

## **9. STUDIO DELLA PROPAGAZIONE DI UN MAREMOTO NELL'AREA SIRACUSA-AUGUSTA**

*S. Tinti, A. Armigliato, E. Bortolucci*

### **9.1 Introduzione**

Il tema della ricerca condotta dal gruppo dell'Università di Bologna è stato lo studio del maremoto generato dal terremoto dell'11 gennaio 1693. Tale studio ha avuto come principale obiettivo quello di porre vincoli sulla faglia generatrice del terremoto. Nei due studi recenti di Piatanesi et al. (1996) e Piatanesi e Tinti (1998) erano stati studiati gli aspetti idrodinamici del maremoto prodotto da faglie essenzialmente teoriche, cioè fondate dal punto di vista della generazione del maremoto ma prive di evidenze geologiche. Due importanti novità sono state introdotte nella presente ricerca (si veda, per maggiori dettagli, Tinti et al., 1999): in primo luogo, sono state prese in considerazione diverse faglie proposte in letteratura sulla base di dati macrosismici e/o geologici; in secondo luogo, è stata creata una nuova griglia agli elementi finiti caratterizzata da un numero più elevato di nodi rispetto a quella usata negli studi precedenti, e quindi da una rappresentazione più fedele delle linee di costa e del profilo batimetrico. I risultati delle simulazioni numeriche del maremoto prodotto da ciascuna faglia sono stati confrontati con le osservazioni storiche allo scopo di stabilire quale fra le varie faglie sia la più plausibile. Il risultato principale è che, anche se nessuna delle faglie prese in esame riproduce completamente le osservazioni disponibili sul maremoto, alcune le riproducono assai meglio di altre, ed è quindi possibile stabilire una graduatoria di compatibilità: le faglie che danno i risultati migliori sono associate ai graben della regione Scordia-Lentini.

### **9.2 Metodo**

Le simulazioni di maremoto sono state effettuate mediante un codice agli elementi finiti (Tinti et al., 1994), che risolve le equazioni non lineari di Navier-Stokes nella cosiddetta approssimazione di "shallow water". L'algoritmo sfrutta griglie formate da elementi triangolari e "shape functions" lineari. Le condizioni al contorno sono di pura riflessione dell'onda di maremoto sulla costa e di pura trasmissione in mare aperto. Per quel che riguarda le condizioni iniziali, il campo di velocità iniziale dell'onda è scelto identicamente nullo, mentre l'elevazione iniziale dell'acqua coincide con la deformazione cosismica del fondo marino prodotta dal terremoto: quest'ultima viene calcolata mediante le formule analitiche di Okada (1992) e l'applicazione di un algoritmo, valido per griglie agli elementi finiti, per il calcolo approssimato dell'effetto della topografia del fondo marino sul campo di deformazione cosismica (Tinti e Armigliato, 1999). La griglia utilizzata nel nostro

studio è riportata in Fig. 9.1. E' importante sottolineare che tale griglia è costituita da un numero di nodi raddoppiato rispetto alla griglia utilizzata in studi precedenti, incremento che si traduce in una migliore definizione sia della linea costiera che della batimetria in mare aperto. Si può osservare, in particolare, che per tale griglia i bacini di Augusta e Siracusa sono rappresentati da linee di costa descritte con buon dettaglio, il che come vedremo in seguito è un fatto rilevante.

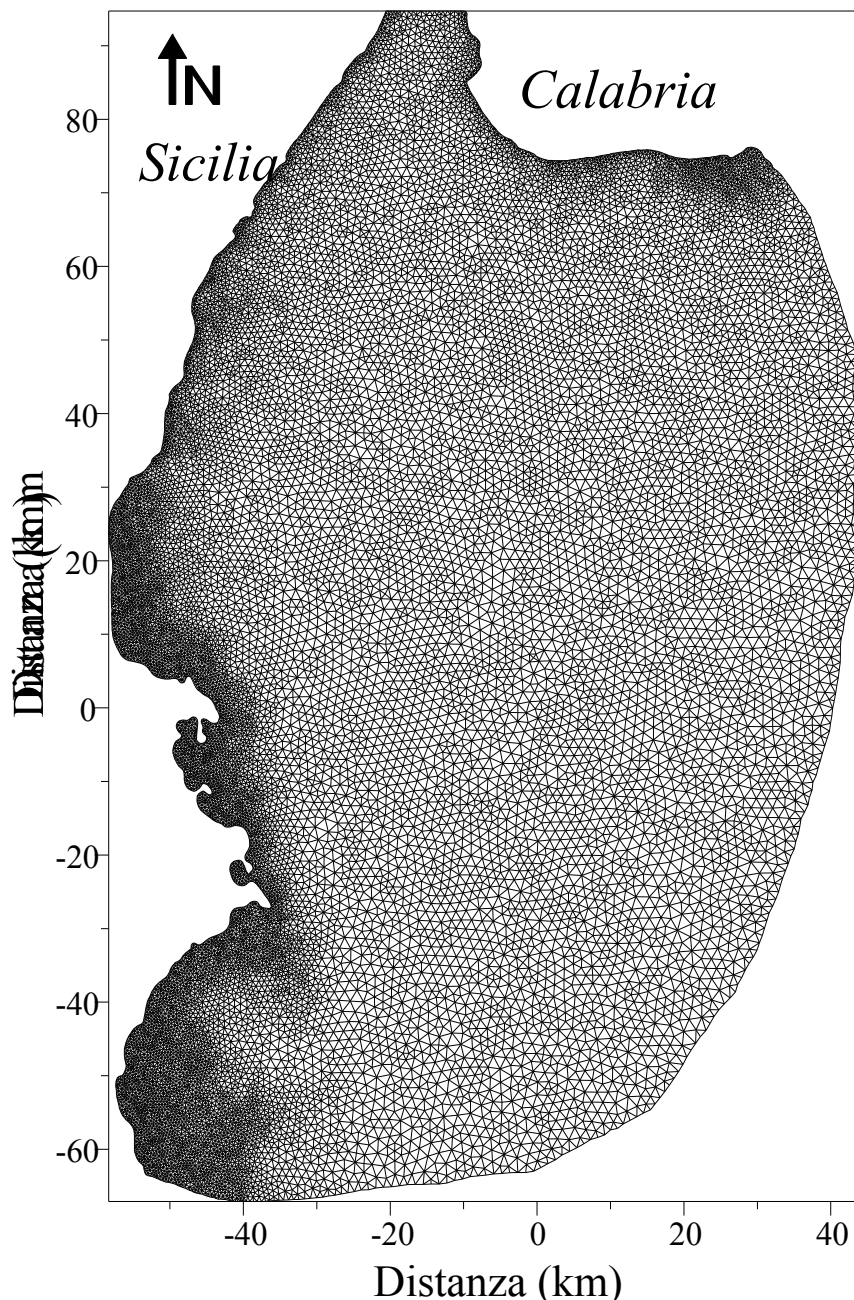


Fig. 9.1 - Griglia agli elementi finiti usata nelle simulazioni di maremoto

### 9.3 Risultati

La Fig. 9.2 mostra uno schema tettonico semplificato della Sicilia sud-orientale e la posizione delle faglie esaminate nel nostro studio. I valori dei parametri caratteristici delle diverse faglie sono riassunti in Tab. 9.1. I codici IM1, IM2, IM3 e IM4 indicano le faglie poste in corrispondenza della scarpata Ibleo-Maltese proposte rispettivamente da Piatanesi e Tinti (1998), Sirovich et al. (1998), Zollo et al. (1999) e una versione modificata di quest'ultima faglia. Si noti che IM3 e IM4 sono composte da due segmenti, indicati in tabella come N (Nord) e S (Sud). I codici SL1 e SL2 rappresentano invece le faglie introdotte rispettivamente da Sirovich et al. (1998) e D'Addezio e Valensise (1993), poste in corrispondenza del graben di Scordia-Lentini.

I mareogrammi sintetici prodotti da ciascuna faglia e calcolati a Catania, Augusta e Siracusa sono disegnati nelle Fig. 9.3-9.4. Per ciascuna delle città i mareogrammi sono stati calcolati in più nodi della griglia, dal momento che esse si estendono su aree geografiche che inglobano parecchi nodi. Va poi osservato che calcolare i mareogrammi in più nodi per la stessa località permette di valutare la risposta delle irregolarità della costa all'impatto dell'onda di maremoto. Qui ci limitiamo a riportare i risultati in un solo nodo per Catania, mentre per le città di Augusta e Siracusa sono mostrati i mareogrammi calcolati in due nodi distinti, che si trovano rispettivamente a metà della costa orientale (pannelli di sinistra delle Fig. 9.4 e 9.5) e della costa occidentale (pannelli di destra delle figure 9.4 e 9.5) delle rispettive penisole. Un aspetto molto interessante messo in luce dalle figure è l'effetto schermante esercitato dalle penisole sull'onda di maremoto: il segnale calcolato nei nodi che si trovano sul lato orientale delle penisole, cioè di fronte al mare aperto, è sensibilmente maggiore di quello calcolato sul lato interno delle penisole.

Tab. 9.1: Parametri delle faglie prese in considerazione per le simulazioni di maremoto.  $L$  e  $W$  indicano rispettivamente la lunghezza e la larghezza della faglia,  $M_0$  il momento sismico, il codice CPBS indica le coordinate del punto centrale del bordo superiore della faglia nel sistema di riferimento della griglia (vedi Fig. 9.1).

Faglia	Strike	Dip	Rake	L (km)	W (km)	$M_0$ (N m)	Slip (m)	CPBS (km)
IM1	346.5°	90°	270°	50	15	$1.58 \cdot 10^{20}$	6.2	(-38.0,-20.0,2.0)
IM2	350°	75°	300°	80	10	$4.65 \cdot 10^{19}$	1.7	(-38.3,4.8,2.2)
IM3 N	352°	80°	270°	22.5	15	$1.2 \cdot 10^{19}$	1.1	(-41.0,18.0,0.5)
S	346°	80°	270°	51	15	$2.8 \cdot 10^{19}$	1.1	(-28.0,-18.0,0.5)
IM4 N	352°	80°	270°	22.5	15	$1.9 \cdot 10^{19}$	1.7	(-41.0,18.0,0.5)
S	346°	80°	270°	25	15	$2.1 \cdot 10^{19}$	1.7	(-31.1,-5.4,0.5)
SL1	250°	60°	300°	40	10	$4.68 \cdot 10^{19}$	3.4	(-55.7,3.1,2.7)
SL2	67.5°	30°	270°	30	15	$1.2 \cdot 10^{20}$	8	(-58.0,18.0,3.0)

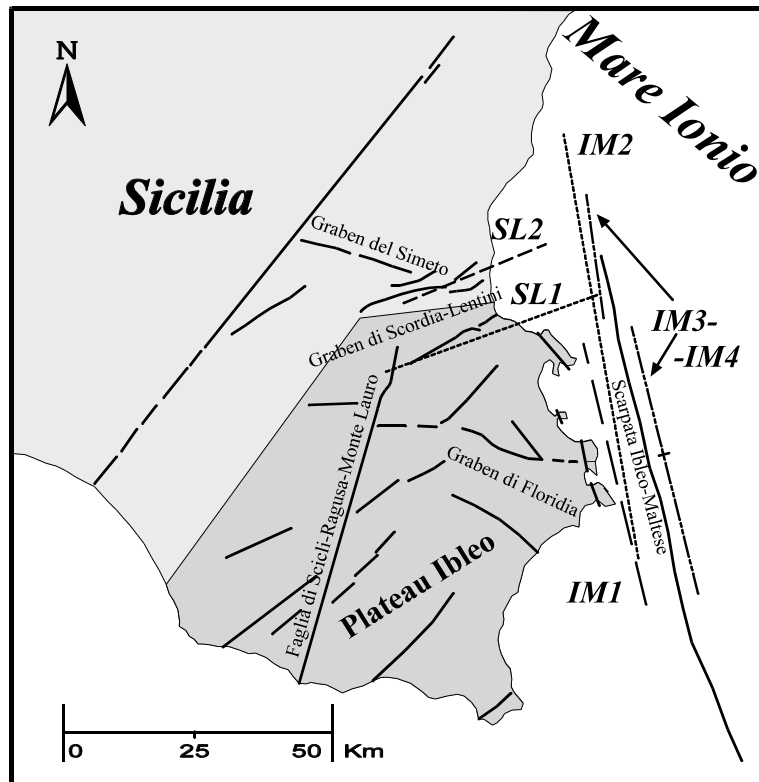


Fig. 9.2 - Schema tettonico della Sicilia sud-orientale: sono riportate le principali strutture sismogenetiche e le faglie studiate in questo lavoro

## Catania

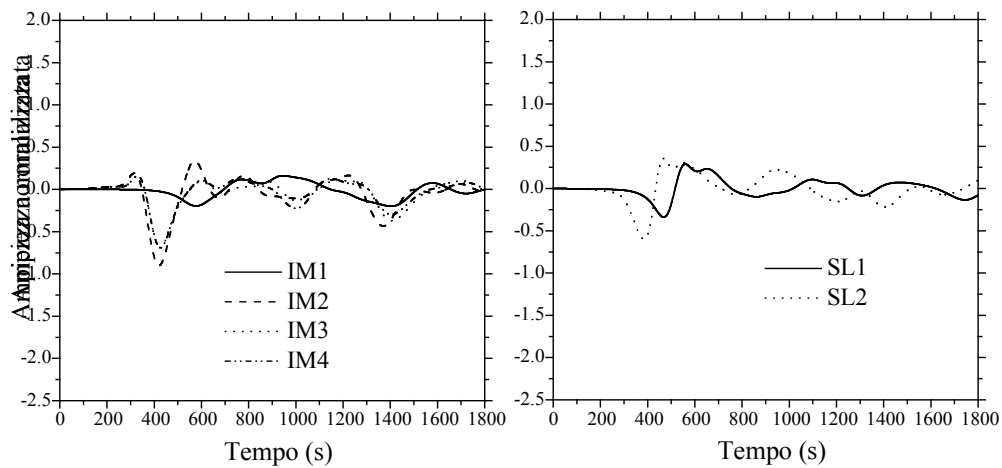


Fig. 9.3 - Mareogrammi calcolati nella città di Catania: il pannello di sinistra si riferisce alle faglie poste lungo la Scarpata Ibleo-Maltese, quello di destra alle faglie in corrispondenza del graben di Scordia-Lentini. Ciascuna curva è stata normalizzata sul valore dello slip della relativa faglia.

# Augusta

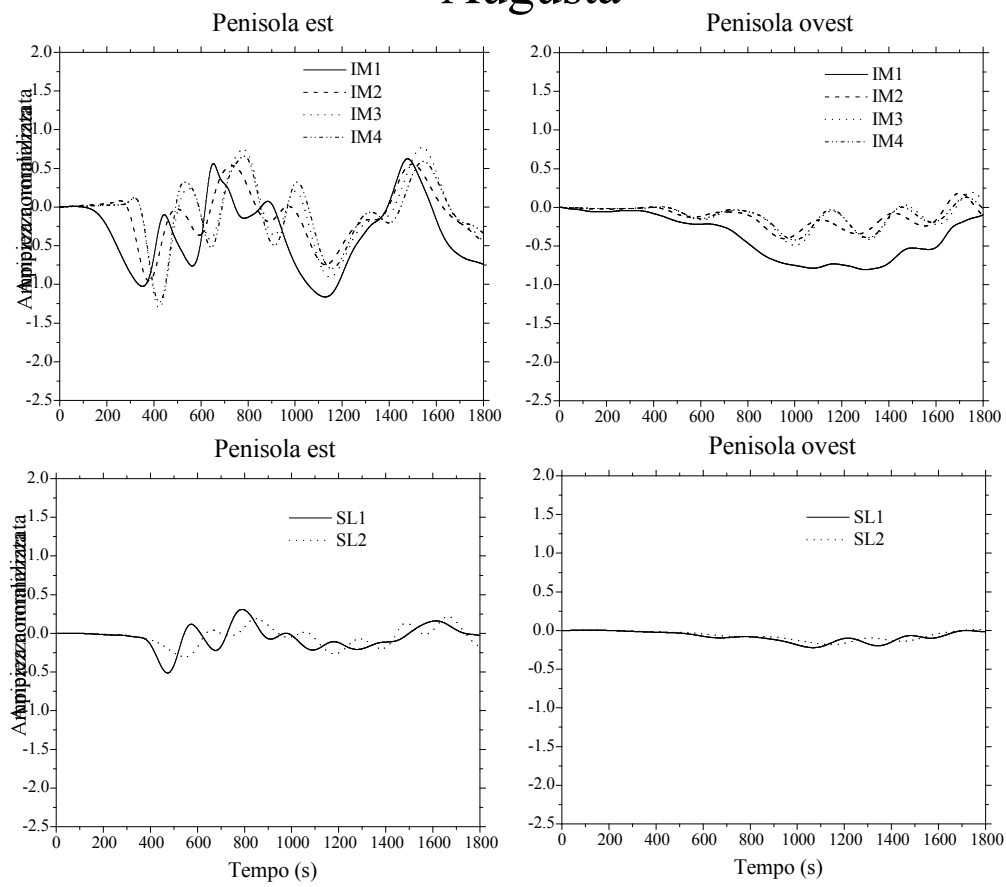


Fig. 9.4 - Mareogrammi calcolati nella città di Augusta. Le curve nei pannelli superiori e inferiori sono state calcolate a partire da faglie rispettivamente di tipo IM e SL.

# Siracusa

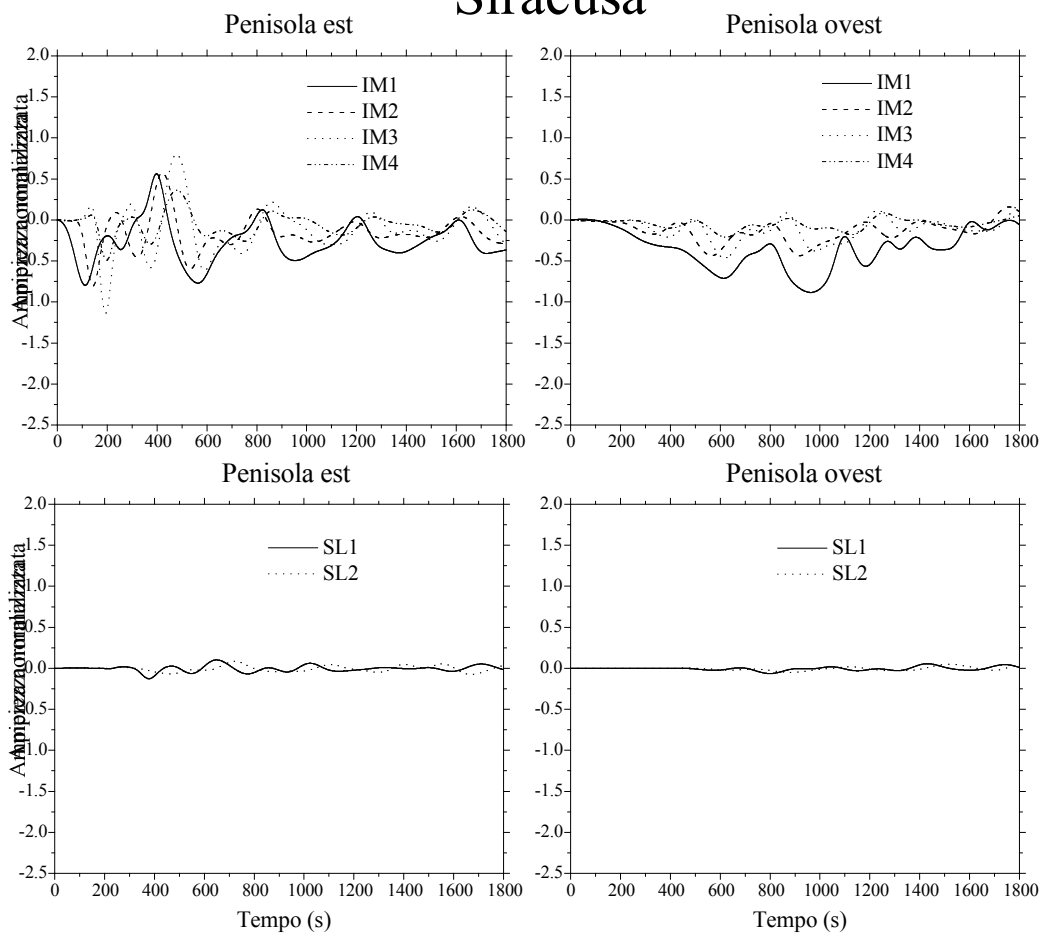


Fig. 9.5. - Come in Fig. 9.4, ma per la città di Siracusa.

Le informazioni riguardanti il maremoto deducibili dalle fonti storiche possono essere riassunte in due criteri di natura essenzialmente qualitativa: 1) lungo tutta la costa sicula il primo movimento significativo del mare fu un ritiro delle acque; 2) Augusta fu la città in cui l'onda di maremoto raggiunse la maggiore ampiezza, seguita da Catania; non sono note testimonianze di effetti significativi di maremoto a Siracusa. Questi sono i criteri che devono essere soddisfatti dalle simulazioni numeriche. Una discussione dettagliata sia sulle informazioni reperibili nelle fonti storiche e sulla loro interpretazione, sia sul confronto fra le simulazioni numeriche e i succitati criteri può essere trovata in Tinti et al. (1999). In quel lavoro i due criteri sono stati tradotti in quattro tabelle, riportate qui come Tab. 9.2-9.5, le cui colonne rappresentano i risultati dei confronti sotto forma di un punteggio per ciascuna faglia. Il punteggio è 1 se il criterio è soddisfatto, 0 se non è soddisfatto, 0.5 se la risposta non può essere data in maniera certa. Si noti che il secondo criterio è stato diviso in due parti, una riguardante l'ampiezza dei ventri delle onde, l'altra delle creste. Senza entrare ulteriormente nei dettagli, ci limiteremo qui a commentare brevemente i risultati riportati in tabella 9.5, che riassume i "punteggi totali" ottenuti dalle diverse faglie.

La prima osservazione è che le faglie con i punteggi più bassi, e quindi le meno plausibili dal punto di vista dei dati di maremoto, sono IM2 e IM3. Fra le faglie poste in corrispondenza della scarpata Ibleo-Maltese IM1 e IM4 sono quelle che ottengono i migliori punteggi. IM1 è stata introdotta da Piatanesi e Tinti (1998) sulla base di considerazioni idrodinamiche: è l'unica faglia che soddisfa completamente il primo criterio, ma ha il grave difetto di generare le onde più ampie a Siracusa, per la quale non esistono invece testimonianze di significativi effetti di maremoto. IM4 è una variante di IM3, ottenuta da quest'ultima accorciandone il segmento meridionale, imponendo cioè che su questo segmento lo slip sia stato rilasciato solo nella sua parte settentrionale. In questo modo il punteggio della faglia risulta significativamente migliorato.

Le faglie che meglio rispondono ai criteri sono SL1 e SL2, poste in corrispondenza del graben di Scordia-Lentini, introdotte rispettivamente da Sirovich et al. (1998) e D'Addezio e Valensise (1993).

L'ultima osservazione, ma forse la più importante, è che nessuna delle faglie prese in esame soddisfa pienamente i criteri imposti dalle testimonianze storiche. Ciò lascia il problema dell'identificazione della faglia responsabile del terremoto dell'11 gennaio 1693 ancora aperto e sottolinea quindi la necessità di ulteriori e più approfonditi studi.

Tab. 9.2: Primo criterio: ritiro delle acque. Soddisfatto (1); non soddisfatto (0); incerto (0.5).

	SL1	SL2	HM1	HM2	HM3	HM4
<b>Catania</b>	1	1	1	0	0	0
<b>Augusta Est</b>	1	1	1	0	0	0
<b>Augusta Ovest</b>	1	1	1	1	1	1
<b>Siracusa Est</b>	0.5	0.5	1	1	0	0.5
<b>Siracusa Ovest</b>	1	1	1	1	1	1
<b>Totale 1</b>	<b>4.5</b>	<b>4.5</b>	<b>5</b>	<b>3</b>	<b>2</b>	<b>2.5</b>

Tab. 9.3: Secondo criterio: confronti fra le ampiezze dei ventri. Soddisfatto (1); non soddisfatto (0); incerto (0.5). (AE=Augusta Est, AO=Augusta Ovest, C=Catania, SE=Siracusa Est, SO=Siracusa Ovest)

	SL1	SL2	HM1	HM2	HM3	HM4
<b>C/AE</b>	1	0	1	1	1	1
<b>SE/AE</b>	1	1	0	0	0	1
<b>SO/AE</b>	1	1	1	1	1	1
<b>C/AO</b>	0	0	1	0	0	0
<b>SE/AO</b>	0	0.5	0	0	0	0
<b>SO/AO</b>	1	1	0.5	0	0.5	1
<b>SE/C</b>	1	1	0	0	0	0
<b>SO/C</b>	1	1	0	1	1	1
<b>Totale 2</b>	<b>6</b>	<b>5.5</b>	<b>3.5</b>	<b>3</b>	<b>3.5</b>	<b>5</b>

Tab. 9.4: Secondo criterio: confronto fra le ampiezze delle creste. Soddisfatto (1); non soddisfatto (0); incerto (0.5). (AE=Augusta Est, AO=Augusta Ovest, C=Catania, SE=Siracusa Est, SO=Siracusa Ovest)

	SL1	SL2	HM1	HM2	HM3	HM4
<b>C/AE</b>	0	0	1	1	1	1
<b>SE/AE</b>	1	1	0	0	0.5	1
<b>SO/AE</b>	1	1	1	1	1	1
<b>C/AO</b>	0	0	0	0	0.5	0
<b>SE/AO</b>	0	0	0	0	0	0
<b>SO/AO</b>	0	0	1	0	0	1
<b>SE/C</b>	1	1	0	0	0	0
<b>SO/C</b>	1	1	1	1	0	1
<b>Totale 3</b>	<b>4</b>	<b>4</b>	<b>4</b>	<b>3</b>	<b>3</b>	<b>5</b>

Tab. 9.5: Punteggi totali

	SL1	SL2	HM1	HM2	HM3	HM4
<b>Totale 1</b>	<b>4.5</b>	<b>4.5</b>	<b>5</b>	<b>3</b>	<b>2</b>	<b>2.5</b>
<b>Totale 2</b>	<b>6</b>	<b>5.5</b>	<b>3.5</b>	<b>3</b>	<b>3.5</b>	<b>5</b>
<b>Totale 3</b>	<b>4</b>	<b>4</b>	<b>4</b>	<b>3</b>	<b>3</b>	<b>5</b>
<b>Totale finale</b>	<b>14.5</b>	<b>14</b>	<b>12.5</b>	<b>9</b>	<b>8.5</b>	<b>12.5</b>



## BIBLIOGRAFIA

- D'Addezio, G., Valensise, G. (1993): Metodologie per l'individuazione della struttura sismogenetica responsabile del terremoto del 13 dicembre 1990, in Boschi, E. e Basili, A. (eds), *Contributi allo studio del terremoto della Sicilia orientale del 13 dicembre 1990*, Int. Rep. 537, Ist. Naz. di Geofis., Roma, pp. 115-125.
- Okada, Y. (1992): Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **82**, 1018-1040.
- Piatanesi, A., Tinti, S., Maramai, A., Bortolucci, E. (1996): Revisione del terremoto tsunamigenico della Sicilia orientale del 1693: simulazione numerica del maremoto, Atti del 15° convegno annuale del Gruppo Nazionale di Geofisica della Terra Solida, Roma, 11-13 novembre 1996.
- Piatanesi, A., Tinti, S. (1998): A revision of the 1693 eastern Sicily earthquake and tsunami, *J. Geophys. Res.*, **103**, 2749-2758.
- Sirovich, L., Pettenati, F., Bobbio, M. (1998): Site effects of an M=7.3-7.5 earthquake, and its tessellated synthesis, *Proceedings of the XI Danube-European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, May 25-29 1998, Porec, Croatia*, Balkema Publishers.
- Tinti, S., Armigliato, A., Bortolucci, E. (1999): Contribution of tsunami data analysis to constrain the seismic source: the case of the 1693 eastern Sicily earthquake, submitted to the *Journal of Seismology*.
- Tinti, S., Armigliato, A. (1999): Seismic displacements of non-flat sea floor in tsunami generation: application to the 1693 case in SE Sicily, Italy, *Proceedings of the International Conference on Tsunamis, Paris, France, 26-28 May 1998*, 225-245.
- Tinti, S., Gavagni, I., Piatanesi, A. (1994): A finite-element numerical approach for modeling tsunamis, *Ann. Geofis.*, **37**, 1009-1026.
- Zollo, A., Emolo, A., Herrero, A., Improta, L. (1999): High frequency strong ground motion modelling in the Catania area associated with the Hyblaean-Malta fault system, *J. of Seismology*, **3** (3), 279-288.