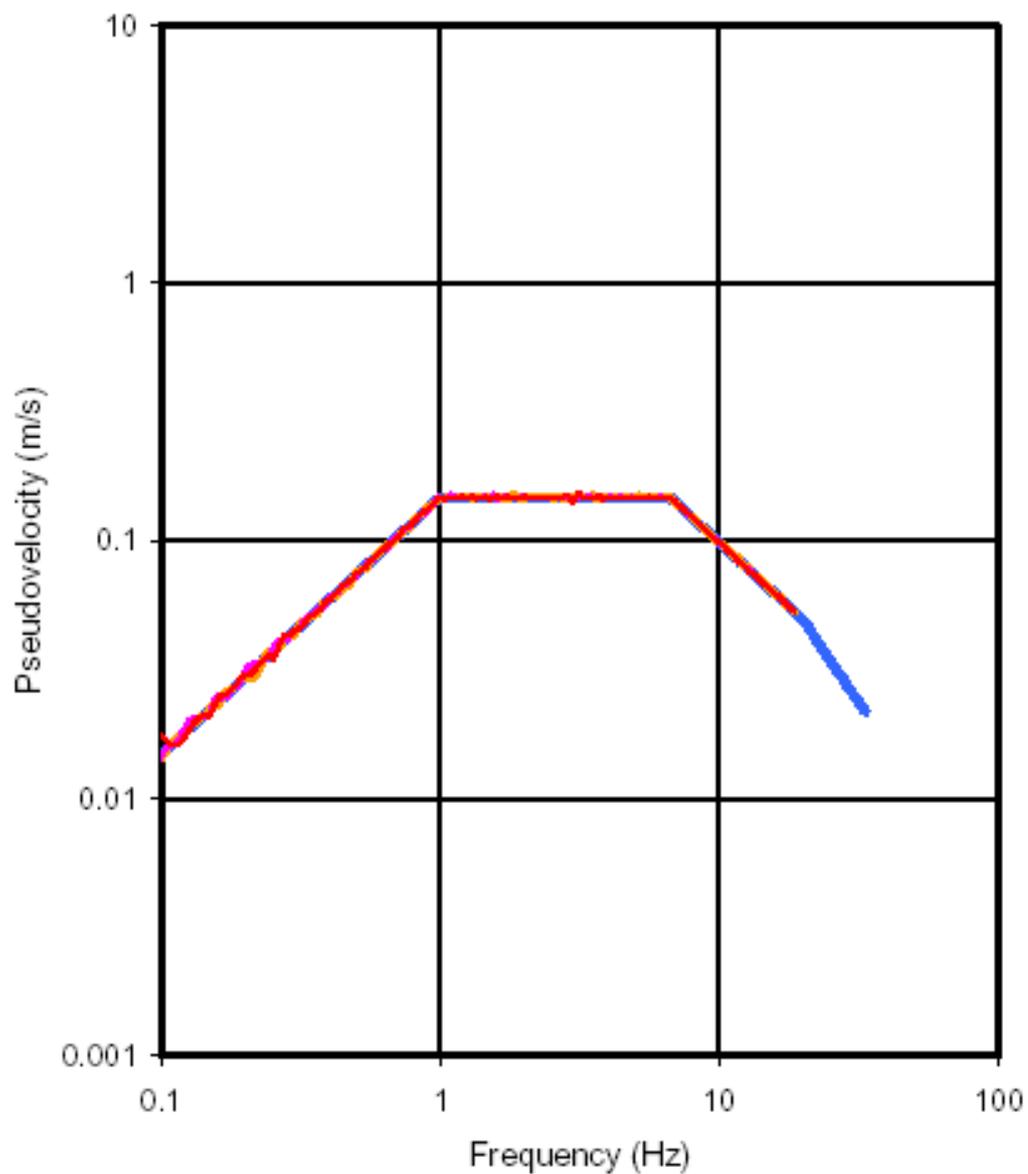


Figura 4-10 Spettro compatibile per l'SSE verticale

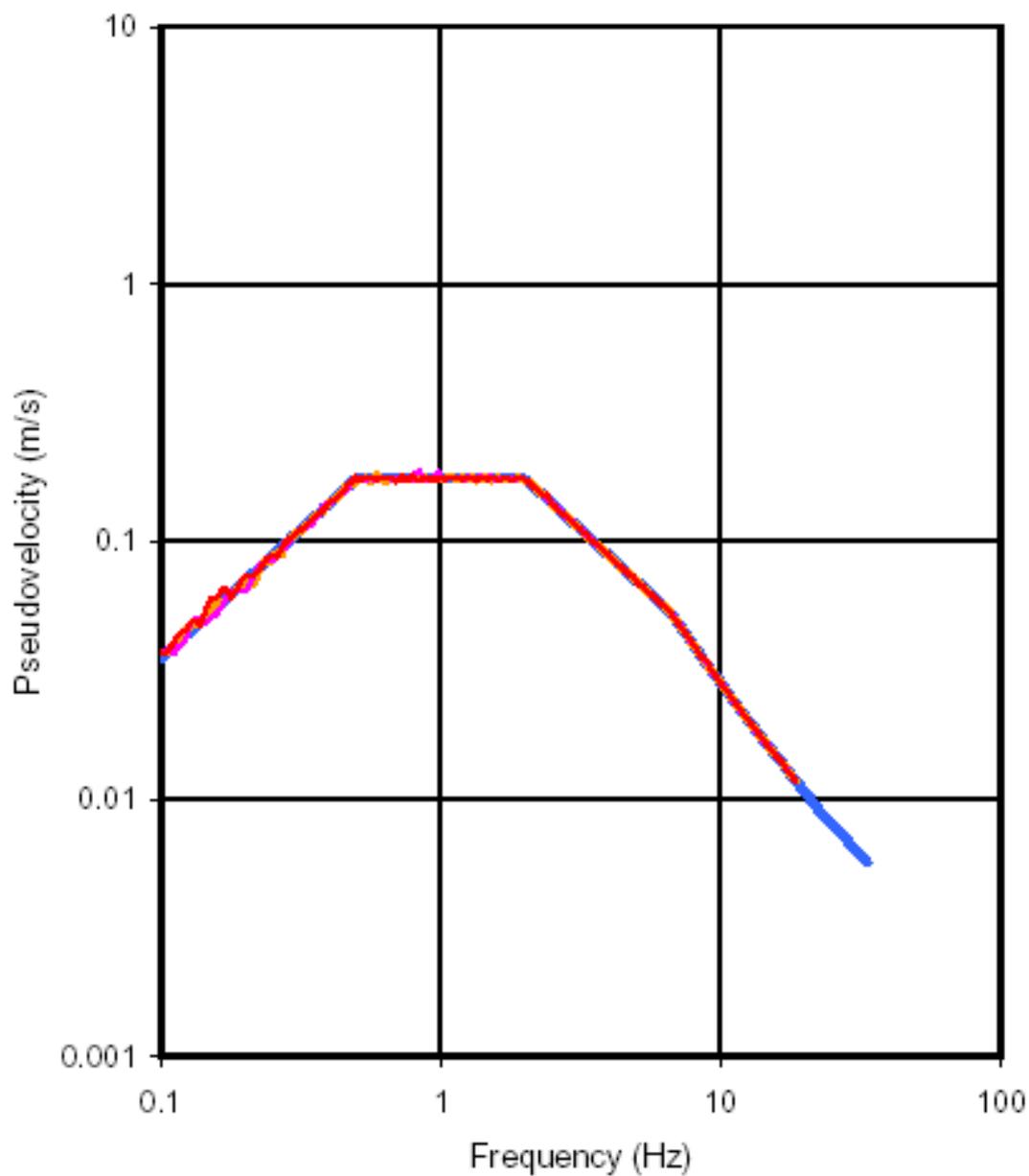


Figura 4-11 Spettro compatibile per OBE orizzontale

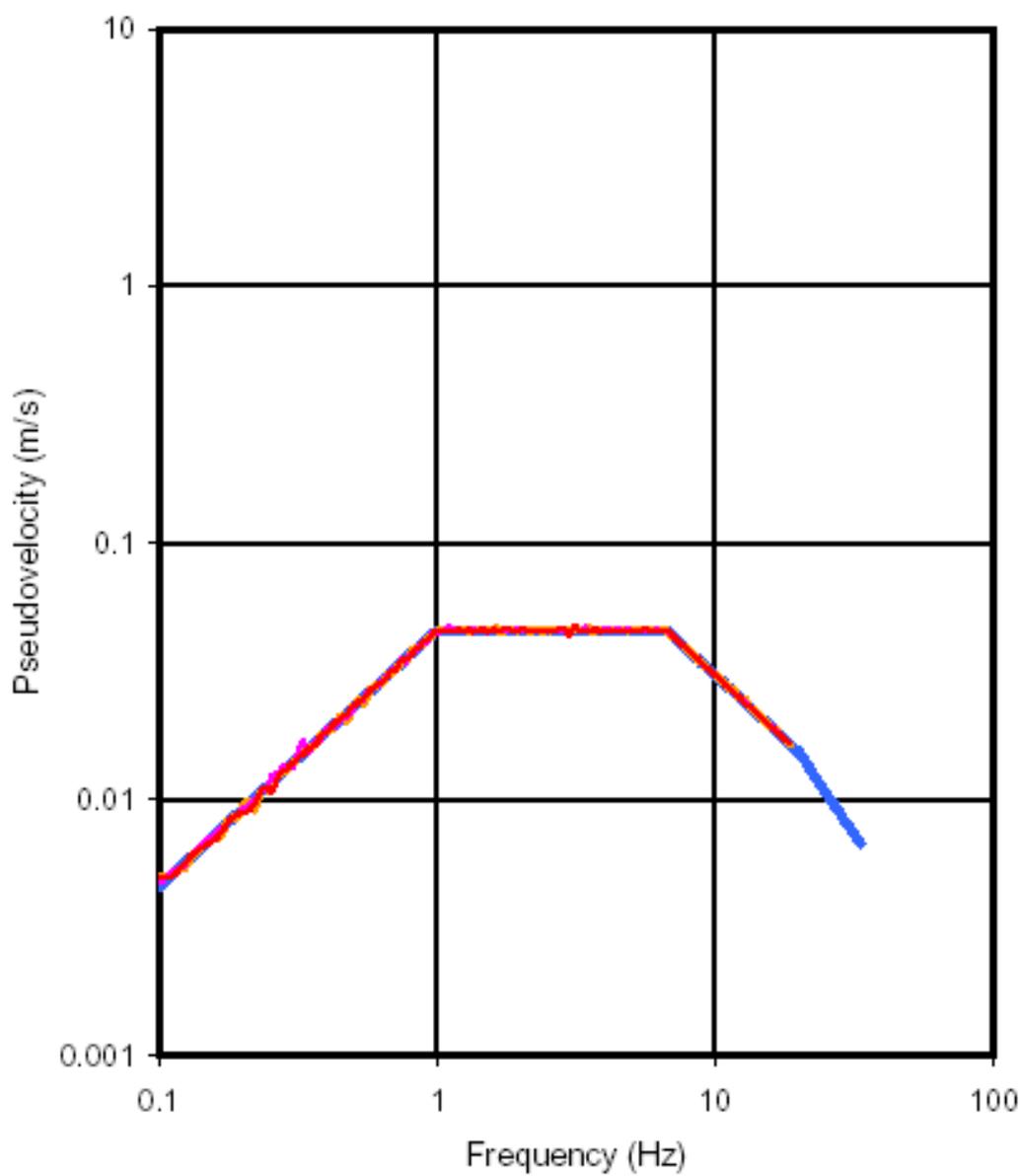


Figura 4-12 Spettro compatibile per OBE verticale

## 5. RISPOSTA DEL TERRENO LOCALE

Sulla base dei movimenti design del capitolo precedente e sulle caratteristiche geotecniche del terreno, proprietà dinamiche di sforzo sono state calcolate per i movimenti sismici in oggetto.

Questa informazione è particolarmente importante nella valutazione della rigidità dinamica delle fondazioni., come richiesto per la conduzione di analisi interattive di terreno-struttura del serbatoio.

Allo stesso tempo, sono stati calcolati i livelli effettivi di livello di stress sviluppati nel terreno durante ciascun sisma. Il potenziale di liquefazione è successivamente investigato paragonando lo stress calcolato con la capacità del terreno quando sono soggette a carichi ciclici.

### 5.1 Sezione trasversale ideale

L'informazione geotecnica contenuta nel report della Soil (2205) è stata usata per la costruzione della sezione trasversale ideale mostrate nella Tabella 5-1. La velocità  $v_s$  dell'onda shear è la media dei valori proposti nell' "Onshore Down-Hole Report" incluso nello studio della Soil (2005). Lo spessore e la densità sono stati ottenuti dall'informazione fornita dal "Final Geotechnical Report" (Soil 2005).

Strato	Descrizione	Spessore (m)	Vs (m/s)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	G <sub>0</sub> (MPa)	V (-)
1	Materiale di riempimento artificiale	7	480	1850	427	0.35
4	Sabbia densa con strati intermedi limosi	10	608	1950	720	0.37
2	Formazione di base (argilla dura)	--	814	2000	1324	0.40

Tabella 5-1 Proprietà dinamiche

Il modulo piccolo sforzo  $G_0$  è stato calcolato usando la relazione:

$$G_0 = \rho v_s^2$$

in cui  $\rho$  è la densità  
 $v_s$  è la velocità di onda di taglio

### 5.2 Risposta dinamica del terreno

Le valutazioni della risposta dinamica del terreno sono state basate su una colonna di terreno rappresentativa, con moduli di spessore e taglio indicati nella Tabella 5-1.

Le analisi della propagazione verticale delle onde sono state eseguite con il programma SHAKE (Schnabel et al, 1972).

L'input sismico consisteva, per ciascun caso, nei due gruppi dei 3 accelerogrammi presentati nella sezione precedente, che rappresentavano rispettivamente i movimenti dell'OBE e del SSE. Ciascuno di questi accelerogrammi è stato individualmente imposto sulla colonna del terreno.

Riguardo la dipendenza da sforzo del modulo a taglio e dello smorzamento di isteresi, sono state adottate le raccomandazioni del ASCE Standard 4-98 (ASCE, 1999); ved. Figura 5-1.

I risultati dei calcoli per il profilo del terreno in oggetto sono presentati nella Tabella 5-2 per l'OBE e nella Tabella 5-3 per l'SSE. In entrambi i casi, le tabelle mostrano la media dei risultati ottenuti per ciascuno dei tre accelerogrammi del gruppo corrispondente.

Strato no.	Descrizione strato	$G_{eq}$ (MPa)	$G_{eq}/G_0$ (-)	Umidità (%)	max. dif. (%)
1	Materiale di riempimento artificiale	414	0.97	1.5	$1.3 \times 10^{-3}$
4	Sabbia densa con strati intermedi limosi	662	0.92	2.5	$3.0 \times 10^{-3}$

Tabella 5-2 OBE. Proprietà dinamiche equivalenti

Strato	Descrizione strato	$G_{eq}$ (MPa)	$G_{eq}/G_0$ (-)	Umidità (%)	max. dif. (%)
1	Materiale di riempimento artificiale	348	0.90	3	$4.8 \times 10^{-3}$
4	Sabbia densa con strati intermedi limosi	576	0.80	5	$1.1 \times 10^{-3}$

Tabella 5-3 SSE. Proprietà dinamiche equivalenti

### 5.3 Valutazione del potenziale di liquefazione

Il rischio di liquefazione è stato stimato mediante l'uso della metodologia proposta da Youd et al. (2001). Questa metodologia è successiva a quella inizialmente sviluppata da Seed e Idriss (1971), che appare nell'Eurocode 8.

Questa procedura consiste nella stima, anzitutto, della resistenza del terreno alla liquefazione. Ciò richiede la stima della soglia degli stress dinamici, normalizzati con il sovraccarico effettivo, che necessita eccesso per produrre liquefazione. Questo rateo è chiamato CRR (Cyclic Resistance Ratio). Secondariamente, la richiesta deve essere calcolata; questo è il livello dello stress, nuovamente normalizzato con il sovraccarico effettivo, che dovrebbe svilupparsi nel corso dell'evento sismico. Questo rateo è conosciuto come CSR (Cyclic Stress Ratio). Il paragone della richiesta sismica con la capacità di

resistenza permette la valutazione del potenziale di liquefazione per ogni strato nel profilo del terreno.

La capacità di resistenza è valutata con l'uso di dati disponibili riguardanti la liquefazione di tipi diversi di terreno durante i sismi. La valutazione è solitamente condotta sulle basi dei risultati di test di penetrazione statici o dinamici.

La Figura 2-5 mette in relazione il CRR con il valore corretto del SPT  $(N_1)_{60}$  per un sisma di magnitudo  $M_w = 7.5$ . Si può osservare che, oltre la soglia di 30, non c'è rischio di liquefazione qualsiasi sia il livello di domanda sismica.

Nel presente studio, la correlazione tra il CRR ed il risultati del test di Cone Penetration (CPT), dato che quest'ultimo è l'unico test disponibile per lo strato 4.

Il valore corretto di  $(N_1)_{60}$  è computato tramite l'espressione seguente (Youd et al.):

$$(N_1)_{60} = N \left[ \frac{p_a}{\sigma_{v0}} \right] \quad (5-2)$$

dove  $p_a$  è la pressione atmosferica, di approssimativamente 100kPa

$\sigma_{v0}$  è la pressione verticale effettiva pre-esistente

Le correzioni usate per i risultati CPT sono troppo complicate e non saranno incluse in questo studio. Gli interessati potranno rivolgersi allo studio di Youd et al. (2001).

I valori corretti di  $(N_1)_{60}$  per tutti per tutte le perforazioni sotto ai due serbatoi si trovano nella Tabella 5-4 e sono anche stati tracciati nella Figura 5-4. Perforazioni da 1 a 4 corrispondono al serbatoio 1 e perforazioni da 5 a 8 al serbatoio 2. Si può notare che le predisposizioni siano in qualche modo diverse sotto ciascun serbatoio. La tabella mostra il valore medio  $(N_1)_{60}$  per ciascun serbatoio e per tutti i dati di perforazione. I limiti superiori ed inferiori, anch'essi presenti nella Tabella, sono stati ottenuti sommando e sottraendo una deviazione standard al valore medio.

Carotaggi	Limite minimo	Media	Limite massimo
1-4	13	28	43
5-8	50	77	>100
1-8	23	56	89

Tabella 5-4 Valori di  $(N_1)_{60}$  inferiori, medi e superiori

I risultati CPT, usati per la valutazione del potenziale di liquefazione nello Strato 4, sono presentati nelle Figure 5-5 e 5-6.

I valori di CRR corrispondenti ai dati di  $(N)_{60}$  della Tabella 5-4 sono presenti nella Tabella 5-5. I valori di  $(N)_{60}$  maggiori di 30 indicano che il terreno non è soggetto a liquefazione, per cui nessun valore di CRR viene quotato in questi casi.

Carotaggi	Limite minimo	Media	Limite massimo
1-4	0.18	0.48	-
5-8	-	-	-
1-8	0.32	-	-

Tabella 5-5 Valori CRR inferiori, medi e superiori

La Figura 5-7 presenta il limite inferiore di CRR (l'unico numericamente quantificabile) considerando tutte le perforazioni (1 a 8) ed il CRR risultante dai dati CPT. Quando il CRR deriva dai risultati CPT, ai punti non soggetti a liquefazione sono stati assegnati dei valori arbitrari di 0.8. Ciò non ha valore fisico, ma serve ad indicare che la maggioranza dei punti CPT non prevedono liquefazione.

La Figura 5-8 mostra la richiesta sismica indotta da ciascuno dei tre sismi presentati nella sezione 4.3 in termine di CSR come spiegato all'inizio di questa sezione.

Paragonando la richiesta sismica e la capacità del terreno (Figura 5-9) si può notare che la domanda SSE in generale è minore della capacità del terreno. La capacità presentata per lo strato 1 corrisponde al limite inferiore considerando le perforazioni da 1 a 8 (Tabella 5-5). I limiti medi e superiori corrispondono a situazioni di non liquefazione e non sono quindi rappresentati nella Figura 5-9.

In ogni caso, se si considerano solo i valori CRR derivati dalle perforazioni sotto al serbatoio 1 (perforazioni da 1 a 4), la curva di richiesta derivata dalle perforazioni sotto il serbatoio 1 (perforazioni da 1 a 4), la curva di domanda si trova tra il limite medio e quello inferiore (ved. Tabella 5-5 e Figura 5-9). Il CRR minimo necessario per evitare la liquefazione sotto al SSE è di 0.3, che corrisponde ad un valore di  $(N)_{60}$  di 22.

La Tabella 5-6 mostra le frazioni percentuali che corrispondono a ciascun gruppo di perforazioni, tenendo conto della distribuzione dei dati di quelle perforazioni. La Figura 5-10 mostra i valori inferiori, medi e superiori per  $(N)_{60}$  sotto al serbatoio 1, insieme a quello richiesto per produrre un valore CRR maggiore della richiesta sismica.

Carotaggi	Percentuale per $(N_1)_{60} = 22$
1-4	0.18
5-8	-
1-8	0.32

Tabella 5-6 Frazioni percentuali di dati  $(N_1)_{60}$  inferiori a 22.

Riassumendo, se tutti i dati sono presi raggruppatamente, includendo entrambi i serbatoi, la possibilità di liquefazione non sarebbe stata esclusa: il limite inferiore della resistenza (meno una deviazione standard) è maggiore della domanda SSE.

In ogni caso, se i dati debbono essere considerati in maniera indipendente per ciascun serbatoio, i dati dell'ubicazione del serbatoio 1 non adempiono più tale condizione. La resistenza media eccede le richieste, ma il limite inferiore della resistenza (meno una deviazione standard) è inferiore alle richieste SSE. La percentuale dei dati che indicano le resistenze al di sotto delle richieste è di circa 33%. In questa situazione, la liquefazione non può essere completamente scartata e deve essere oggetto di opportuna progettazione in fase di dettaglio.

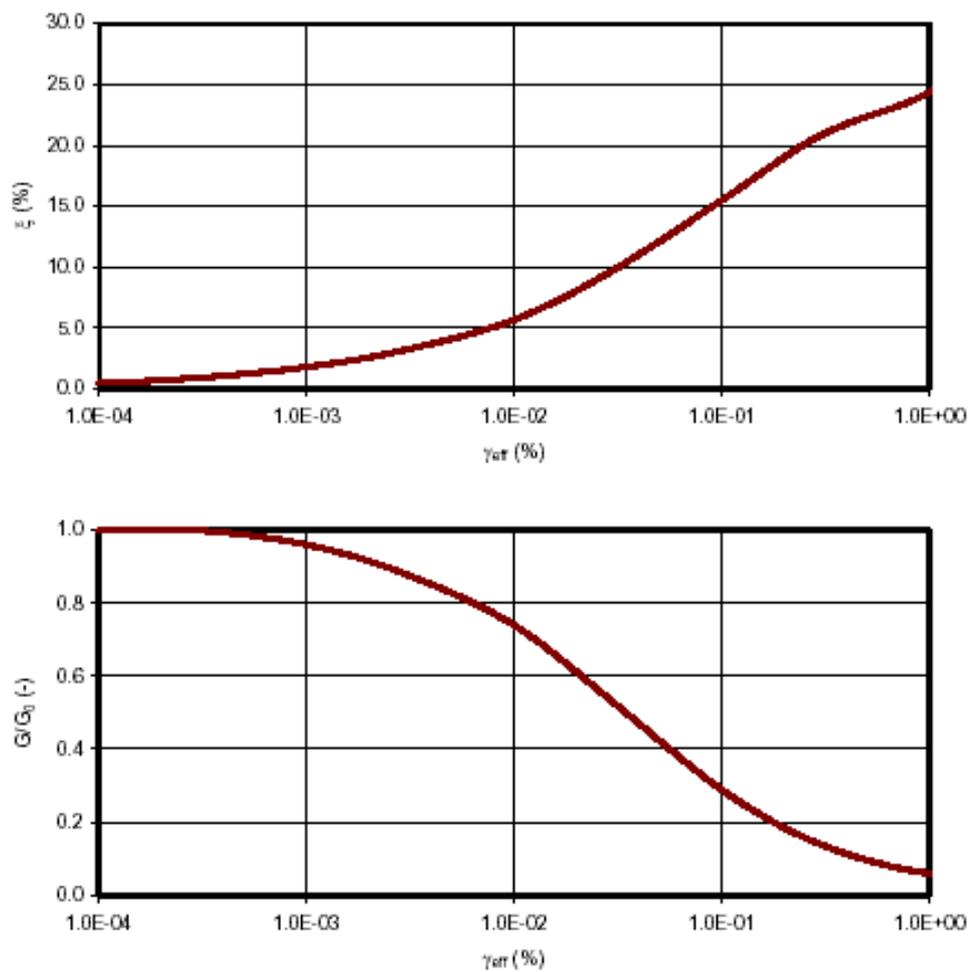


Figura 5-1 Modulo di scarico e normalizzazione G contro sforzo effettivo

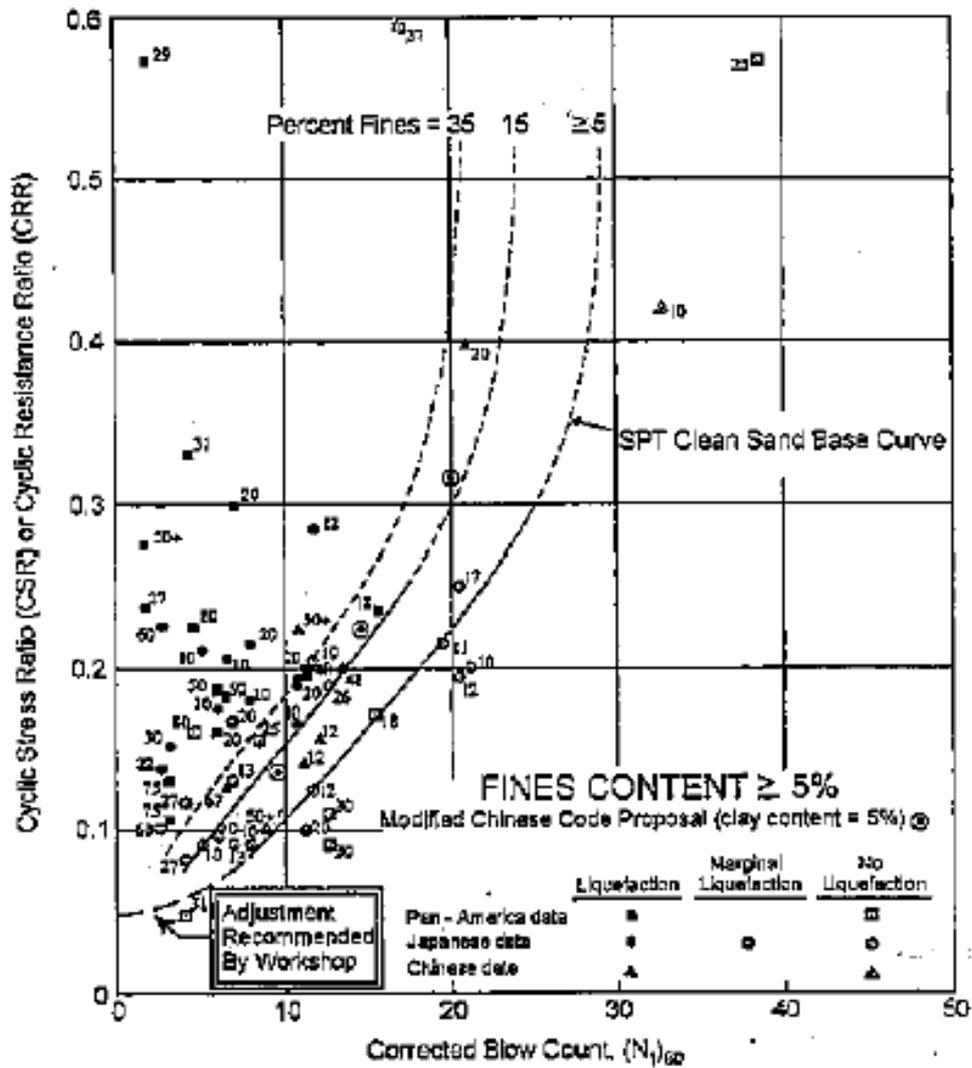


Figura 5-2 Resistenza di liquefazione per sabbie – SPT

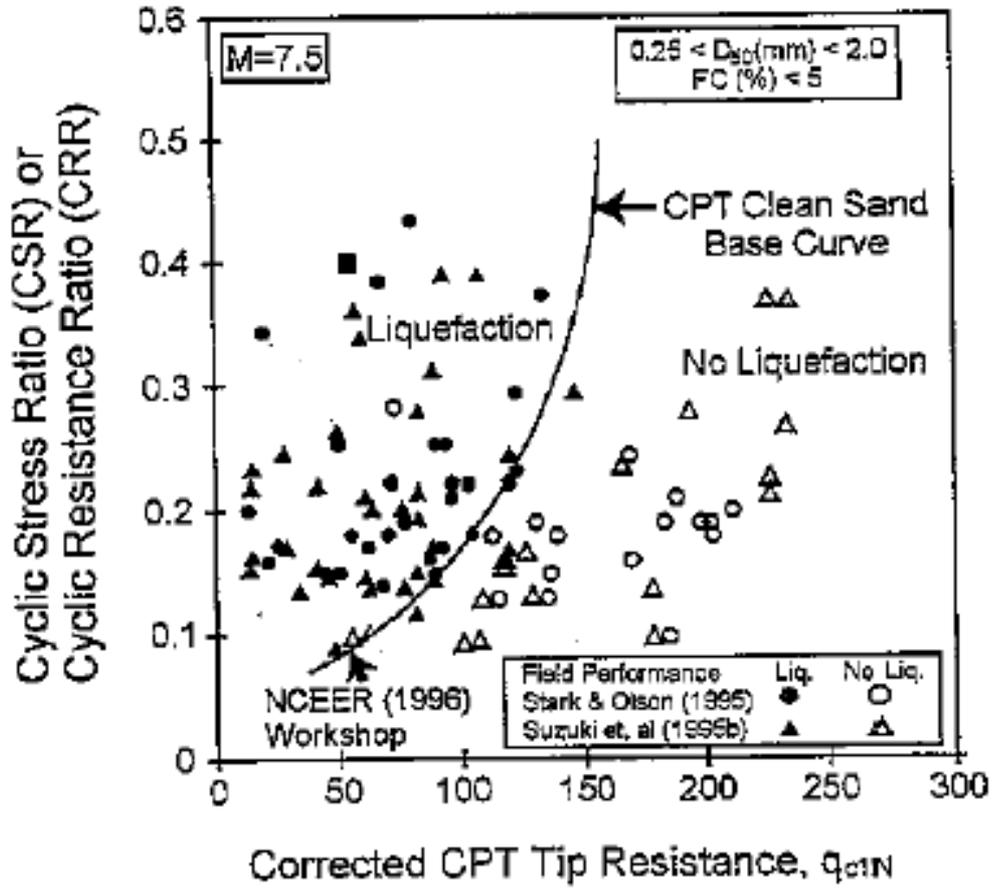


Figura 5-3 Resistenza di liquefazione per sabbie – CPT

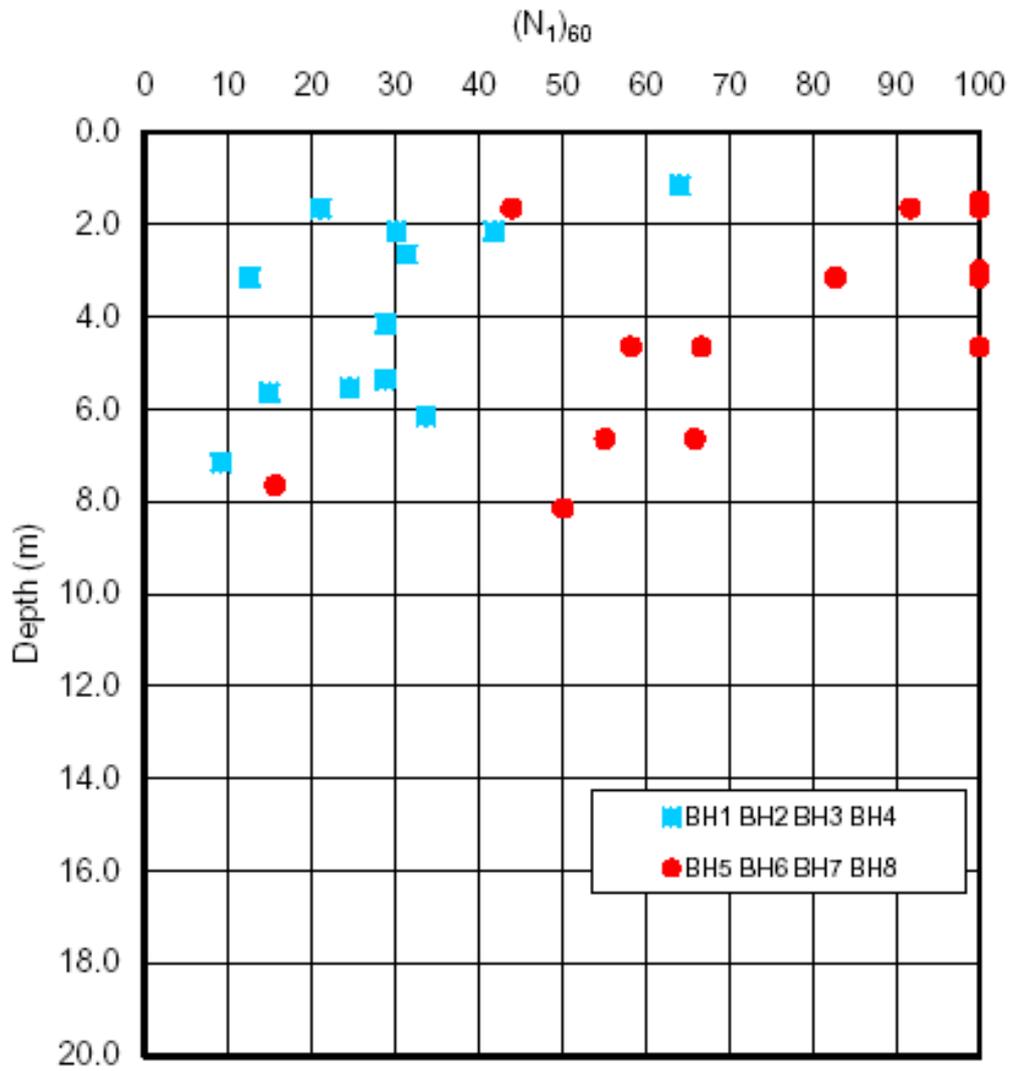


Figura 5-4 Valori corretti  $(N_1)_{60}$

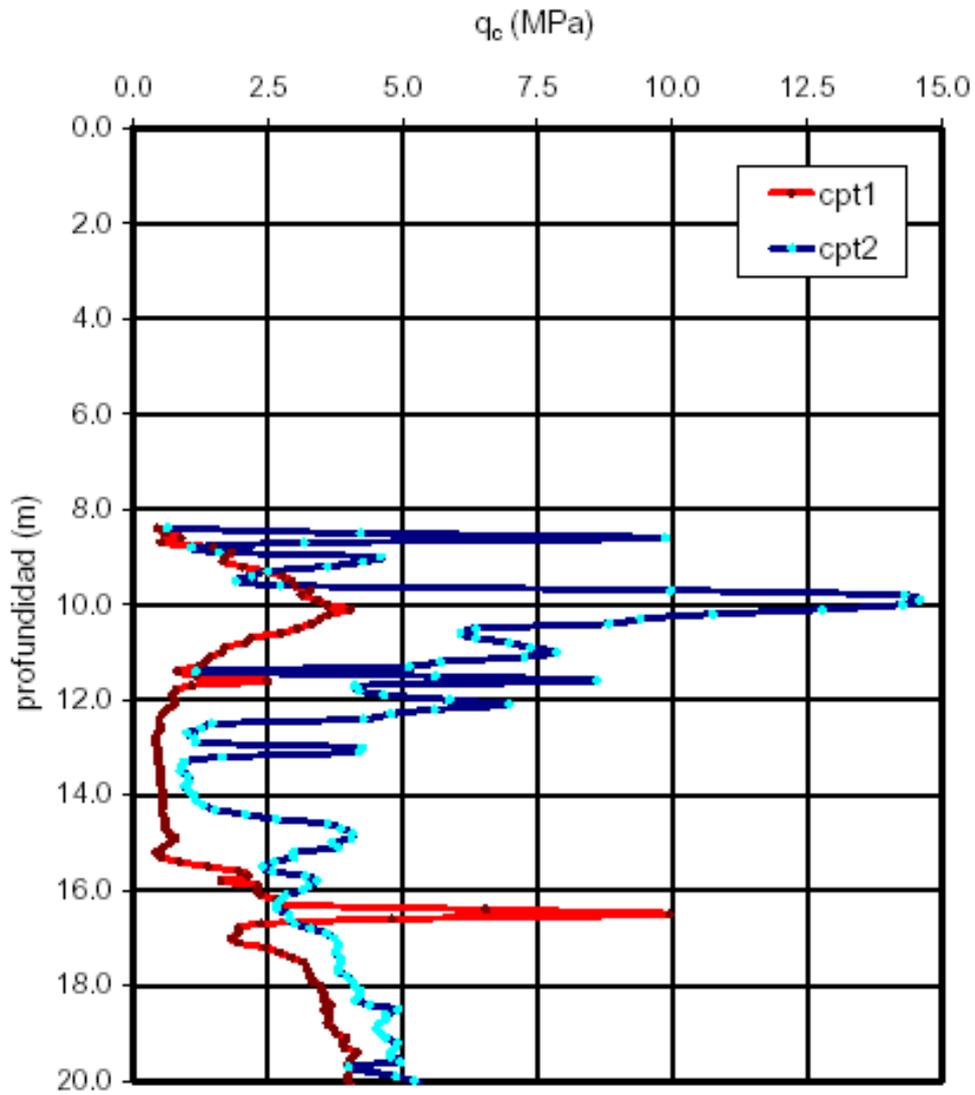


Figura 5-5 CPT Resistenza di "cone penetration"