

# Microzonazione Sismica per la salvaguardia del Barocco di Noto

ANTONIO CAVALLARO, SALVATORE GRASSO, MICHELE MAUGERI

## *Sommario*

La salvaguardia ed il restauro dei monumenti storici rappresenta un tema particolarmente importante per la comunità scientifica. Nel presente lavoro vengono presentati e confrontati i risultati geotecnici di un progetto complessivo per la valutazione degli effetti di sito nell'area municipale di Noto, nella Sicilia orientale, con particolare attenzione all'effetto del numero dei cicli di carico sulla rigidezza del terreno. La ricerca condotta prende spunto da quanto previsto dal *Manuale per la Zonazione del Rischio Sismico Geotecnico (Manual for Zonation on Seismic Geotechnical Hazard)*, pubblicato dal Technical Committee N° 4 dell'International Society of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, che affronta ed uniforma tutte le problematiche relative alla Microzonazione Sismica ai diversi gradi di livello a seconda dei dati disponibili e dei metodi di analisi utilizzati. Nel presente lavoro è stato preso in considerazione uno studio di Microzonazione Sismica, relativo alla città di Noto, in particolar modo finalizzato alla determinazione dei parametri di degradazione per il modulo di taglio.

## *Introduzione*

Noto è una tra le più belle cittadine della Sicilia. Offre un panorama architettonico che è unico al mondo per la sua unità e per l'armonia dello stile barocco che è limpido e floreale: caratteristica naturalmente evidente per effetto del colore delle pietre rosa utilizzate per la costruzione della cittadina.

La città storica di Noto si colloca nella costa ad est della Sicilia, che è una delle aree d'Italia maggiormente attive dal punto di vista sismico. Fin dal 1169, la città di Noto è stata colpita da tre terremoti disastrosi con un'intensità della scala MKS compresa tra l'IX grado e l'XI<sup>1</sup>.

Il 13 marzo 1996 si ebbe il crollo della cupola della Cattedrale di San Nicola a causa di un collasso strutturale post sismico (fig. 1). L'evento sismico era avvenuto il 13 dicembre 1990 ed aveva causato

<sup>1</sup> POSTPISCHL 1985.

danni strutturali alla Cattedrale che non furono considerati particolarmente importanti fino a quando non si ebbe, sei anni dopo, il crollo della cupola. I lavori di ricostruzione della Cattedrale di Noto, che hanno richiesto il contributo di numerosi tecnici e studiosi del settore, sono stati conclusi nel 2007.



Fig. 1 - La Cattedrale di Noto dopo la ricostruzione.

A seguito di tale evento ed a causa della collocazione geografica dell'area in esame è stata, pertanto, condotta un'esauriente indagine di laboratorio ed in sito con lo scopo di studiare le caratteristiche geotecniche, l'interazione terreno struttura ed il possibile fenomeno di amplificazione del sito di Noto, ai fini di una microzonazione sismica. Inoltre è stato possibile determinare il profilo del terreno con particolare attenzione alle caratteristiche meccaniche e la variazione del modulo di taglio ( $G$ ) e dello smorzamento ( $D$ ) con il livello di deformazione e la profondità<sup>2</sup>.

Nel presente lavoro è stato affrontato il problema relativo alla degradazione ciclica dei terreni coesivi e la possibilità di descrivere tale fenomeno, attraverso la definizione di equazioni, anche nel caso di prove eseguite in condizioni di controllo di carico. Tali risultati rappresentano pertanto un contributo importante per la caratterizzazione dei siti di interesse storico e monumentale e per l'analisi della risposta sismica locale.

<sup>2</sup> CAVALLARO ET ALII 2003a; CAVALLARO, MAUGERI 2003.

*Inquadramento storico e sismico dell'area*

L'area intorno a Noto verso est fu abitata dalle popolazioni dell'Età del Bronzo tra il 2000 ed il 1500 a.C. Il famoso archeologo che esplorò e studiò il sito, Paolo Orsi, attribuì il nome di “Civiltà di Castelluccio” al sito ed ai suoi abitanti. La maggior parte dei più importanti ritrovamenti riportati alla luce sono attualmente esposti presso il Museo Archeologico di Siracusa, mentre sono state ritrovate poche rovine del villaggio preistorico e della necropoli primitiva.

La storia di Noto prima del terremoto del 1693 fa riferimento alla città vecchia, oggi chiamata “Noto Antica” e conosciuta nell'antichità come “Netum”. Ciò che rimane della città vecchia è localizzato a 13 chilometri di distanza dall'attuale città di Noto. La leggenda narra che Noto Antica fu fondata da un re della Sicilia chiamato Ducezio verso il 500 a.C. Gli studiosi hanno datato le prime rovine verso l'800 a.C. Con la colonizzazione greca di Siracusa, Netum venne in contatto con l'avanzata cultura ellenista e fu molto probabilmente integrata ad essa. Noto Antica mantenne un certo livello di importanza durante il periodo arabo quando divenne un centro amministrativo della Val di Noto, una delle tre province in cui il governo arabo aveva suddiviso la Sicilia. La città fu uno degli ultimi baluardi della resistenza saracena all'occupazione normanna, resistendo al Conte Ruggero di Altavilla fino al 1091.

La Sicilia sud-orientale è stata sottoposta all'azione di terremoti relativamente poco frequenti ma forti: in tre occasioni durante l'ultimo millennio (tabella 1) e per quanto riguarda il periodo precedente da uno sconosciuto ma ovviamente cospicuo numero di altre occasioni.

Data	Magnitudo ( <sup>1</sup> ) ( <sup>2</sup> )	Intensità Epicentrale [scala MCS] ( <sup>1</sup> )	Area Epicentrale
04/02/1169	5.6 (0.8) ( <sup>3</sup> )	X	Sicilia Orientale
10/12/1542	6.6 (0.4)	X	Area di Siracusa
09/01/1693	6.1 (0.3)	VIII – IX	Sicilia S-E
11/01/1693	7.4 (0.1)	XI	Sicilia Orientale

Tab. 1 - Principali terremoti nella Sicilia sud-orientale successivi all'anno 1000 d.C. (BOSCHI ET ALII 1995 e 1997).

Dove: (1) Stimata. (2) “Magnitudo macrosismica equivalente” definite da Gasperini e Ferrari (1997). Fra parentesi, l'errore nella stima. (3) Per quanto riguarda questa magnitudo stimata, Gasperini e Ferrari (1997) stabiliscono che “probabilmente i risultati sono fortemente sottostimati” a causa del metodo utilizzato. Nell'edizione precedente dello stesso catalogo (BOSCHI ET ALII 1995) questa magnitudo è stata stimata pari a 8.3.

Durante il secolo passato la Sicilia fu colpita da forti terremoti le cui caratteristiche dipendono dalle condizioni geodinamiche del Mar Mediterraneo.

Per quanto riguarda i terremoti dell'ultimo millennio sono evidenti molti indizi contemporanei che ne testimoniano il loro effetto ma che prestano comunque scarsa attenzione agli aspetti ambientali. Inoltre fortunatamente molto di questo materiale di riferimento, che era stato fisicamente disperso tra una miriade di istituzioni pubbliche e private, è stato recentemente reso disponibile<sup>3</sup>.

Una lista dettagliata dei terremoti che hanno colpito quest'area è stato redatto dal C.N.R.<sup>4</sup>. Uno studio dei terremoti più forti che danneggiarono la città di Noto è stato condotto sempre dal C.N.R.<sup>4</sup>. Una breve descrizione dei terremoti maggiormente significativi viene riportata nel seguito.

Il terremoto di Catania del 4 febbraio 1169 è un dei più antichi eventi sismici di grande intensità per il quale sono disponibili studi dettagliati. Il terremoto avvenne nella parte sud della Sicilia la cui sismicità è caratterizzata da un rilascio di energia molto forte come abitualmente avviene dopo un lungo periodo di quiete. La scossa causò elevati danni<sup>5</sup>. L'area epicentrale fu localizzata vicino la città di Catania in cui l'intensità sembra abbia raggiunto il XI grado della scala MCS<sup>6</sup>. Nell'area di Noto l'intensità raggiunse all'incirca il X grado cosicché il terremoto causò numerosi morti e furono distrutti molti edifici.

Il 10 dicembre 1542 un altro terremoto, tra i più forti, colpì la città di Noto. Sembra, comunque, che sia stato tra i più deboli che storicamente siano ricaduti nell'area di Noto<sup>7</sup>. L'epicentro fu localizzato vicino la città di Sortino che si trova a circa 30 km distante da Noto. Nell'area epicentrale l'intensità sismica fu di circa l'IX grado mentre a Noto si raggiunse il VII grado circa<sup>8</sup>.

Il terremoto della "Val di Noto" dell'11 gennaio 1693 è considerato uno dei maggiori terremoti mai avvenuti in Italia. Si pensa che più di 1500 scosse si ebbero nei due anni successivi al terremoto<sup>9</sup>. Il terremoto, di grande intensità e tra i più distruttivi di tutti i tempi (in molte zone raggiunse l'11° grado della scala MCS), interessò un vasto territorio della Sicilia sud-orientale e causò la parziale, ed in molti casi la totale, distruzione di 57 città fra le quali le più grandi dell'area: Catania con

<sup>3</sup> BOSCHI *ET ALII* 1995, 1997.

<sup>4</sup> C.N.R. 1985a.

<sup>5</sup> PERTZ 1866; SIRAGUSA 1897.

<sup>6</sup> LOMBARDO 1985; AGNELLO 1997

<sup>7</sup> HA-KOHEN XVI secolo.

<sup>8</sup> BARBANO 1985a.

<sup>9</sup> BARBANO 1985b.

19000 abitanti, Modica (18000), Siracusa (15000), Acireale (13000), Catagirone (12000), Noto (12000), Vizzini (11000), Lentini (10000), Ragusa (10000). Ci furono circa 60000 morti<sup>10</sup>.

L'epicentro fu localizzato vicino alla città di Lentini che si trova a 45 km di distanza da Noto; l'effetto fu molto forte anche nel sud dell'Italia e nelle coste africane.

Il 13 dicembre 1990 un altro terremoto colpì Noto<sup>11</sup>. Ovunque l'intensità sismica non fu molto forte e raggiunse, nell'area epicentrale, il VII grado. La magnitudo fu di circa  $M = 5.4$ . A causa della bassa intensità, i danni, questa volta, interessarono solo svariate vecchie costruzioni e si limitarono principalmente alla caduta di cornicioni ed alle lesioni della muratura.

Dopo il terremoto dell'11 gennaio 1693 Noto fu ricostruita in un nuovo sito.

I grandi centri distrutti dal terremoto del 1693, con la sola eccezione di Modica e Ragusa, erano città "demaniali" come Noto, soggette direttamente al potere regale. Molte aree disabitate erano invece feudi della potente aristocrazia siciliana.

La Sicilia nel 1693 faceva parte del regno spagnolo ed era amministrata da un "viceré" (*prorex*) che al momento del disastro era il Duca di Uzeda. Egli nominò come suo Generale Vicario Giuseppe Lanza, Duca di Camastra, militare di carriera ed esperto di architettura.

Il Vicario grazie alla sua competenza e con la collaborazione del colonnello di artiglieria ed architetto militare Carlo di Grunemberg si adoperò per i primi aiuti ed impostò le piante per la ricostruzione delle città "demaniali".

Nella ricostruzione di Noto, iniziata sotto la dominazione spagnola, si ottennero considerevoli risultati sotto il regno dei Borboni che governarono la Sicilia dal 1735 e fino all'impresa di Garibaldi.

La ricostruzione impegnò per 50 anni le risorse intellettuali ed economiche e grazie al riuscito incontro fra le culture possedute e la grande abilità tecnica (fra queste l'eccezionale "*lapidum incisores*") costituì uno dei maggiori esempi di pianificazione urbana di qualsiasi epoca.

Analogamente in numerosi casi, simili a Noto, la ricostruzione fu compiuta in altri siti poiché erano cambiate le necessità militari e non erano più necessarie, come nei secoli precedenti, le fortificazioni delle zone abitate.

La cultura urbanistica delle classi dirigenti dell'epoca era di tipo teorico ed i modelli maggiormente conosciuti erano quelli delle città con disegno geometrico (Carlentini, 1551; La Valletta, 1566, Plamonova, 1593).

<sup>10</sup> AGNELLO 1931; ANONIMO 1693; BOCCONE 1697; BOTTONE 1718.

<sup>11</sup> DE RUBEIS ET ALII 1991.

A Noto probabilmente grazie all'incontro tra "Fra" Angelo Italia (architetto Gesuita), esperti locali ed ingegneri spagnoli si realizzò una planimetria straordinaria che univa il rigore della griglia geometrica con l'articolazione delle tre piazze principali (la piazza di San Francesco, la piazza della Cattedrale e la piazza del XXIV Maggio). La pendenza leggermente trasversale del territorio determina un colpo d'occhio variabile che rende mutabile il paesaggio urbano (una delle caratteristiche dell'arte barocca figurativa in campo urbanistico).

Il risultato è impreziosito dalla qualità e dalla grandezza delle costruzioni in molti casi progettate da famosi architetti come Gagliardi, Labisi e Sinatra. Non di secondaria importanza il contributo della calcarenite di Noto unica per il suo colore.

Noto divenne il modello della città barocca, molto più di altri centri come Catania, Caltagirone ed Acireale, per la ricchezza del grande patrimonio, dell'arte e dell'architettura barocca. Per questo stile Noto è stata considerata come la più grande dimostrazione della creatività artistica di tutti i tempi.

#### *Rigidità e rapporto di smorzamento da prove di laboratorio*

Il modulo di Young  $E$ , il modulo di taglio  $G$  ed il rapporto di smorzamento  $D$  dei terreni leggermente sovraconsolidati di Noto sono stati ottenuti in laboratorio da prove triassiali cicliche ( $CLT_xT$ ), prove di colonna risonante ( $RCT$ ) e prove di taglio torsionale ciclico ( $CLTST$ ). Per questo scopo sono stati utilizzati l'apparecchio triassiale ciclico<sup>12</sup> e l'apparecchio di colonna risonante/taglio torsionale ciclico<sup>13</sup>.

$E$  e  $G$  sono rispettivamente i moduli ricavati da  $CLT_xT$ ,  $CLTST$  e  $RCT$ , mentre  $E_0$  e  $G_0$  rappresentano il valore massimo o anche valore di "plateau" osservato sul diagramma  $E\text{-}\log(\epsilon)$  oppure  $G\text{-}\log(\gamma)$ . Generalmente  $E$  e  $G$  sono costanti fino a quando non viene superato un certo limite di deformazione. Questo limite è chiamato soglia elastica della deformazione di taglio ( $\gamma_t^e$ ) e si ritiene che i terreni assumano un comportamento elastico per deformazioni inferiori a  $\gamma_t^e$ . La rigidità elastica per  $\gamma < \gamma_t^e$  assume il valore già definito di  $G_0$ .

Per l'esecuzione della prova triassiale ciclica ( $CLT_xT$ ) il provino, dopo l'allestimento a secco, è stato riconsolidato alla tensione geostatica di sito (condizione  $K_0$ ). Dopo la fase di consolidazione, il provino è stato sottoposto ad una prova triassiale ciclica ( $CLT_xT$ ) a velocità di deformazione costante<sup>14</sup>. Il provino è stato sottoposto a sei differenti livelli di deformazione di ampiezza progressiva. Sono stati applicati cir-

<sup>12</sup> CAVALLARO 1997; CAVALLARO ET ALII 1998.

<sup>13</sup> LO PRESTI ET ALII 1993.

<sup>14</sup> LO PRESTI ET ALII 1999.

ca 30 cicli per ciascun livello di deformazione. La massima deformazione assiale applicata (a singola ampiezza) è stata di circa il 30 %. Lo stesso provino è stato sottoposto, dopo un periodo di riposo di 24 ore a drenaggio aperto, ad una prova di carico monotonic (MLT<sub>x</sub>T). Le condizioni delle prove di laboratorio sono riportate nella tabella 2.

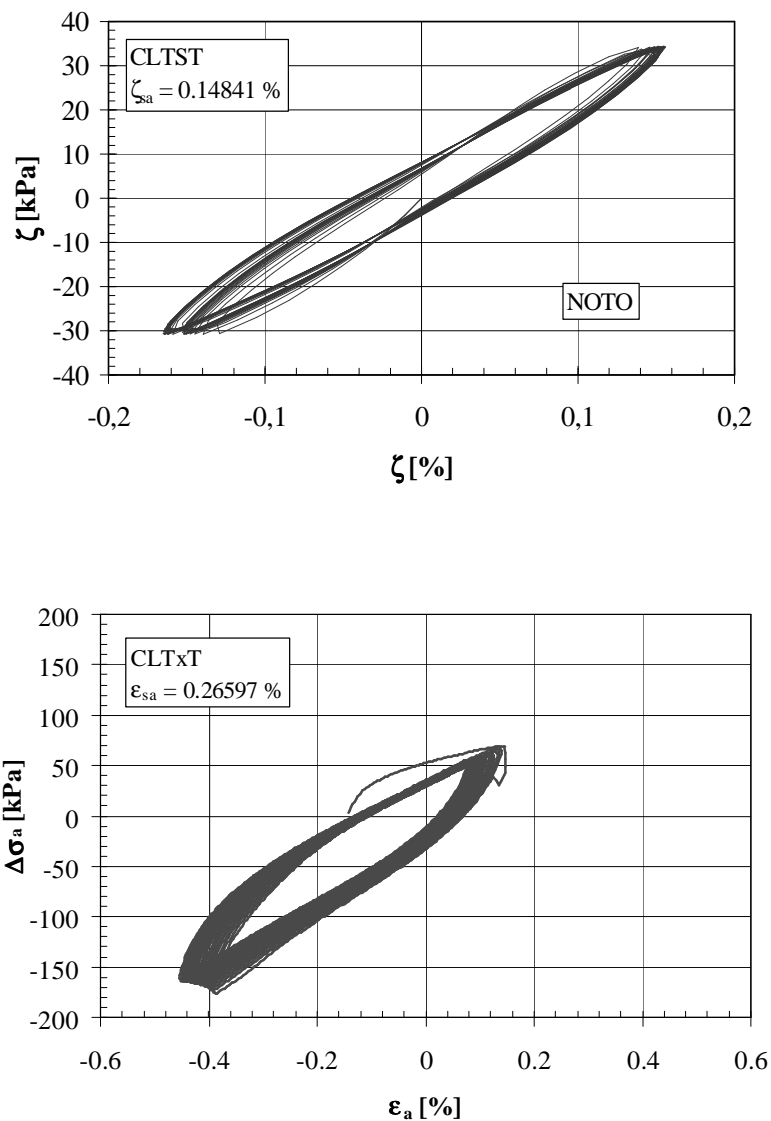


Fig. 2 - Cicli di carico instabili durante prove CLTST e CLTxT.

Prova	H [m]	$\sigma'_{vc}$ [kPa]	$\sigma'_{hc}$ [kPa]	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	e	IP	Provino
CLTxT	10.00	225	195	19.47	0.817	41	U - S
RCT CLTST	10.00	190	163	19.69	0.740	41	U - H

Tab. 2 - Condizioni di prova per i provini di terreno di Noto.

Dove:  $\sigma'_{vc}$  = Tensione verticale di consolidazione.  $\sigma'_{hc}$  = Tensione orizzontale di consolidazione.  $\gamma$  = Peso dell'unità di volume totale. e = Indice dei vuoti. IP = Indice di Plasticità; U = Non drenato. S = Provino cilindrico pieno. H = Provino cilindrico cavo.

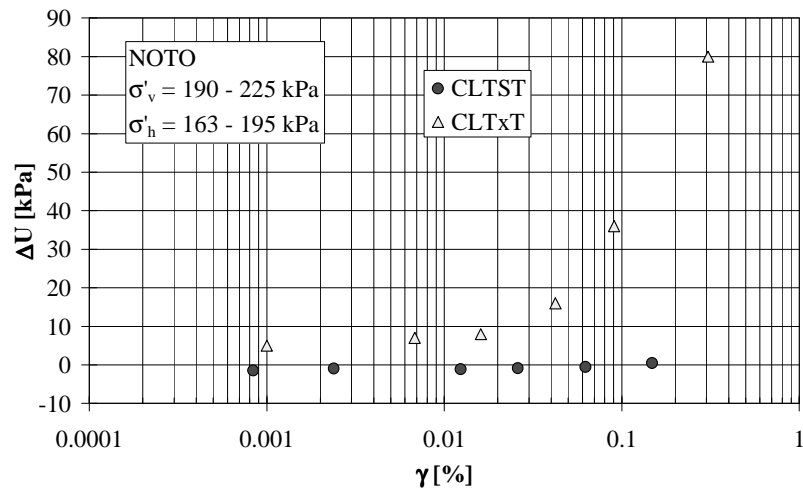


Fig. 3 - Incremento della pressione interstiziale durante le prove CLTxT e CLTST.

La rigidità secante del terreno ( $E_s$ ), ricavata da prove di carico monotono, fig. 4, è stata confrontata con quella ottenuta da cicli di carico e ricarico ( $E_{eq}$ ).

Il valore di  $E_o$  ricavato da prove CLTxT e MLTxT, indica un buon accordo fra le prove cicliche e quella monotona anche per deformazioni molto piccole in corrispondenza delle quali il comportamento del terreno è considerato elastico. L'effetto delle condizioni di carico diviene maggiormente rilevante con l'aumentare del livello di deformazione, come è possibile osservare in Figure 4 dove sono confrontate le curve  $E$ - $\epsilon$  ricavate da prove MLTxT e CLTxT. E' possibile osservare che la degradazione più bassa di  $E$  con  $\epsilon$  si osserva per la prova MLTxT, mentre la degradazione maggiore avviene nel corso della prova CLTxT. Dopo un livello di deformazione dello 0.3% il modulo degrada in maniera analoga sia per la prova MLTxT che per la prova CLTxT a causa dell'istaurarsi di fenomeni di degradazione. E' possibile



osservare che le curve di degradazione coincidono per un intervallo compreso tra 0.001-0.01%. Dopo questo intervallo, le prove cicliche mostrano un progressivo declino analogo alla curva monotona a causa della naturale degradazione delle caratteristiche meccaniche dei materiali.

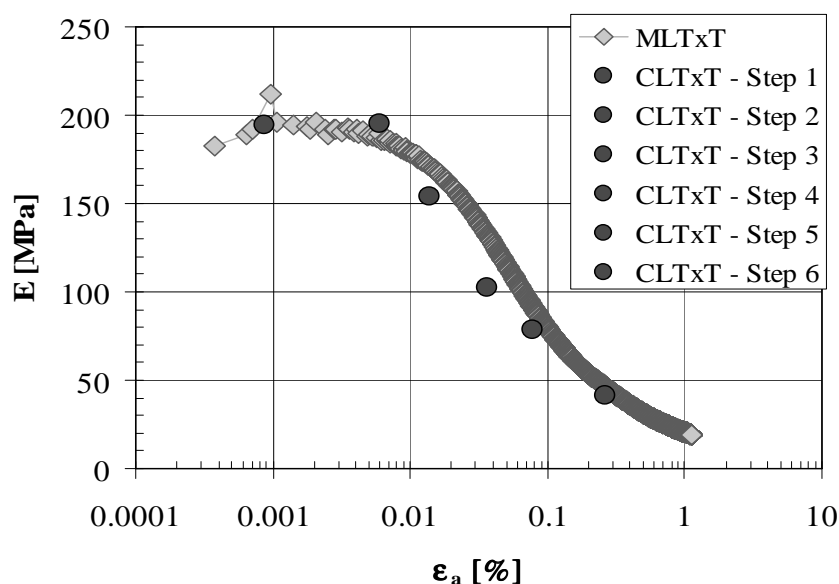


Fig. 4 - E rispetto alla deformazione assiale da prove MLTxT e CLTxT.

Questa riduzione del modulo è stata probabilmente causata da questi fattori:

- l'aumento della pressione interstiziale con conseguente riduzione della tensione efficace;
- la degradazione del terreno causata dal massimo livello di deformazione di taglio investigato durante la prova.

Inoltre, considerando che dopo un periodo di 24 ore con il drenaggio aperto, il valore del modulo iniziale di Young in corrispondenza delle piccole deformazioni, determinato nel corso di una prova MLTxT, è confrontabile a quello ottenuto all'inizio di una prova CLTxT, è possibile assumere la riduzione del modulo di taglio come la conseguenza della riduzione delle tensioni efficaci per effetto dell'aumento della pressione interstiziale. Cosicché è possibile considerare che l'energia elastica perduta sia stata recuperata nell'arco di 24 ore attraverso la dissipazione della pressione interstiziale.

### *Influenza di N sulla rigidezza e sul rapporto di smorzamento*

L'influenza del numero di cicli N sulla rigidezza e sullo smorzamento (D) è illustrata nella fig. 5 che riporta i risultati caratteristici di una prova, in corrispondenza di differenti livelli di deformazione, relativi alla diminuzione di E ed all'incremento di D con N. L'effetto è praticamente trascurabile per livelli di deformazione inferiori allo 0.1% ma diviene rilevante superato tale limite<sup>15</sup>.

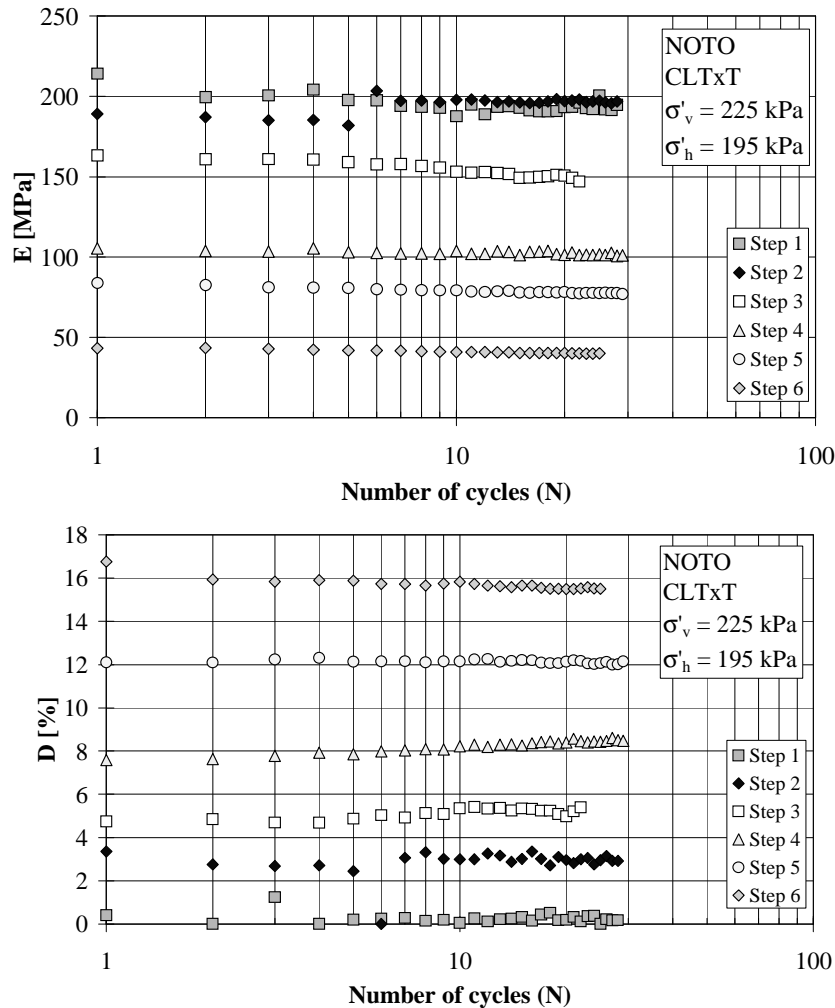


Fig. 5 - Influenza del numero di cicli (N) sulla rigidezza e sul rapporto di smorzamento nel corso di prove di scarico e ricarica.

<sup>15</sup> CAVALLARO ET ALII 1999a, 1999b, 2001; LO PRESTI ET ALII 1997a, 1997b, 1998.

Questo andamento è dovuto all'effetto della degradazione del terreno e solamente per lo *step* 1 ( $\epsilon_{sa} = 0.00087\%$ ) è possibile osservare una diminuzione di D. Gli Autori ritengono che tale comportamento potrebbe essere conseguenza della velocità di deformazione molto bassa (vedi tabella 3) e quindi conseguenza delle deformazioni da *creep*. Inoltre, anche per frequenze consuete (0.1 Hz)<sup>16</sup> osservano un comportamento analogo nel caso di argille debolmente sovraconsolidate.

Prova	Stress Path	Velocità di Deformazione [%/min]	Frequenza [Hz]	Tipo di Controllo
CLTxT	$S_3 = \text{costante}$	0.01/0.1	0.01/0.001	deformazione
MLTxT	$S_3 = \text{costante}$	0.01/0.1	0.01/0.001	deformazione
CLTST	$S = \text{costante}$	0.0025/2.5	0.1	carico
RCT	$S = \text{costante}$	1/5000	20/50	carico

Tab. 3 - Condizioni di prova nelle differenti prove.

### Utilizzo del parametro di degradazione

Un modo per considerare il fenomeno della degradazione è quello di introdurre un parametro di degradazione. IDRIS ET ALII<sup>17</sup> proposero un modello non lineare, che prende in considerazione il comportamento degradante delle argille. Il modello è basato sui risultati delle prove cicliche di laboratorio eseguite in condizioni di carico a controllo di deformazione ed utilizza l'equazione di RAMBERG & OSGOOD<sup>18</sup> per tracciare l'andamento iniziale della curva di primo carico non degradata. La degradazione del terreno è stata rappresentata in termini di rapporto tra il modulo di taglio equivalente al ciclo N ( $G_{eqN}$ ), ed il modulo di taglio equivalente al primo ciclo ( $G_{eq1}$ ) (il cosiddetto modulo non degradato), in corrispondenza dello stesso livello deformativo. Questo rapporto viene definito come l'indice di degradazione  $\delta$ , e per una data prova a controllo di deformazione, l'andamento del logaritmo dell'indice di degradazione rispetto al logaritmo del numero di cicli di carico ha un andamento lineare (fig. 6). L'indice di degradazione è legato al numero di cicli di carico N, dalla relazione:

$$\delta = \frac{G_{eqN}}{G_{eq1}} = \frac{(\tau_{cN}/\gamma_c)}{(\tau_{c1}/\gamma_c)} = \frac{\tau_{cN}}{\tau_{c1}} = N^{-t} \quad (1)$$

<sup>16</sup> CAVALLARO ET ALII 2003b.

<sup>17</sup> IDRIS ET ALII 1978.

<sup>18</sup> RAMBERG, OSGOOD 1943.

Cosicché l'indice di degradazione, per un dato livello di deformazione, è calcolato come il rapporto tra la "tensione misurata"  $\tau_{cN}$  del ciclo N e la tensione di picco  $\tau_{c1}$  calcolata al 1° ciclo e ricavata dalla curva iniziale di primo carico in corrispondenza di quel valore di deformazione. E' importante notare che nel lavoro di IDRISS *ET ALII*<sup>19</sup> la curva di primo carico non degradata non è stata determinata da prove di carico monotono, come proposto dagli autori, ma dal primo ciclo non degradato. Per regola, l'indice di degradazione potrebbe anche essere definito in funzione dell'incremento del rapporto di smorzamento con N.

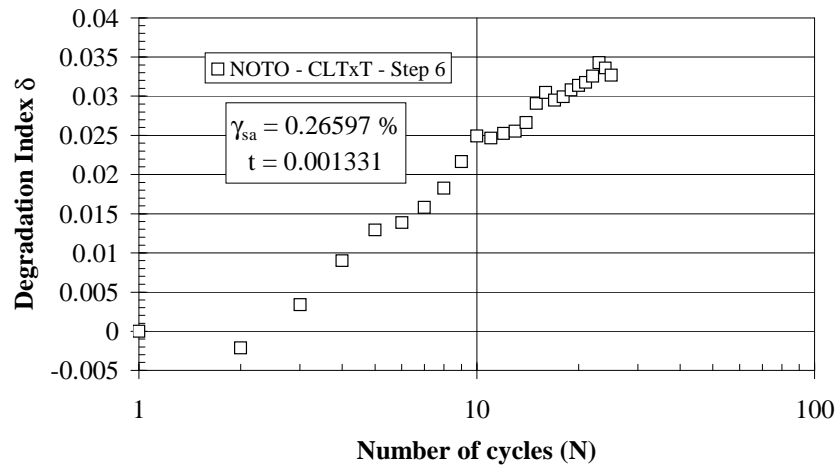


Fig. 6 - Indice di degradazione rispetto al numero di cicli di carico.

Nell'equazione (1)  $t$  è la pendenza della curva  $\log\delta$ - $\log N$  e rappresenta un parametro di degradazione. Praticamente  $t$  descrive la pendenza negativa della relazione:

$$t = -\frac{\log\delta}{\log N} \quad (2)$$

I valori del parametro  $t$ , in fig. 7, aumentano al crescere della deformazione ed è stata individuata l'esistenza di un'unica ragionevole relazione tra il parametro  $t$  e il livello di deformazione<sup>20</sup>.

L'approccio sopra descritto non è direttamente applicabile in condizioni di prove di carico a controllo di carico. LIN & CHEN<sup>21</sup> hanno

<sup>19</sup> IDRISS *ET ALII* 1978.

<sup>20</sup> VUCETIC, DOBRY 1988; VUCETIC 1991.

<sup>21</sup> LIN, CHEN 1991.

proposto un'estensione del modello non lineare di IDRISS *ET ALII*<sup>22</sup> per il caso delle prove a controllo di carico. L'indice di degradazione  $\delta_N$ , per qualunque ciclo N, può essere calcolato utilizzando le curve di primo carico descritte dall'equazione di R-O e la tensione e la deformazione misurata in corrispondenza di un determinato ciclo, attraverso l'equazione:

$$\delta_N = \frac{\tau_c}{\tau_{R-O-\gamma_1}} \quad (3)$$

dove  $\tau_c$  è la "tensione applicata" e  $\tau_{R-O-\gamma_1}$  è la tensione determinata dalla curva di primo carico R-O non degradata in corrispondenza del livello di deformazione  $\delta_N$  al ciclo N. Cosicché l'indice di degradazione,  $\delta_N$  per ciascun valore di deformazione, potrebbe essere calcolato come il rapporto tra la tensione di picco applicata nel ciclo diviso la tensione di picco determinata dalla curva di primo carico non degradata.

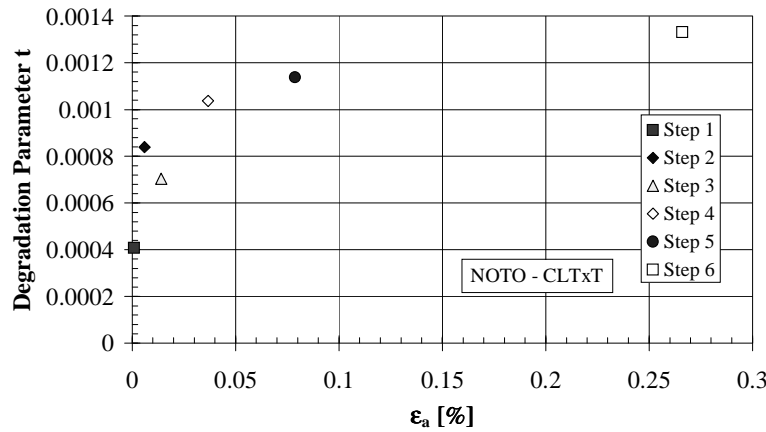


Fig. 7 - Parametro di degradazione rispetto alla deformazione assiale da prove CLTxT.

In accordo a LIN & CHEN<sup>23</sup>, per una prova a controllo di carico, la deformazione misurata varia con il numero di cicli cosicché non è direttamente applicabile l'equazione (1). Comunque, se il numero di cicli N nell'equazione (1) è correlato ad un numero equivalente di cicli  $N'$ , che è il numero di cicli di uniforme ampiezza di deformazione necessari a causare un indice di degradazione  $\delta_N$  in corrispondenza di

<sup>22</sup> IDRISS *ET ALII* 1978.

<sup>23</sup> LIN, CHEN 1991.

un'ampiezza di deformazione uguale all'ampiezza attuale del ciclo  $N+1$ , l'equazione (1) può essere espressa come:

$$\delta_{N+1} = (\delta_N^{-1} + 1)^{-t} \quad (4)$$

Cosicché il parametro di degradazione  $t$  può essere calcolato per ciascun ciclo, nel caso di una prova a controllo di carico, attraverso una procedura iterativa per l'intero campo di deformazioni investigato nella prova.

Il valore del parametro  $t$ , in fig. 8, è stato pertanto calcolato, per il terreno di Noto, passo dopo passo utilizzando l'equazione (4). Nella stessa Figura sono inoltre illustrati i risultati ottenuti per le argille di Augusta e Catania (fig. 8). La caratteristiche di questi terreni sono riportati nella tabella 4. E' possibile osservare che lo stesso andamento di  $t$  con  $\gamma$  è stato ottenuto per entrambi i terreni. I valori ottenuti sono molto più grandi di quelli disponibili in letteratura<sup>24</sup>.

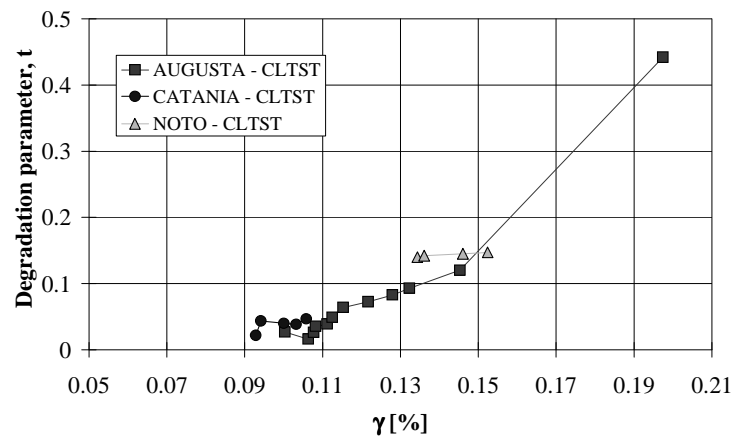


Fig. 8 - Parametro di degradazione rispetto alla deformazione di taglio da prove CLTST.

Sito	IP	e	$\sigma'_{vc}$ [kPa]	$\sigma'_{hc}$ [kPa]	c' [kPa]	$\varphi'$
Augusta	38	0.768 - 0.838	377 - 398	377 - 398	35	17
Catania	29	0.582	246	246	43	24
Noto	41	0.740 - 0.817	190	163	5	27

Tab. 4 - Caratteristiche dei terreni coesivi di Augusta, Catania e Noto.

<sup>24</sup> VUCETIC, DOBRY 1988; VUCETIC 1991.

dove: IP = Indice di Plasticità; e = Indice dei vuoti;  $\sigma'_{vc}$  = Tensione verticale di consolidazione;  $\sigma'_{hc}$  = Tensione orizzontale di consolidazione; c' = coesione efficace;  $\varphi'$  = Angolo di resistenza al taglio efficace.

### Conclusioni

Nel presente lavoro, al fine di eseguire uno studio di microzonazione sismica, sono state presentate alcune informazioni riguardanti il comportamento degradante del terreno dell'area storica di Noto. I dati ottenuti ci consentono da un lato di definire l'andamento del modulo di taglio e dello smorzamento con la deformazione, dall'altro di capire come tali parametri sono influenzati dal numero di cicli di carico. Sulla base dei risultati sperimentali ricavati è possibile tracciare le seguenti conclusioni:

- quando  $\gamma \geq \gamma_t^v$ , si instaura il fenomeno della degradazione;
- la degradazione determina una diminuzione della rigidezza, un incremento di D e della pressione interstiziale con l'aumentare del numero di cicli N;
- velocità di deformazione molto basse possono determinare una diminuzione D.

Infine per il parametro di degradazione (t), proposto da IDRIS ET ALII<sup>25</sup> per le prove cicliche eseguite in condizioni di controllo di deformazione, è stata proposta una nuova formulazione basata sulla procedura proposta da LIN & CHEN<sup>26</sup> per le prove cicliche eseguite in condizioni di controllo di carico.

### ABBREVIAZIONI BIBLIOGRAFICHE

- AGNELLO G. 1931, *Memorie Inedite Varie sul Terremoto Siciliano del 1693*, in *Archivio Storico per la Sicilia Orientale*, s. II, a. 7, pp. 390-402.
- AGNELLO G.M. 1997, *Considerazioni sul Sisma del 1169*, in *La Sicilia dei Terremoti*, Catania, pp. 101-127.
- ANONIMO 1693, *Sincera, ed Esatta Relazione dell'Orribile Terremoto Seguito nell'Isola di Sicilia il Di 11 di Gennaio 1693. Colla Nota delle Città, e Terre Sprofondate, de' Morti, e Luoghi, che Hanno Patito, e con Tutte le Particolarità Più Degne da Essere Registrate*. Roma.
- BARBANO M.S. 1985a, *The Val di Noto Earthquake of December 10, 1542*, in POSTPISCHL 1985, pp. 28-29.
- BARBANO M.S. 1985b, *The Val di Noto Earthquake of January 11, 1693*, in POSTPISCHL 1985, pp. 48-49.

<sup>25</sup> IDRIS ET ALII 1978.

<sup>26</sup> LIN, CHEN 1991.

- BOCCONE P. 1697, *Intorno il Terremoto della Sicilia, Seguito l'Anno 1693*. Museo di Fisica e di Esperienze Variato, e Decorato di Osservazioni Naturali, Note Medicinali, e Ragionamenti Secondo i Principi de' Moderni, Venezia, pp. 1-31.
- BOSCHI E., FERRARI G., GASPERINI P., GUIDOBONI E., SMRIGLIO G., VALENSISE G. 1995, *Catalogo dei Forti Terremoti in Italia dal 461 a.C. al 1980*. Istituto Nazionale di Geofisica, Storia Geofisica Ambientale, Bologna.
- BOSCHI E., GUIDOBONI E., FERRARI G., VALENSISE G., GASPERINI P. 1997, *Catalogo dei Forti Terremoti in Italia dal 461 a.C. al 1990*. Istituto Nazionale di Geofisica, Storia Geofisica Ambientale, Bologna.
- BOTTONE D. 1718, *De Immani Trinacriae Terraemotu. Idea Historico-Physica, in Qua non Solum Telluris Concussiones Transactae Recensetur, sed Novissimae Anni 1717*, Messina.
- CAVALLARO A. 1997, *Influenza della Velocità di Deformazione sul Modulo di Taglio e sullo Smorzamento delle Argille*. Ph. D. Thesis, University of Catania.
- CAVALLARO A., LO PRESTI D.C.F., MAUGERI M., PALLARA O. 1998, *Strain Rate Effect on Stiffness and Damping Ratio of Clays*, in *Italian Geotechnical Journal*, XXXII, 4, pp. 30-50.
- CAVALLARO A., LO PRESTI D.C.F., MAUGERI M., PALLARA O. 1999a, *A Case Study (The Saint Nicolò Cathedral) for Dynamic Characterization of Soil from in Situ and Laboratory Tests*, in *Proceeding of the 2<sup>nd</sup> International Symposium on Earthquake Resistant Engineering Structures (Catania, 15 - 17 June 1999)*, pp. 769-778.
- CAVALLARO A., MAUGERI M., LO PRESTI D.C.F., PALLARA O. 1999b, *Characterising Shear Modulus and Damping from in Situ and Laboratory Tests for the Seismic Area of Catania*, in *Proceeding of the 2<sup>nd</sup> International Symposium on Pre-failure Deformation Characteristics of Geomaterials (Torino, 28-30 September 1999)*, pp. 51-58.
- CAVALLARO A., FIORAVANTE V., LANZO G., RAMPOLLO S., LO PRESTI D.C.F., PALLARA O., D'ONOFRIO A., SANTUCCI F., SILVESTRI F. 2001, *Report on the Current Situation of Laboratory Stress-Strain Testing of Geomaterials in Italy and its Use in Practice*, in TATSUOKA F., SHIBUYA S., KUWANO R. (eds.), *Advanced Laboratory Stress-Strain Testing of Geomaterials*, pp. 15-44.
- CAVALLARO A., MASSIMINO M.R., MAUGERI M. 2003a, *Noto Cathedral: Soil and Foundation Investigation*, in *Construction and Building Materials*, 17, pp. 533-541.
- CAVALLARO A., MAUGERI M. 2003, *Site Characterization by In-Situ and Laboratory Tests for the Microzonation of Noto*, in MAUGERI M., NOVA R. (eds.), *Proceedings of Symposium on Geotechnical Analysis of Seismic Vulnerability of Monuments and Historical Sites (Catania, 15 November 2001)*, pp. 237-256.
- CAVALLARO A., LANZO G., PAGLIAROLI A. LO PRESTI D.C.F., MAUGERI M. 2003b, *A Comparative Study on Shear Modulus and Damping Ratio for a Cohesive Soil from Laboratory Tests*, in *Proceeding of the 3<sup>rd</sup> International Symposium on Deformation Characteristics of Geomaterials (Lyon, 22-24 September 2003)*, pp. 257-265.
- CONSIGLIO NAZIONALE DELLE RICERCHE 1985a, *Catalogo dei Terremoti Italiani dall'Anno 1000 al 1980*. Progetto Finalizzato Geodinamica.



- CONSIGLIO NAZIONALE DELLE RICERCHE 1985b, *Atlas of Iseismic Maps of Italian Earthquakes*. Progetto Finalizzato Geodinamica.
- DE RUBEIS V., GASPARINI C., MARAMAI A., ANZIDEI M. 1991, *Il Terremoto Siciliano del 13 Dicembre 1990*. Istituto Nazionale di Geofisica. Roma.
- GASPERINI P., FERRARI G. 1997, *Stima dei Parametri Sintetici: Nuove Elaborazioni. Catalogo dei Forti Terremoti in Italia dal 461 a.C. al 1990*. Istituto Nazionale di Geofisica, Storia Geofisica Ambientale, Bologna. Istituto Nazionale di Geofisica, Storia Geofisica Ambientale, Bologna, pp. 56-64.
- HA-KOHEN Y. XVI secolo, *Lettera di Yosef Ha-Kohen a Yisbaq Ha-Kohen*. Manoscritto, Raccolta Epistolare KM 55, Biblioteca The Jewish National and University Library.
- IDRISS I.M., DOBRY R., SINGH R.D. 1978, *Nonlinear Behavior of Soft Clays During Cyclic Loading*, in *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, GT12, pp. 1427-1447.
- LIN M.L., CHEN J.Y. 1991, *Degradation Behavior of Normally Consolidated Clay Under Cyclic Loading Condition*, in *Proceeding of the 2<sup>nd</sup> International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics (St. Louis, 11-15 March)*, 1991, pp. 21-26.
- LOMBARDO G. 1985, *The Catania Earthquake of February 4, 1169*, in D. POSTPISCHL (ed.), *Atlas of Iseismic Maps of Italian Earthquake*. Consiglio Nazionale delle Ricerche. Progetto Finalizzato Geodinamica. Quaderni de "La Ricerca Scientifica", 114, 2, pp. 12-13.
- LO PRESTI D.C.F., PALLARA O., LANCELLOTTA R., ARMANDI M., MANISCALCO R. 1993, *Monotonic and Cyclic Loading Behavior of Two Sands at Small Strains*, in *Geotechnical Testing Journal*, December 1993, pp. 409-424.
- LO PRESTI D.C.F., JAMIOLKOWSKI M., PALLARA O., CAVALLARO A., PEDRONI S. 1997a, *Shear Modulus and Damping of Soils*, in *International Symposium on the Pre-failure Deformation Behaviour of Geomaterials, 50<sup>th</sup> Geotechnique (London, 4 September 1997)*, *Geotechnique*, 47, 3, pp. 603-617.
- LO PRESTI D.C.F., PALLARA O., CAVALLARO A. 1997b, *Damping Ratio of Soils from Laboratory and in Situ Tests*, in *Proceeding of the 14<sup>th</sup> International Conference on Soil Mechanics and Foundations Engineering*, Hamburg, Special Volume TC4, 6-12 September 1997, pp. 391-400.
- LO PRESTI D.C.F., MAUGERI M., CAVALLARO A., PALLARA O. 1998, *Shear Modulus and Damping of a Stiff Clay from in Situ and Laboratory Tests*, in *Proceedings of the 1<sup>st</sup> International Conference on Site Characterization (Atlanta, 19-22 April 1998)*, pp. 1293-1300.
- LO PRESTI D.C.F., JAMIOLKOWSKI M., CAVALLARO A., PALLARA O. 1999, *Influence of Reconsolidation Techniques and Strain Rate on the Stiffness of Undisturbed Clays from Triaxial Tests*, in *Geotechnical Testing Journal*, 22, 3, September 1999, pp. 211-225.
- POSTPISCHL D. 1985, *Atlas of Isosismal Maps of Italian Earthquakes*. CNR, Geodynamical Project, Rome.
- PERTZ K. 1866, *Monumenta Germaniae Historica*. SS. Tomo 19, Hannover, pp. 236-266.

- RAMBERG W., OSGOOD W.R. 1943, *Description of Stress-Strain Curves by Three Parameters*. Tech. Note 902, Nat. Advisory Committee for Aeronautics, Washington DC.
- ROVELLI A., BOSCHI E., COCCO M., DI BONA M., BERARDI R., LONGHI G. 1991, *Il Terremoto del 13 Dicembre 1990 nella Sicilia Orientale: Analisi dei Dati Accelerometrici. Contributi allo Studio del Terremoto della Sicilia Orientale del 13 Dicembre 1990*. Istituto Nazionale di Geofisica. Roma.
- SIRAGUSA G.B. 1897, *Fonti per la Storia d'Italia*. SS., sec. XII, 22, Roma.
- VUCETIC M., DOBRY R. 1988, *Degradation of Marine Clays Under Cyclic Loading*, in *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 114, 2, pp. 133-149.
- VUCETIC M. 1991, *Relation Between the Basic Soil Properties and Seismic Response of Natural Soil Deposits*, in *International Symposium on Building Technology and Earthquake Hazard Mitigation (Kunming, 25-29 March 1991)*.