



ENVIRONMENTAL SURVEYS S.r.l.

SEDE LEGALE: Via della Croce, 156 – 74123 TARANTO

Tel: 0994764788 – Fax: 0997392598

Part. IVA: 02793770732 WEB: www.ensu.it E-Mail: en.su@libero.it

Taranto, Settembre 2011

**INDAGINI GEOGNOSTICHE DIRETTE
NELLA REGIONE DEL SINIS (ORISTANO) E
DEL SULCIS (CAGLIARI)
E RILIEVO GEOMORFOLOGICO DIGITALE IN
LOCALITA' ARGENTIERA (SASSARI)
AL FINE DELL'INDIVIDUAZIONE
DI EVIDENZE DELL'IMPATTO DI ONDE ECCEZIONALI**

Prof. Giuseppe Mastronuzzi

COMMITTENTE: *Associazione Culturale A.A.A.A.I.O'.*

*Via Vincenzo Sulis, 43
09124 CAGLIARI
P. IVA: 02905540924*

Spin Off Accademico dell'Università degli Studi di Bari "ALDO MORO"



SOMMARIO

1. Introduzione	3
2. Inquadramento Geografico, Geologico e Geomorfológico.....	6
2.1 Siti in Provincia di Oristano.....	8
2.2. Siti in Provincia di Cagliari.....	9
2.3 Siti in Provincia di Sassari	10
3. Materiali e Metodi.....	11
3.1 Analisi dei Carotaggi	11
3.2 Analisi Radiografiche	20
3.3 Analisi Morfológicas della sezione Capo Sa Sturaggia.....	25
3.4 Rilievo Laser Scanner Terrestre.....	27
4. Datazioni Radiometriche.....	30
5. Discussioni.....	32
5.1 - Datazioni al Radiocarbonio	32
5.2 - Modellizzazione Idrodinamica	32
5.3 – Correlazioni e individuazione di Ondazioni eccezionali	35
5.4 - Stima dell’Inondazione.....	37
6. Conclusioni	39
Riferimenti Bibliografici.....	41
ALLEGATI.....	44

1. Introduzione

La dinamica delle genti e delle civiltà, il loro fiorire o il loro crollo, è spesso stato condizionato dalle reciproche dirette relazioni fra uomo e ambiente. Del resto, sovente, anche quando intere civiltà sono crollate sotto le spallate di altri popoli la causa del conflitto è da cercarsi negli spostamenti in massa determinati dalla necessità di fuggire da condizioni di vita insufficienti verso aree più ospitali. Qualità dell'acqua e disponibilità di cibo, caratteri climatici e loro variabilità, dinamiche parossistiche endogene o esogene, scelte politiche ed economiche, hanno determinato e determinano oggi, insieme, le condizioni favorevoli perché la vita umana possa permanere più o meno a lungo in una determinata regione. Tutta la storia dell'essere umano è segnata da successive fasi di migrazioni che hanno fatto affermare con il tempo l'*Homo sapiens* (Edey e Johanson 1989; Manzi, 2007). Lo stesso confronto fra *Homo neanderthalensis* e *Homo sapiens* nel Pleistocene superiore e nell'Olocene nella cronologia geologica, nel Paleolitico ed attraverso il Mesolitico per la cronologia umana, in qualche modo è stato condizionato dall'alternarsi delle fasi climatiche e dai cambiamenti ambientali da essi determinati. Un confronto serrato, sicuramente non bellico e forse neanche diretto, a mano armata, ma certamente duro, dal quale è uscito vincitore chi meglio ha saputo rispondere alle sollecitazioni ambientali e adattarsi a quell'ambiente. Ma anche, la storia degli ultimi 10000 anni, il periodo nel quale l'*Homo sapiens* ha maturato la capacità di essere stanziale e di sfruttare in loco le risorse disponibili sino a realizzare le magnificenze oggi nel deserto dell'Egitto o nelle foreste della Cambogia come in quelle del Messico o sugli impervi picchi delle Ande, è segnato da fantastici successi e disarmanti sconfitte di popoli apparentemente stabilizzati sul territorio (Diamond, 2005).

Le dinamiche ambientali, nelle loro componenti fisiche, derivano dall'essere il pianeta Terra un sistema in continua evoluzione, condizionato dalle forme di energia che lo interessano: l'energia gravitazionale, l'energia solare, l'energia interna e quella del rilievo. Queste, combinandosi variamente tra loro, definiscono dinamiche continue che tendono a modificare nel tempo il paesaggio, sia quello biotico che quello abiotico. Questo sistema non è e non sarà mai uguale a se stesso così da rendere l'aspetto del pianeta sempre diverso attraverso le continue fasi di invecchiamento e di ringiovanimento del paesaggio, discontinue oltre che nel tempo anche nello spazio, in una successione che non avrà fine (Davis, 1899).

L'area mediterranea è per sua natura geodinamica una regione giovane, nata pochi milioni di anni fa dalla collisione complessa fra due placche, quella euroasiatica e quella africana, a definire un vero puzzle di microplacche che si spingono, si accartocciano, si sovrappongono così da determinare oggi il paesaggio fisico che oggi vediamo.

In questo quadro di continui micro cambiamenti proprio nel bacino del Mediterraneo si manifestano processi che sono stati - e sarebbero - in grado di modificare significativamente in un breve arco di tempo l'organizzazione spaziale degli elementi fisici che disegnano il Mar Mediterraneo che noi conosciamo. In un tempo fisico geologicamente breve, ma per noi uomini incredibilmente lungo, circa 20000 anni, a causa delle variazioni climatiche il perimetro del mediterraneo è cambiato significativamente. Il livello del mare, 20000 anni fa, era più basso di circa 140 m a causa del raffreddamento medio su tutto il pianeta che, avendo fatto aumentare le masse glaciali sui continenti, aveva fatto così diminuire le acque disponibili al mare, proprio perché trattenuti su quei continenti. Con il riscaldamento del pianeta nel tardo Pleistocene e nell'Olocene, sia di origine solare che planetario, il livello del mare è risalito significativamente allagando aree costiere una volta abitate dai popoli del Mesolitico e sommergendo, a prescindere dai comportamenti relativi locali, anche alcuni resti del Neolitico, dell'Età del Bronzo ma anche punici, greci e romani (p.e.: Solinas e Orrù, 2004; Auriemma *et alii*, 2004; Antonioli *et alii*, 2009; Solinas e Auriemma, 2009; Scarano *et alii*, 2008; Lambeck *et alii*, 2004).

Il perimetro costiero è così fortemente mutato che le penisole di un tempo corrispondono alle attuali isole; anche la percezione delle terre oltre mare era differente, essendo i bracci di mare di minore estensione e quindi quelle terre più vicine da sponda a sponda. Questi cambiamenti sono avvenuti alla scala temporale di generazioni mentre altri cambiamenti sono avvenuti a scale temporali brevissime tanto da essere stati percepiti dal singolo essere umano; sono quelli detti parossistici, che hanno interessato aree più o meno estese del Mediterraneo. Certamente quello che più ha colpito l'interesse dei ricercatori e dei documentaristi e la fantasia della gente è l'evento di Santorini. Nel 1600 a.C. circa (1630-1550 a.C.) l'esplosione del vulcano Thera sull'Isola di Santorini fu accompagnato da una serie di forti scosse telluriche che distrussero centri della civiltà minoica. Quel collasso determinò la genesi di uno dei più importanti *tsunami* che abbiano mai interessato il pianeta; onde capaci di arrivare sino a 26 m di quota investirono l'Isola di Creta distruggendo decine di insediamenti costieri.

Evidenze geologiche ed archeologiche dell'impatto di quell'evento lungo le coste del Mediterraneo centro orientale sono conservate sino in Sicilia (p.e. Bruins *et alii*, 2008; De Martini *et alii*, 2010); mai sino ad oggi tracce di questo evento sono state riconosciute lungo le coste del bacino occidentale del Mediterraneo. Nel corso della storia altri *tsunami* hanno interessato il nostro mare lasciando memoria nella tradizione locale, orale e scritta, ma anche nella documentazione storica ed archivistica (Guidoboni, 2010; Tinti *et alii*, 2004) così come nel paesaggio con evidenze archeologiche e geomorfologiche (Mastronuzzi *et alii*, 2008; Mastronuzzi, 2010). Un'ipotesi affascinante, legittima e meritevole di rispetto, propone all'attenzione dei ricercatori e del mondo

accademico un quesito interessante che gli storici non si sono mai posti (Frau, 2002; Faraglia e Frau, 2006): può essere stato questo evento che ha determinato direttamente o in qualche modo ha contribuito alla caduta della civiltà nuragica? O anche: cosa ha determinato il collasso di una delle civiltà più antiche del Mediterraneo? Perché decine di nuraghi, forse centinaia, sono distrutti, coperti da depositi di fango e sabbia?

È per contribuire a rispondere a questa domanda che su interessamento di Sergio Frau, provato giornalista ed entusiasta “vulcanico” indagatore del passato della Sardegna, lungo le coste del Sulcis, del Sinis e della Nurra sono state condotte le indagini di terreno e di laboratorio - annunciate il 1° Aprile 2011 a Palazzo Regio di Cagliari, in occasione dell’incontro *Isola Mito? La Sardegna domanda. La Geologia risponde* – e che sono ora descritte nelle pagine seguenti.

2. Inquadramento Geografico, Geologico e Geomorfológico

Dal Punto di vista geologico la Sardegna rappresenta una delle aree più ricche del territorio nazionale italiano tanto dal punto di vista naturalistico, quanto da quello applicativo. Giacimenti di fossili e di minerali, paesaggi montuosi e collinari incontaminati, coste frastagliate e spiagge bianche e rosa fanno dell'Isola un laboratorio geologico a cielo aperto. Dal punto di vista geodinamico la Sardegna rappresenta un frammento dell'Europa staccatosi durante lo sfenocasma sardo-corso avvenuto nel Terziario in concomitanza con la nascita degli Appennini e delle Alpi durante l'orogenesi Alpina. Oggi la Sardegna è considerata una regione stabile dal punto di vista geodinamico e tettonico in ragione delle innumerevoli evidenze che pongono il livello del mare del Tirreniano in corrispondenza della quota eustatica che esso raggiunse circa 125mila anni fa (Pirazzoli, 2005; Ferranti *et alii*, 2006). Nel corso dell'Olocene la rimonta del mare ha sommerso buona parte delle piane costiere e, in funzione del tipo litologico affiorante, ha modellato poderose falesie o ha invaso incisioni di origine continentale disegnando profonde *rias* a definire aree protette ideali per lo stanziamento nel corso della storia di porti commerciali (p.e.: Forti e Orrù, 1995; De Muro e Orrù, 1998; Orrù *et alii*, 2005; Solinas e Orrù, 2004; Solinas e Auriemma, 2009; Antonioli *et alii*, 2007; 2009).

Per il mondo scientifico la Sardegna appare una zona stabile dal punto di vista tettonico. Pochi terremoti hanno interessato l'isola nel tempo e quei pochi sono considerati di bassa intensità mai superiori al 6° della scala Mercalli. Testimonianze storiche sono rintracciabili a tutti in una lapide posta davanti la sacrestia della Cattedrale di Cagliari nel 1616; altri piccoli sismi sarebbero avvenuti nel 1771, nel 1838, nel 1870, nel 1948 nel 1960, nel 1977 e infine nel 2010. Quelli del 1948, del 1977 e del 2010 hanno avuto epicentro in mare.

Perché allora una regione stabile dovrebbe essere interessata da *tsunami*? La risposta è semplice: perché la Sardegna è circondata da aree che possono essere tsunamogeniche. Uno *tsunami* può essere prodotto tanto da un sisma sottomarino (qualora ci sia uno spostamento verticale dei fondali) quanto da una frana o da un'eruzione sottomarina, anche parzialmente; anche l'impatto di un meteorite può provocare un'onda anomala specialmente se avviene in un mare profondo. E poi ci sono gli *tsunami* meteorologici, quelli che avvengono per brusche e immediate variazioni della pressione atmosferica. Tutte queste condizioni sono reali e possibili nei mari circostanti la Sardegna sia nel bacino occidentale che nel Mar Tirreno (p.e.: Ulzega *et alii*, 1988; Mastronuzzi, 2010). In quegli stessi mari però, e in particolare nel mar di Sardegna, onde eccezionali possono essere generate anche da mareggiate a lungo periodo di ritorno.

Per definire l'eventuale presenza di evidenze geologiche e morfologiche dell'impatto di onde eccezionali e per distinguere fra queste quali possano essere attribuite a mareggiate a lungo periodo di ritorno o a tsunami è stata condotta una campagna preliminare di rilievi lungo il litorale occidentale della Sardegna. Quattro differenti aree ubicate lungo la costa occidentale della Sardegna, nella regione del Sinis, in provincia di Oristano, nel Sulcis nella Provincia di Cagliari, e nella Nurra presso Argentiera in provincia di Sassari (Fig. 1).

In particolare tutte le aree investigate sono:

- Stagno de Is Benas, Provincia di Oristano;
- Stagno Sale Porcus, Provincia di Oristano;
- Stagno Mari Ermi, Provincia di Oristano;
- Capo Sa Sturaggia, Provincia di Oristano;
- Stagno S. Enna Arrubia, Provincia di Oristano;
- Capo Malfatano, Provincia di Cagliari;
- Argentiera, Provincia di Sassari.



Figura 1 – Ubicazione delle aree oggetto di studio (Fonte: www.maps.google.it).

2.1 Siti in Provincia di Oristano

La regione studiata è posta a NW della città di Oristano definita fra il Golfo di Oristano, il Promontorio di Tharros, Capo Mannu e Torre su Puttu (Fig. 1). Il principio geologico rispetto al quale ci si è ispirati è quello che un'eventuale onda eccezionale nel suo impatto lungo costa deve avere depositato i materiali che essa era in grado di trasportare in aree in cui essi stessi potrebbero essersi conservati. Una prima descrizione dell'interramento alluvionale di moltissimi siti nuragici del Sinis fu avanzata da Alfonso Stiglitz in occasione del 2° Convegno di studi *“Un millennio di relazioni fra la Sardegna e i Paesi del Mediterraneo”* tenutosi a Selargius (Ca) nel 1986, in un intervento intitolato *“La penisola del Sinis tra il Bronzo finale e la prima età del Ferro”*. Pertanto le aree più indicate ad individuare tracce di tale evento, dovrebbero essere quelle di stagni, laghi costieri e lagune, tutti bacini deposizionali per loro natura a bassa permanenza geomorfologica ma per questo ad alta capacità di conservazione del materiale che in essi si deposita.

Proprio la zona del Sinis, fra il Promontorio di Is. Aruttas e Torre su Puttu è segnata da una serie di stagni e laghi costieri la cui origine è legata alla morfologia ereditata dal paesaggio del Tirreniano (Pleistocene superiore = 125mila anni) (Forti e Orrù, 1995). Quest'area, infatti, conserva un paesaggio costiero relitto modellato in corrispondenza di un alto livello marino in fase tropicale che ha lasciato forme di spiaggia, duna e retroduna con il tempo colmate dalle acque di falda, più o meno salata in funzione della distanza dalla linea di riva, e dalle acque piovane.

Lo scambio di acque con il mare in queste aree è attualmente trascurabile o mediato dall'infiltrazione dell'acqua della falda salata sottoposta a quella di acqua dolce; per tanto in funzione della distanza attuale dal mare tali depressioni sono occupate da acque più o meno salate. In ragione dei caratteri generali dei siti, della loro distanza dal mare e dello spessore di acque presenti, si è deciso su indicazione dei conoscitori dei luoghi e dei committenti, di effettuare dei carotaggi nei siti illustrati in Fig. 2. Purtroppo, come vedremo, tale scelta non ha avuto riscontro nel rinvenimento di sedimenti significativi in quanto le carote estratte hanno mostrato sedimentazione omogenea.

Nel Golfo di Oristano, al contrario, oltre al famoso Stagno di Oristano molto urbanizzato nel tempo, esistono stagni e lagune che conservano evidenze di naturalezza e mostrano caratteri generali che avrebbero potuto permettere la conservazione di depositi trasportati in essi da onde significative.

Dovendo operare una scelta di sito, si è deciso di tralasciare lo stagno di Santa Giusta in quanto profondamente impattato dall'urbanizzazione. Al contrario si è deciso di realizzare una campagna di carotaggi nello stagno di Sena Arrubia che, per quanto interessato da bonifiche, comunque di minore estensione, è posizionato al centro del Golfo di Oristano, in posizione prona rispetto ad

eventuali ondatazioni generate al di fuori del golfo stesso e predisposto all'accumulo di sedimenti (Fig. 2).

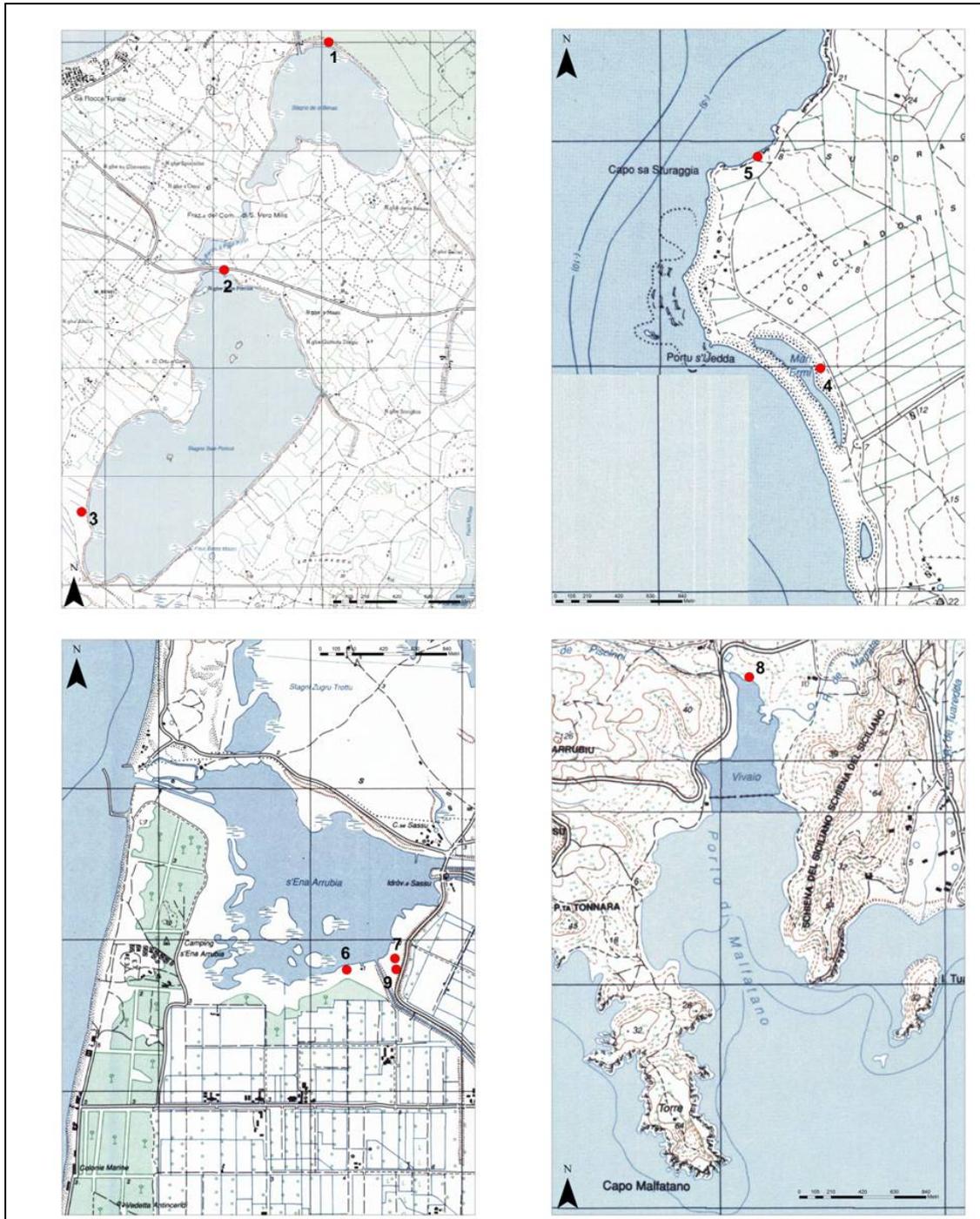


Figura 2 – Ubicazione dei sondaggi realizzati.

Inoltre esso potrebbe contenere indicazioni paleogeografiche da mettersi in relazione con i dati archeologici e paleogeografici derivati dal sito archeologico di Tharros. Tale scelta come vedremo si è dimostrata pagante. Sempre in Provincia di Sassari, in località Capo Sa Sturaggia, durante il sopralluogo speditivo preliminare alla campagna di carotaggi si è provveduto alla descrizione della sezione geologica lì affiorante.

2.2. Siti in Provincia di Cagliari

La scelta di compiere una serie di carotaggi nelle aree ad ovest di Cagliari deriva da due fattori importanti: 1 - la presenza di aree protette all'interno e sul fondo di *rias*, particolarmente favorevoli all'accumulo di sedimenti portati da ondatazioni che avessero avuto la possibilità di penetrare quelle insenature; 2 - la presenza di strutture antropiche disposte lungo costa che suggeriscono indicazioni rispetto alla passata posizione del livello del mare e che potrebbero avere registrato effetti delle ondatazioni eventualmente impattanti. In accordo con ricercatori esperti dell'area, segnatamente il Prof. Paolo Orrù, si è deciso di raccogliere una carota sul fondo della *rias* di Capo Malfatano il cui ingresso è segnato dalla presenza delle strutture del porto punico (Antonioli *et alii*, 2007; Solinas e Auriemma, 2009).

2.3 Siti in Provincia di Sassari

Lungo la costa della Provincia di Sassari si è provveduto ad effettuare rilievi nel sito del cimitero di Argentiera grazie alle indicazioni ricevute dal Prof. Vincenzo Pascucci. Il suo gruppo di ricerca ha segnalato, primo fra tutti per la Sardegna, la presenza di grossi blocchi di indubbia provenienza marina accumulati lungo costa evidentemente da ondatazioni. Pertanto si è deciso di effettuare in questa zona rilievi digitali per applicare modelli idrodinamici conosciuti e cercare di interpretare tali accumuli rispetto alla loro origine (Pignatelli *et alii*, 2009; 2010a; 2010b; 2010c; Mastronuzzi *et alii*, 2011). Anche in tal caso la scelta si è dimostrata efficace.

3. Materiali e Metodi

Durante la campagna di indagine geognostica sono stati effettuati N. 8 sondaggi in “roccia sciolta” con carotiere a mano di tipo “russo” distribuiti tra la regione del Sinis e Capo Malfatano (Cagliari). In particolare (Fig. 2):

- Sito 1, sondaggio in località Stagno de Is Benas;
- Siti 2 e 3, sondaggi in località Stagno Sale Porcus;
- Sito 4, sondaggio in località Stagno Mari Ermi;
- Sito 5, analisi litologica e geomorfologica dell’affioramento in località Capo Sa Sturaggia;
- Siti 6-7-9, sondaggi in località Stagno Sena Arrubia;
- Sito 8, sondaggio in località *rias* di Capo Malfatano.

3.1 Analisi dei Carotaggi

Tutti i sondaggi sono stati effettuati utilizzando un carotiere a mano ad aste avvitabili con campionatore cilindrico di 50 cm di lunghezza e 7 cm di diametro (Fig. 3).



Figura 3 – Carotiere utilizzato nei sondaggi.

Per ognuno dei sondaggi è stato effettuato il campionamento continuo di tutto il materiale estratto, per l’intera profondità del sondaggio, estraendo carote di 50 cm di lunghezza. Ogni campione prelevato veniva accuratamente pulito, fotografato, sottoposto ad un esame macroscopico e, successivamente, imballato e catalogato in appositi contenitori. Inoltre ogni sondaggio è stato opportunamente posizionato nello spazio mediante un rilievo topografico plano-altimetrico utilizzando un GPS differenziale doppia frequenza RTK Leica 1230 GNSS.

Successivamente, sono state effettuate le analisi di laboratorio, granulometriche e paleontologiche, solo su quelle carote che, all'esame macroscopico, hanno mostrato una varietà cromatica, litologica, sedimentologica e paleontologica. Su queste carote sono state eseguite delle radiografie RX per un'analisi non invasiva dei campioni prelevati. Tutti gli elaborati grafici relativi alle colonne stratigrafiche, fossilifere, alle radiografie RX e alle analisi granulometriche sono riportate negli Allegati 1, 2, 3 e 4.

Le successive analisi granulometriche e paleontologiche condotte sulle carote prelevate hanno permesso di ottenere alcune informazioni circa la caratterizzazione sedimentologica e stratigrafica.

- SITO 1 - Stagno de Is Benas

Il carotaggio è stato eseguito fino ad una profondità di prelievo di 100 cm dal piano campagna (p.c.); la litologia, definita dall'esame macroscopico delle carote prelevate, è rappresentata da limi argillosi, con assenza di contenuto fossilifero.

-SITO 2 e SITO 3 - Stagno Sale Porcus

Il carotaggio nel sito 2 è stato eseguito fino ad una profondità di prelievo di 200 cm dal p.c.; non si è potuto procedere oltre in quanto giunti al locale basamento. La litologia è rappresentata da limi argillosi, con assenza totale di contenuto macrofossilifero.

Il sondaggio nel sito 3 è stato eseguito fino ad una profondità di prelievo di 225 cm dal p.c.; non si è potuto procedere oltre in quanto giunti al locale basamento. Nei primi 30 cm di carotaggio non è stato possibile prelevare campioni indisturbati; la litologia delle carote dai 30 ai 225 cm è rappresentata da limi argillosi, con assenza totale di contenuto macrofossilifero.

- SITO 4 - Stagno Mari Ermi

Il carotaggio è stato eseguito fino ad una profondità di prelievo di 50 cm dal p.c.; non si è potuto procedere oltre in quanto giunti al locale basamento. La litologia, definita durante la caratterizzazione sedimentologica, è rappresentata da ghiaie, con clasti di dimensioni centimetriche; assenza totale di contenuto macrofossilifero.

- SITO 6 - Stagno Sena Arrubia

Il sondaggio è stato eseguito fino ad una profondità di prelievo di 420 cm dal p.c.; la litologia, definita durante l'esame macroscopico delle carote prelevate, è rappresentata da limi argillosi da 0 a 68 cm dal p.c. e da sabbie fino alla profondità di 400 cm dal p.c., con la presenza di materiale limoso alle profondità di 318-320 cm e 329-330 cm.

Lo stesso esame macroscopico di tutta la carota ha messo in evidenza la presenza di contenuto fossilifero a diverse profondità; in particolare:

- 65 cm frammento di *Cerastoderma sp.*;
- 72-78 cm frammenti di bivalvi e *Cerastoderma sp.* di dimensioni millimetriche e centimetriche; packing elevato;
- 94 cm frammento di *Cerastoderma sp.*;
- 133 cm raggruppamento a nido di frammenti di bivalvi con frammento di *Cerastoderma sp.*;
- 202-206 cm frammenti di bivalvi;
- 209-213 cm frammenti di bivalvi, frammenti di *Cerastoderma sp.* e *Posidonia* (Fig. 4a);
- 221-228 cm frammenti di bivalvi, frammenti di *Cerastoderma sp.*; packing medio;
- 228-234 cm frammenti di bivalvi e *Cerastoderma sp.* con dimensioni dal millimetrico al centimetrico; presenza di ciottoli; packing elevato (Fig. 4b);
- 260-265 cm frammenti di bivalvi, frammenti di *Cerastoderma sp.*; packing medio;
- 278-284 cm frammenti di bivalvi e *Cerastoderma sp.* con presenza di gasteropodi interi (*Hinia sp.*, *Bittium sp.*, *Cerithium sp.*, *Cerithiopsis sp.*);
- 303-309 cm presenza di *Cerastoderma sp.* di dimensioni superiori ai 2 cm (Fig. 4c);
- 359-364 cm frammenti di bivalvi e *Cerastoderma sp.* con dimensioni dal millimetrico al centimetrico; presenza di ciottoli; packing medio (Fig. 4d).

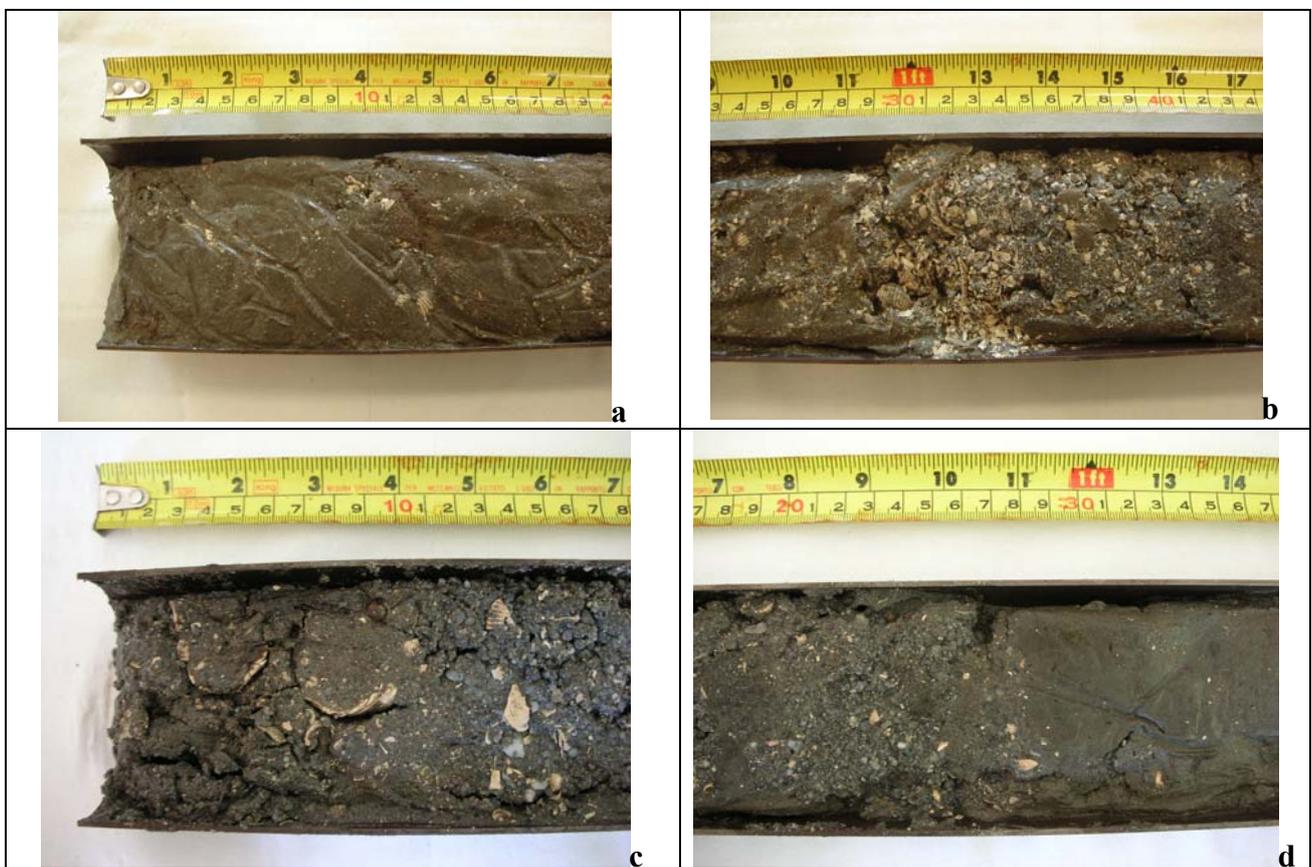


Figura 4 – Documentazione fotografica della carota 6.

Su questa carota è stata successivamente condotta una dettagliata analisi granulometrica di laboratorio, i cui risultati sono riassunti nella Tabella 1.

	ID	Profondità dal p.c. in cm	Colore Scala di Munsell	Analisi Granulometrica	Curva Granulometrica
	C6 - 1	20 - 23	2.5 Y 3/2 very dark grayish brown		
	C6 - 2	70 - 73	5 Y 4/1 dark gray	Sabbia Limosa	
	C6 - 3	115 - 118	5 Y 4/1 dark gray	Sabbia Limosa	
	C6 - 4	147 - 150	5 Y 4/1 dark gray	Sabbia Limosa	
	C6 - 5	200 - 203	5 Y 3/1 very dark gray	Sabbia Limosa	
	C6 - 6	229 - 232	5 Y 3/1 very dark gray	Sabbia	
	C6 - 7	260 - 263	5 Y 3/1 very dark gray	Sabbia	
	C6 - 8	289 - 292	5 Y 3/1 very dark gray	Sabbia	
	C6 - 9	314,5 - 318	5 Y 3/1 very dark gray	Sabbia	
	C6 - 10	318 - 319	5 Y 3/1 very dark gray	Sabbia con Limo e Ghiaia	
	C6 - 11	324 - 327	5 Y 3/1 very dark gray	Sabbia	Vedi Allegato 4
	C6 - 12	329 - 330	5 Y 3/1 very dark gray	Sabbia con Limo e Ghiaia	
	C6 - 13	332 - 333	5 Y 3/1 very dark gray	Sabbia con Limo e Ghiaia	
	C6 - 14	334 - 337	5 Y 3/1 very dark gray	Limo Sabbioso	
	C6 - 15	350 - 353	5 Y 3/1 very dark gray	Sabbia	
	C6 - 16	359 - 362	5 Y 3/1 very dark gray	Sabbia	
	C6 - 17	380 - 382	5 Y 3/1 very dark gray	Sabbia Limosa	
	C6 - 18	403 - 405	5 Y 3/1 very dark gray	Sabbia Limosa	
	C6 - 19	413 - 417	5 Y 3/1 very dark gray	Sabbia Limosa	

Tabella 1 – Caratterizzazione sedimentologica della carota 6.

- SITO 7 - Stagno Sena Arrubia

Il sondaggio è stato eseguito fino ad una profondità di prelievo di 350 cm dal p.c.; i primi 9 cm sono costituiti da suolo vegetale. La litologia è rappresentata da argille tra 9 e 172 cm dal p.c. e da limi argillosi fino alla profondità di 350 cm dal p.c., con la presenza di livelli a *Posidonia* alle profondità di 309-310 cm e 326-328 cm. L'esame macroscopico della carota ha messo in evidenza la presenza di contenuto fossilifero a diverse profondità; in particolare:

- 41-42 cm presenza di *Posidonia* con frammenti di bivalvi e gasteropodi;
- 62-70 cm frammenti di bivalvi e *Cerastoderma sp.* di dimensioni millimetriche; packing elevato;
- 76-82 cm presenza di *Posidonia* con frammenti di bivalvi e *Cerastoderma sp.* dimensioni millimetriche e centimetri che (Fig. 5a);
- 94-100 cm frammenti di bivalvi, frammenti di *Cerastoderma sp.*; packing medio;
- 122 cm presenza di *Posidonia*;
- 129 cm frammenti di bivalvi, frammenti di *Cerastoderma sp.*; packing scarso;
- 156 cm presenza di *Posidonia*;
- 206-207,5 cm presenza di *Posidonia* e *Cerastoderma sp.* di dimensioni centimetriche;
- 217 cm presenza di *Posidonia*;
- 276-283 cm frammenti di bivalvi in elevata concentrazione di diversa geometria e dimensione; presenza di *Cerastoderma sp.* di dimensioni centimetriche (Fig. 5b);
- 296 cm presenza di *Posidonia*;
- 305-307 cm frammenti di bivalvi; packing medio;
- 309-310 cm livello di *Posidonia* (Fig. 5c);
- 315 cm presenza di *Posidonia*;
- 319 cm frammenti di bivalvi;
- 320 cm presenza di *Posidonia*;
- 324 cm presenza di gasteropodi (*Hinia sp.*, *Bittium sp.*, *Cerithium sp.*, *Cerithiopsis sp.*) con frammenti di bivalvi;
- 326-328 cm livello di *Posidonia* (Fig. 5d);
- 333 cm presenza di *Posidonia*;
- 339 cm presenza di *Posidonia*;
- 344 cm presenza di *Posidonia*;
- 346-350 cm frammenti di bivalvi; packing scarso.

Su questa carota è stata successivamente condotta una dettagliata analisi granulometrica di laboratorio, i cui risultati sono riassunti nella Tabella 2.

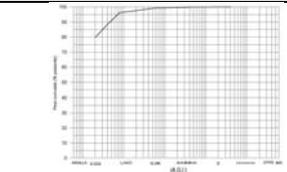
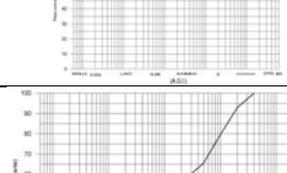
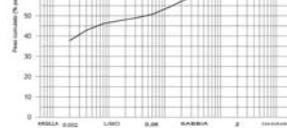
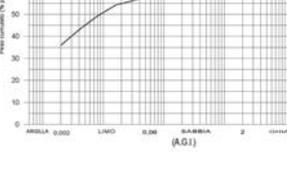
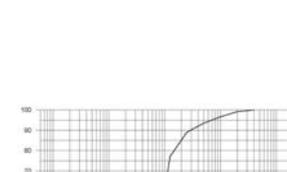
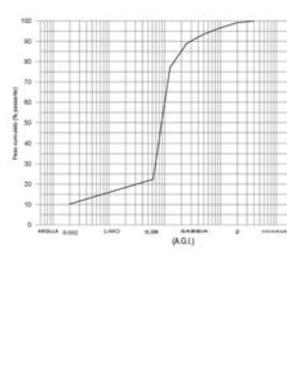
	ID	Profondità dal p.c. in cm	Colore Scala di Munsell	Analisi Granulometrica	Curva Granulometrica
	C7 - 1	29 - 32	5 Y 4/1 dark gray	Argilla	
	C7 - 2	42 - 46	5 Y 4/1 dark gray	Argilla	
	C7 - 3	67 - 69	5 Y 5/1 gray	Argilla Sabbiosa con Limo	
	C7 - 4	97 - 100	5 Y 5/1 gray	Argilla Sabbiosa con Limo	
	C7 - 5	125 - 128	5 Y 5/2 olive gray	Argilla Sabbiosa con Limo	
	C7 - 6	206 - 209	5 Y 4/1 dark gray	Argilla Limosa Sabbiosa	
	C7 - 7	245 - 248	5 Y 4/1 dark gray	Argilla Limosa Sabbiosa	
	C7 - 8	274 - 277	5 Y 4/1 dark gray	Argilla Limosa Sabbiosa	
	C7 - 9	290 - 292	5 Y 4/1 dark gray	Argilla Limosa Sabbiosa	
	C7 - 10	305 - 308	5 Y 4/1 dark gray	Limo	
	C7 - 11	315 - 317	5 Y 3/1 very dark gray	Limo Sabbioso	
	C7 - 12	318 - 320	5 Y 3/1 very dark gray	Limo Sabbioso	
	C7 - 13	320 - 321,5	10 Y R 4/1 dark gray	Limo Sabbioso	
	C7 - 14	323,5 - 326	10 Y R 4/1 dark gray	Limo Sabbioso	
	C7 - 15	334 - 336	5 Y 4/1 dark gray	Limo Sabbioso	
	C7 - 16	346 - 349	5 Y 4/1 dark gray	Limo Sabbioso	

Tabella 2 – Caratterizzazione sedimentologica della carota 7.

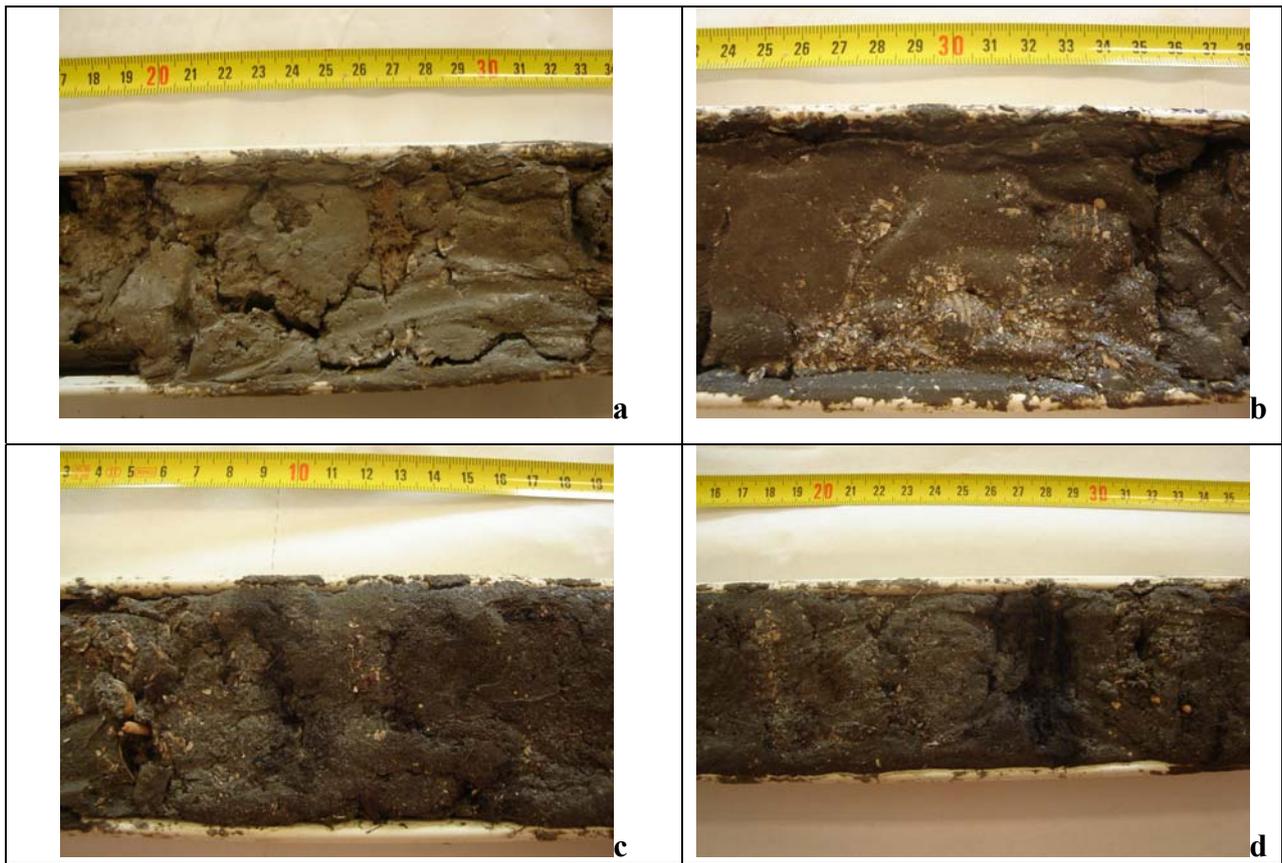


Figura 5 – Documentazione fotografica della carota 7.

- SITO 9 - Stagno Sena Arrubia

Il sondaggio è stato eseguito fino ad una profondità di prelievo di 350 cm dal p.c.; i primi 6 cm sono costituiti da copertura vegetale. La litologia è costituita da argille fino alla profondità di 90 cm dal p.c., da sabbie fino a 160 cm, da limi argillosi fino a 300 cm e infine da sabbie fino alla profondità di 350 cm. Tra i 100 e 150 cm di profondità non è stato possibile effettuare il prelievo di campioni indisturbati. L'esame macroscopico della carota ha messo in evidenza la presenza di:

- 44-50 cm frammenti di bivalvi e *Cerastoderma sp.*;
- 62 cm presenza di *Cerastoderma sp.* e gasteropodi (*Hinia sp.*, *Bittium sp.*, *Cerithium sp.*, *Cerithiopsis sp.*);
- 90-160 cm presenza di ciottoli di diverse dimensioni con frammenti di bivalvi di piccole e medie dimensioni e gasteropodi interi (*Hinia sp.*, *Bittium sp.*, *Cerithium sp.*, *Cerithiopsis sp.*) (Fig. 6a-b);
- 170 cm frammenti di bivalvi e presenza di ciottoli;
- 215 cm frammenti di bivalvi e *Cerastoderma sp.*;
- 268 cm frammenti di bivalvi e *Cerastoderma sp.*;
- 300 cm presenza di *Cerastoderma sp.* centimetriche;
- 322 cm presenza di *Posidonia*;
- 332-337 cm presenza di *Posidonia* con frammenti di bivalvi (Fig. 6c);

- 348-350 cm presenza di *Cerastoderma sp.* centimetriche (Fig. 6d).

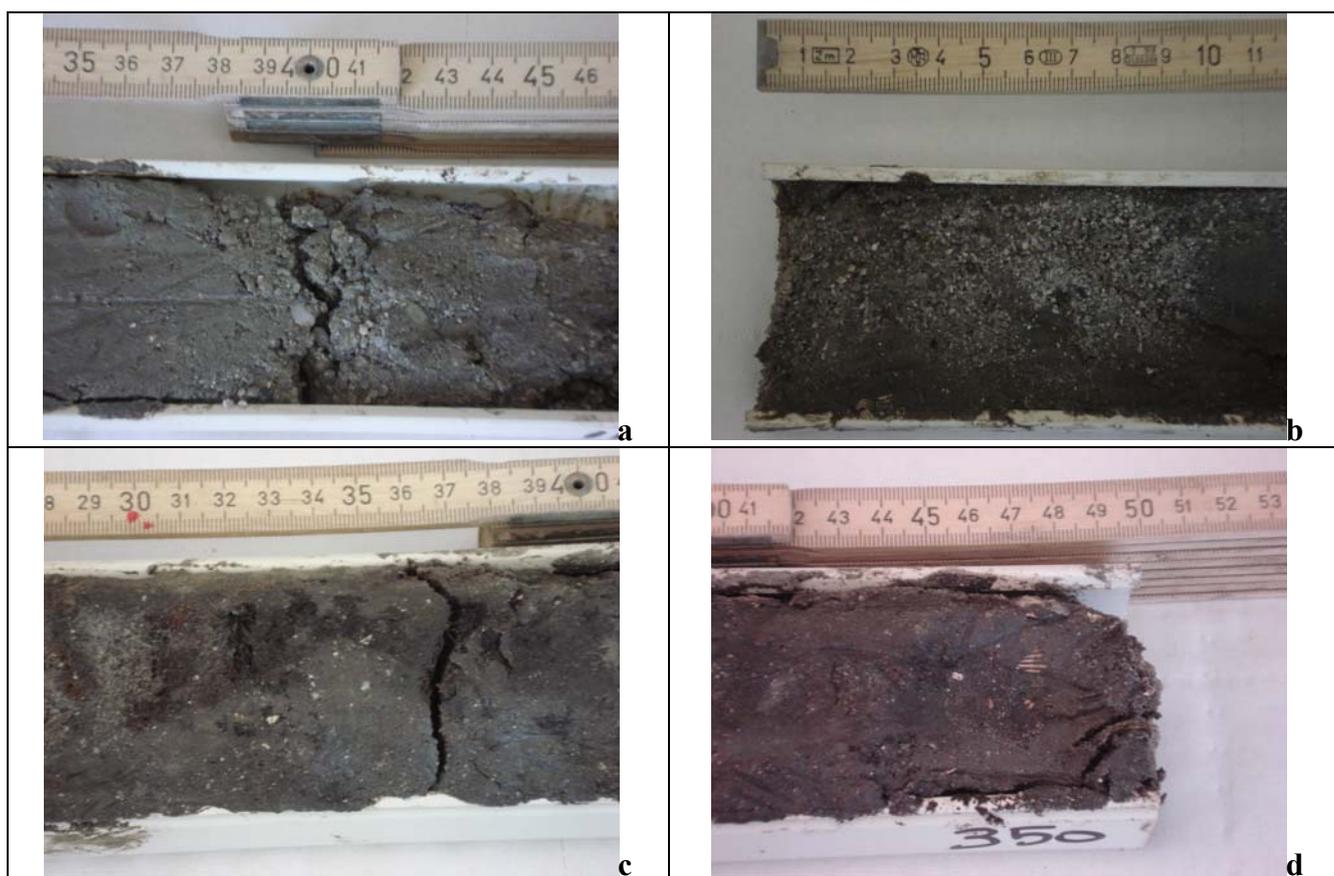


Figura 6 – Documentazione fotografica della carota 9.

Tutte le informazioni descrittive dei sondaggi e le analisi di laboratorio eseguite sui campioni prelevati sono riassunti nella Tabella 3.

N.	Località	Profondità	Prelievo Campioni	Stratigrafia	Fossili	Analisi RX	Analisi Granulometrica	Analisi Paleontologiche
1	Stagno de Is Benas	1 m	SI	SI	NO	NO	NO	NO
2	Stagno Sale Porcus	2 m	SI	SI	NO	NO	NO	NO
3	Stagno Sale Porcus	2,25 m	SI	SI	NO	NO	NO	NO
4	Stagno Mari Ermi	50 cm	SI	SI	NO	NO	NO	NO
6	Stagno S. Enna Arrubia	4 m	SI	SI	SI	SI	SI	SI (in studio)
7	Stagno S. Enna Arrubia	3,5 m	SI	SI	SI	SI	SI	SI (in studio)
8	Capo Malfatano	4 m	SI	SI	SI	SI	SI	SI (in studio)
9	Stagno S. Enna Arrubia	3,5 m	SI	SI	SI	SI	NO	NO

Tabella 3 – Informazioni relative alle indagini eseguite.

- SITO 8 – rias di Capo Malfatano

Il sondaggio è stato eseguito fino ad una profondità di prelievo di 400 cm dal p.c.; i primi 10 cm sono costituiti da copertura vegetale. La litologia, rappresentativa dell'intera carota campionata, è costituita da argille; nell'intervallo 170-200 cm di profondità non è stato possibile effettuare il prelievo di campioni indisturbati. L'esame macroscopico della carota ha messo in evidenza la presenza di contenuto fossilifero a diverse profondità; in particolare:

- 133 cm presenza di *Cerastoderma sp.* (Fig. 7a);
- 150-155 cm frammenti di bivalvi con packing disperso Fig. 7b);
- 167-170 cm presenza di frammenti di bivalvi di piccole e medie dimensioni e di gasteropodi interi (*Hinia sp.*, *Bittium sp.*, *Cerithium sp.*, *Cerithiopsis sp.*) (Fig. 7c);
- 200 cm presenza di *Cerastoderma sp.*;
- 340 cm presenza di *Cerastoderma sp.* (Fig. 7d);
- 343 cm presenza di *Cerastoderma sp.*.



Figura 7 – Documentazione fotografica della carota 8.

Su questa carota è stata successivamente condotta una dettagliata analisi granulometrica di laboratorio, i cui risultati sono riassunti nella Tabella 4.

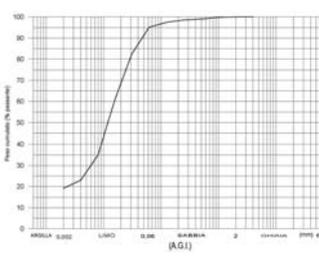
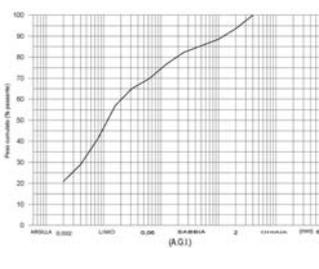
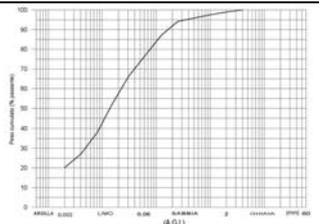
	ID	Profondità dal p.c. in cm	Colore Scala di Munsell	Analisi Granulometrica	Curva Granulometrica
	C8 - 1	25 - 28	5 Y 5/2 olive gray	Argilla Limosa	
	C8 - 2	72 - 75	5 Y 4/3 olive	Argilla Limosa	
	C8 - 3	132 - 135	5 Y 3/2 dark olive gray	Argilla Limosa	
	C8 - 4	153 - 156	2.5 Y 4/2 dark grayish brown	Argilla Limosa	
	C8 - 5	167 - 170	5 Y 3/1 very dark gray	Argilla Limosa	
	C8 - 6	230 - 233	5 Y 3/2 dark olive gray	Argilla Limosa con Sabbia	
	C8 - 7	278 - 281	5 Y 3/1 very dark gray	Argilla Limosa	
	C8 - 8	308 - 311	5 Y 3/1 very dark gray	Argilla Limosa	
	C8 - 9	335 - 338	5 Y 3/1 very dark gray	Argilla Limosa	
	C8 - 10	340 - 343	5 Y 3/1 very dark gray	Argilla Limosa	
	C8 - 11	368 - 371	5 Y 3/1 very dark gray	Argilla Limosa	

Tabella 4 – Caratterizzazione sedimentologica della carota 8.

3.2 Analisi Radiografiche

L'esame macroscopico di tutti i campioni prelevati ha fornito lo spunto per condurre ulteriori indagini non invasive distruttive mediante radiografie RX. Queste sono state eseguite esclusivamente sulle carote dei siti 6, 7, 8 e 9, proprio per le loro caratteristiche sedimentologiche atte all'esame RX.

Queste analisi sono state realizzate perché è possibile attraverso esse riconoscere livelli più grossolani o concentrazioni di fossili che hanno una risposta differente alla sollecitazione RX di quanto invece non abbiano le argille o i limi. Attraverso esse è stato possibile individuare le prime discontinuità sedimentologiche e quindi le perturbazioni nell'originale ambiente di sedimentazione.

- SITO 6 - Stagno Sena Arrubia

Dall'interpretazione congiunta dell'analisi superficiale delle caratteristiche litologiche e fossilifere e dell'esame non distruttivo eseguito mediante RX è stato possibile identificare alcuni aspetti sedimentologici (Fig. 8):

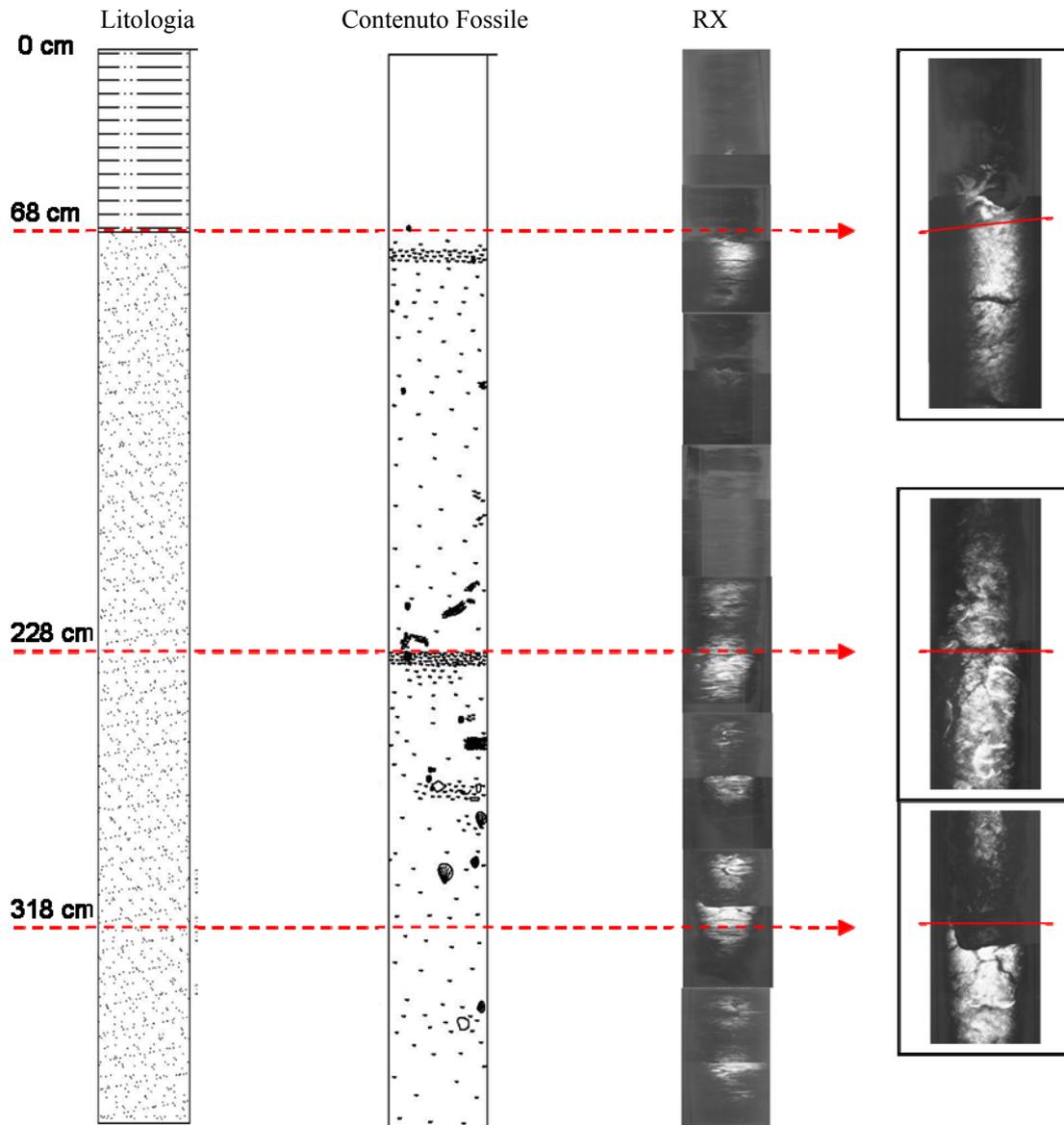


Figura 8 – Confronto tra le stratigrafie litologiche e fossilifere e la radiografia RX della carota 6.

- a 68 cm di profondità il cambio della litologia emerso durante l'esame macroscopico superficiale della carota viene evidenziato nella radiografia RX da una diversa tessitura cromatica, più scura al di sopra dei 68 cm, in corrispondenza dei sedimenti argillosi e più chiara dove la litologia si presenta con le caratteristiche litologiche delle sabbie, al di sotto dei 68 cm;
- a 228 cm di profondità la presenza di alcuni frammenti di bivalvi e ciottoli, evidenziati dall'esame macroscopico della carota, nella radiografia RX è indicata da una serie di differenti densità cromatiche rappresentative dei vuoti interposti tra i ciottoli;

- a 318 cm di profondità è stato possibile individuare un livello limoso all'interno del materiale sabbioso; questo, sulle radiografie RX, si presenta con una tonalità cromatica più scura rispetto alla sabbia circostante (più chiara).

- SITO 7 - Stagno Sena Arrubia

L'esame sia macroscopico che mediante RX di questa carota, ha permesso di identificare (Fig. 9):

- a 276 cm di profondità dal p.c. la presenza di un *Cerastoderma sp.* in posizione fisiologica (posizione naturale di vita dell'organismo);

- a 309 e 327 cm la presenza di due distinti livelli di *Posidonia*, evidenziati dall'esame superficiale della carota, viene confermata dall'esame RX, in cui tali livelli si presentano come due fasce molto scure ben differenziate rispetto al materiale, con tonalità cromatica molto più chiara, nel quale si trovano immerse.

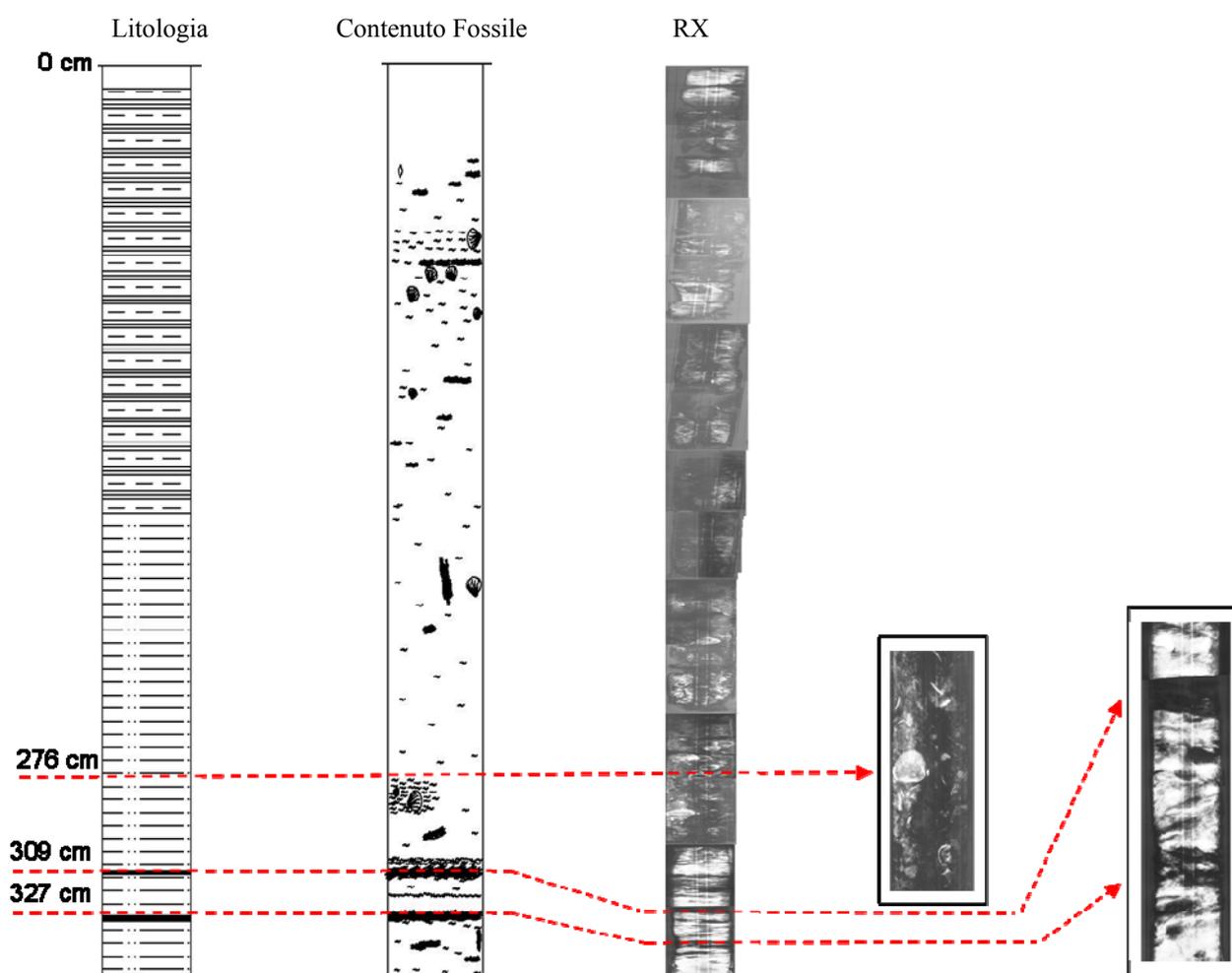


Figura 9 – Confronto tra le stratigrafie litologiche e fossilifere e la radiografia RX della carota 7.

- SITO 8 – rias di Capo Malfatano

Dall'esame integrato della stratigrafia e della radiografia RX non si è evinto nulla di particolare (Fig. 10).

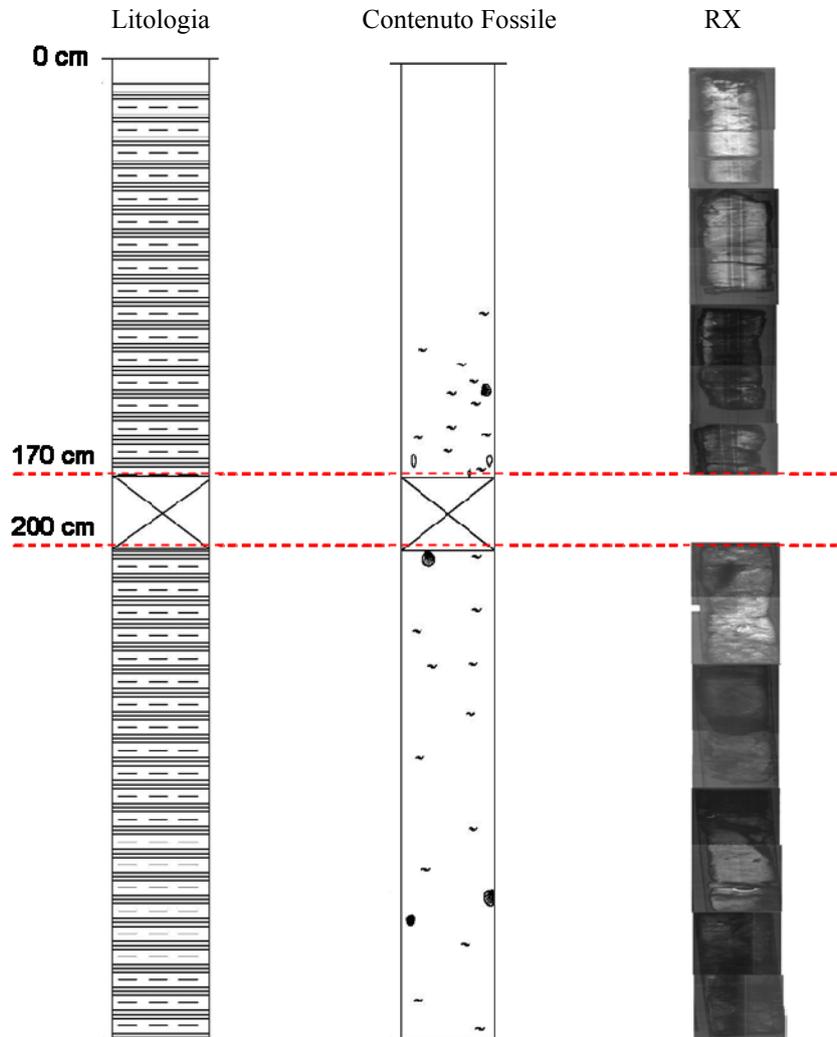


Figura 10 – Confronto tra le stratigrafie litologiche e fossilifere e la radiografia RX della carota 8.

- SITO 9 - Stagno Sena Arrubia

Dall'interpretazione congiunta dell'analisi superficiale delle caratteristiche litologiche e fossilifere e dell'esame invasivo non distruttivo eseguito mediante RX è stato possibile identificare alcuni aspetti sedimentologici (Fig. 11):

- a 90 cm di profondità dal p.c. l'esame superficiale mette in evidenza la presenza di numerosi ciottoli di diverse dimensioni che lo stesso esame RX permette di riconoscere, per tutto lo spessore della carota, con densità cromatiche più tenui rispetto alla matrice sabbiosa in cui si ritrovano immersi.

- a 332 cm di profondità si possono riconoscere, sia attraverso l'analisi macroscopica superficiale sia attraverso l'indagine RX, piccoli depositi di *Posidonia* di dimensione centimetrica.

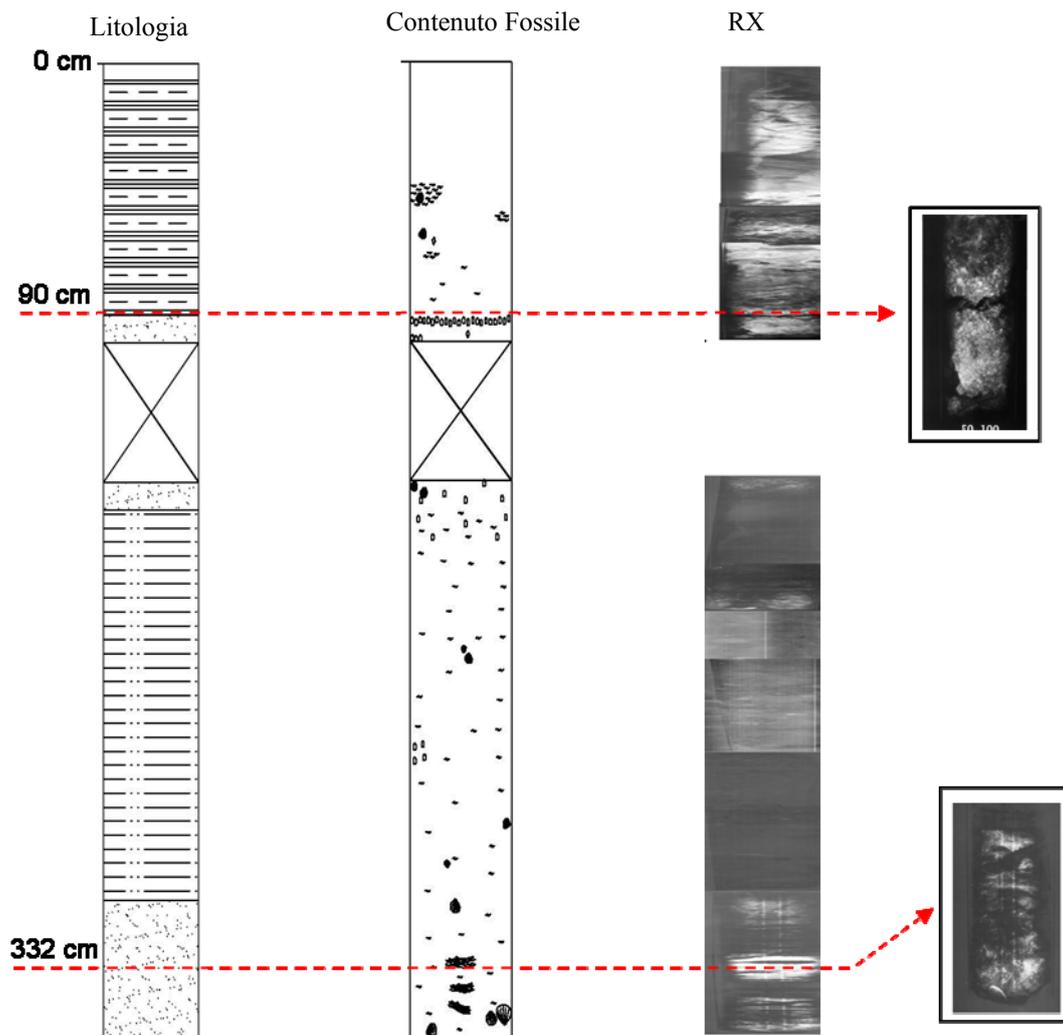


Figura 11 – Confronto tra le stratigrafie litologiche e fossilifere e la radiografia RX della carota 9.

Le stratigrafie litologiche e fossilifere delle carote dei siti 6, 7 e 9, localizzate all'interno dello Stagno S. Enna Arrubia, nella provincia di Oristano, sono state successivamente tra loro correlate (Fig. 12). Questo confronto ha permesso di identificare la presenza di specifici aspetti sedimentologici che indicano una corrispondenza stratigrafica tra i depositi delle carote. In particolare:

- a 276 cm di profondità dal p.c. depositi di gusci di Gasteropodi (*Hinia sp.*, *Bittium sp.*, *Cerithium sp.*, *Cerithiopsis sp.*), frammenti di bivalvi, *Cerastoderma sp.*, interi e frammentati, ritrovati nelle carote 6 e 9; la presenza di un *Cerastoderma sp.* in posizione fisiologica, individuata attraverso l'analisi RX, nella carota 7;
- a 310-330 cm di profondità dal p.c. livelli di *Posidonia* nella carota 7;
- a 320-340 cm di profondità dal p.c. *Posidonia* a gruppi nella carota 9.

Questi particolari aspetti sedimentologici potrebbero essere correlati ad un improvviso evento meteo-marino di elevata energia verificatosi nel passato.

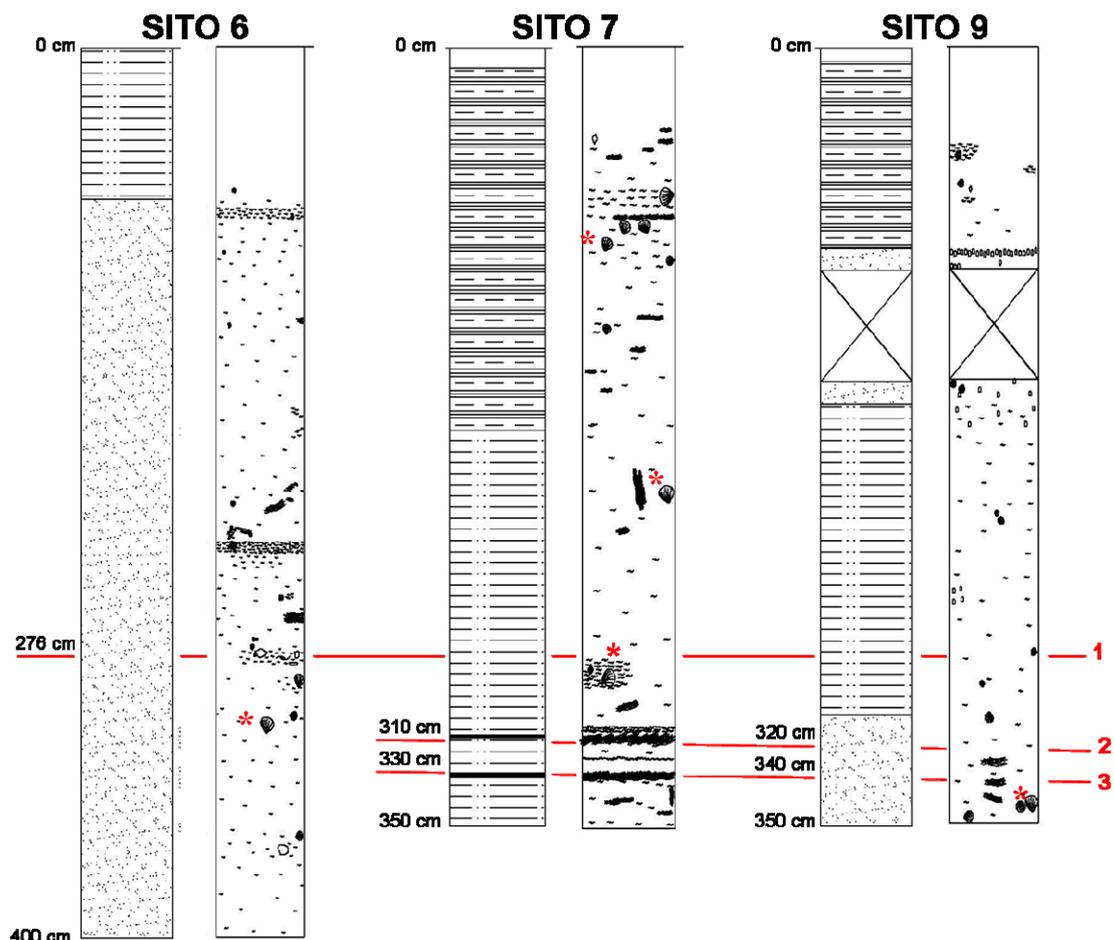


Figura 12 – Correlazione stratigrafica tra le carote dei siti 6, 7 e 9. Linea 1: Livello di Bivalvi, Gasteropodi e *Cerastoderma sp.*; nella colonna 7 il simbolo “*” indica la presenza di *Cerastoderma sp.* in posizione fisiologica, identificati attraverso la radiografia RX, a indicare probabili posizioni di stazionamento delle acque della laguna. Linee 2-3: Livelli di *Posidonia*.

3.3 Analisi Morfologiche della sezione Capo Sa Sturaggia

A Capo Sa Sturaggia (sito 5 Fig. 2) affiora una sezione geologica di indubbio interesse (Fig. 13).

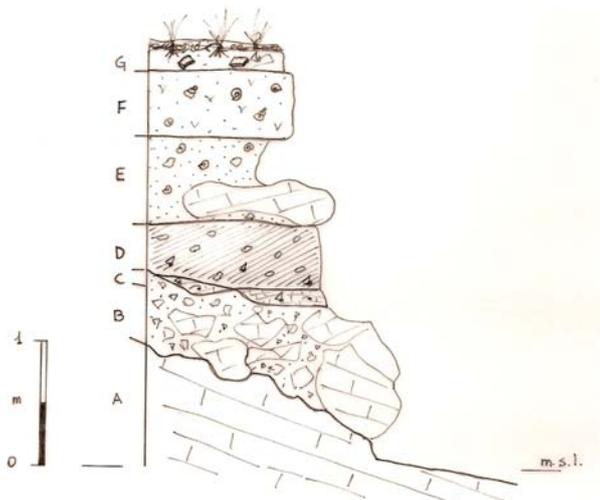


Figura 13 – Sezione geologica dell’affioramento a Capo Sa Sturaggia.

A poca distanza dalla linea di costa, dal basso verso l'alto affiorano:

A - il locale basamento Terziario posto circa al livello del mare e con superficie sommitale di origine erosiva a quote variabili fra 0,30 e 1,10 m;

B – una breccia calcarea grossolana con elementi da decimetrici sino a metrici per uno spessore variabile sino a circa 1 m;

C – Un livello discontinuo con spessore massimo di 0,20 m di sabbia grossolana cementata con molluschi – gasteropodi e bivalvi – marini;

D – Un livello di spessore di circa 0,40 m di colluvio con ciottoli pulitissimi privi di qualsiasi forma di concrezione o di patine di alterazione con rara fauna marina rappresentata da gasteropodi;

E – Un livello di circa 0,70 m di spessore costituito da sabbie medie e grossolane con gasteropodi continentali e clasti del diametro sino a 0,20 m; nella sabbia a circa 2,5 m s.l.m. sono blocchi di calcare, poliedrici regolari con asse maggiore sino a 1,20 m, con spigoli arrotondati e superfici marcate da evidenti tracce di colonie della spugna endolitica *Cliona sp.* che ne indicano un'evidente permanenza sott'acqua;

F – Un livello di circa 0,50 m di suolo bruno con gasteropodi continentali (*Helix sp. e Rumina sp.*) con clasti arrossati del diametro sino a 0,10 m;

G – Un livello di circa 0,20 m di suolo bruno con gasteropodi e frammenti di ceramiche;

H – suolo vegetato.

Nell'ottica della ricerca di evidenze dell'impatto di ondate eccezionali ha sicuramente valore la presenza di blocchi di calcare distribuiti all'interno dell'unità E. Questi come indicano chiaramente i fori lasciati dalle spugne del genere *Cliona* hanno avuto un lungo tempo di permanenza al di sotto del livello del mare (Cfr Allegato 6, Sito 5).

Purtroppo nessuna ipotesi circa il loro trasporto dal mare nell'entroterra può essere fatta al momento causa la mancanza di qualsiasi dato cronologico derivante da analisi dirette sui blocchi in quanto le spugne lasciano solo fori ma non materiale carbonatico databile con il radiocarbonio. Ancora le indagini su gasteropodi continentali sono poco attendibili se non confrontate con altre datazioni su organismi marini.

Resta l'evidenza però che in quell'area blocchi di dimensioni variabili sino al metro cubo sono stati spostati nell'entroterra da ondate eccezionali. Su tali blocchi non si è potuto provvedere a condurre rilievi digitali e/o a effettuare la modellizzazione idrodinamica poiché essi blocchi sono di dimensioni piccole, tanto da non potersi considerare quali elementi diagnostici circa la discriminazione fra impatto di tsunami o di mareggiata eccezionale.

3.4 Rilievo Laser Scanner Terrestre

L'area oggetto del monitoraggio mediante Laser Scanner Terrestre è ubicata sulla costa nord occidentale della Sardegna, circa 1 km a nord di località Argentiera, in Provincia di Sassari (Fig. 14), per una estensione complessiva di circa 2 km.



Figura 14 - Area oggetto del rilievo Laser Scanner Terrestre (Fonte: www.sardegnaterritorio.it/webgis/fotoaeree/).

Durante una ricognizione lungo il tratto costiero sono stati ritrovati una serie di blocchi, che sono stati oggetto di un accurato e preciso rilievo geomorfologico e piano altimetrico.

È stato effettuato un rilievo tridimensionale utilizzando un Laser Scanner Terrestre Leica ScanStation2 interfacciato ad un DGPS Leica 1230 GNSS a doppia frequenza RTK per l'intera sequenza di punti di scansione. Per la ricostruzione tridimensionale dell'intera area sono stati necessari 4 punti di ripresa adoperando un passo di scansionamento millimetrico dell'intera sequenza di blocchi e del substrato sul quale essi sono posti. Le scansioni di ogni punto di registrazione sono tutte accompagnate da relativa documentazione fotografica.

Sono stati prelevati campioni rappresentativi dei blocchi per le successive analisi fisico-meccaniche e datazioni radiometriche di laboratorio (Allegato 5).

Le singole scansioni sono state processate mediante software grafici al fine di ottenere una nube di punti 3D rappresentativa dell'intera area oggetto di indagine (Fig. 15).

Il modello tridimensionale così ottenuto è stato utilizzato per ricavare i parametri geometrici dei due blocchi più rappresentativi presi in considerazione, denominati Blocco A e Blocco B (Fig. 16).

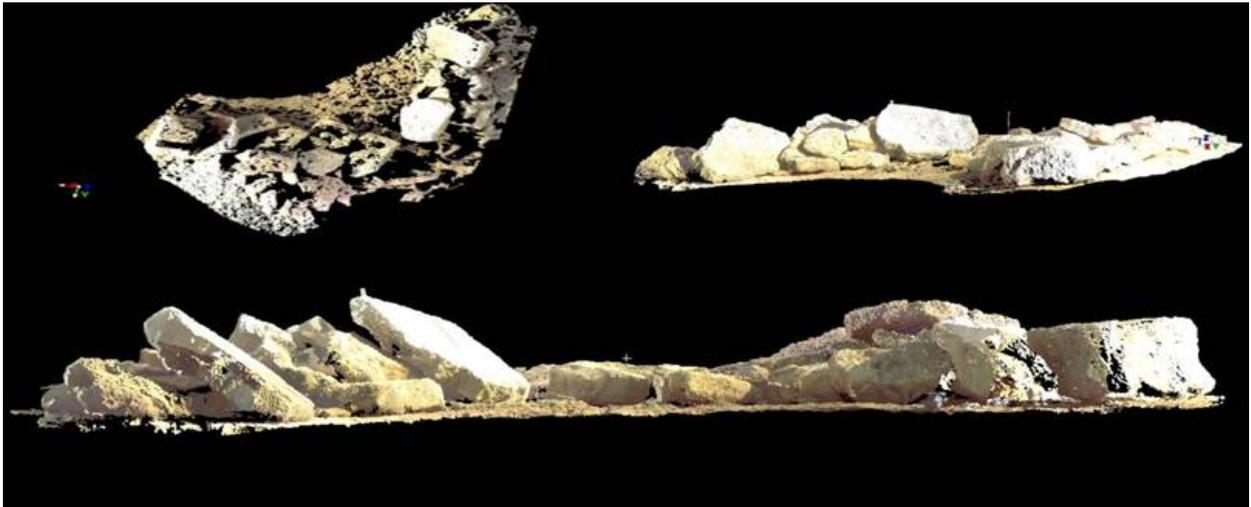


Figura 15 – Nube di punti dei blocchi scansionati.



Figura 16 – Posizione del Blocco A e del Blocco B.

Tali parametri sono stati ottenuti (Fig. 17) misurando tre differenti assi per le direzioni dello spazio X,Y, Z e assumendo come dimensione utile alle equazioni idrodinamiche il valore più grande tra quelli misurati per le tre direzioni dello spazio. I parametri geometrici così ottenuti, assieme alle analisi fisico-meccaniche di laboratorio effettuate sui campioni prelevati (Tabella 5), sono stati utilizzati per lo studio idrodinamico dell'area d'indagine.

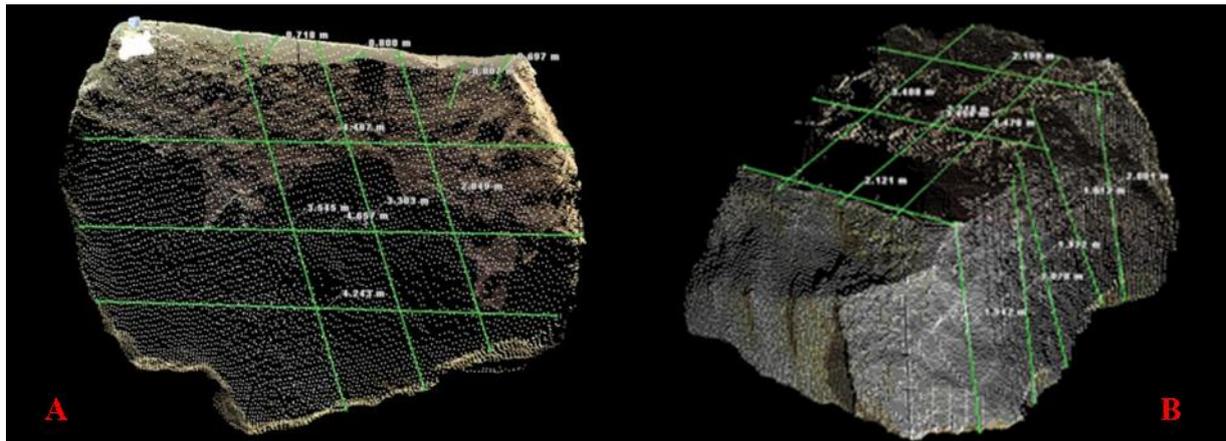


Figura 17 - Scansione e dimensionamento dei tre assi per il Blocco A e il Blocco B.

BLOCCO A			BLOCCO B		
Asse a (m)	Asse b (m)	Asse c (m)	Asse a (m)	Asse b (m)	Asse c (m)
4.467	3.545	0.697	3.470	2.199	2.070
4.243	3.303	0.807	3.454	2.121	1.812
4.657	2.849	0.718	3.408	2.216	1.972

	Asse a (m)	Asse b (m)	Asse c (m)	Densità (g/cm ³)	Volume (m ³)	Peso (t)
Blocco A	4.657	3.545	0.807	2.43	13.32	32.36
Blocco B	3.470	2.216	2.070	2.43	15.91	38.66

Tabella 5 – Caratterizzazione geometrica e fisico-meccanica dei due blocchi considerati.

4. Datazioni Radiometriche

Durante il rilevamento geomorfologico condotto in località Argentiera (Sassari) sono stati riconosciuti, alla base del Blocco A e del Blocco X, incrostazioni di *Vermetus sp.* gasteropodi incrostanti marini che vivono nella fascia infralitorale. Di questi sono stati prelevati per ogni blocco n. 2 campioni che sono stati utilizzati per effettuare le opportune analisi radiometriche, mediante tecniche di datazione del radiocarbonio ^{14}C , in modo da ottenere una stima temporale relativa al verificarsi dell'evento meteo-marino responsabile dello spostamento di questi blocchi fuori dall'acqua e della morte degli organismi. I campioni SF1 A e SF1 B (Fig. 18) si riferiscono al Blocco A, più grande, rilevato mediante Laser Scanner Terrestre, le cui caratteristiche sono state riassunte nella Tab. 3.3.1; i campioni SF2 A e SF2 B appartengono al Blocco X, più piccolo del precedente (Fig. 19).



Figura 18 – Campioni di *Vermetus sp.* SF1 A e SF1 B prelevati dal Blocco A (a sinistra) e SF2 A e SF2 B prelevati dal Blocco X (a destra) evidenziato nella Fig. 19.

La datazione al radiocarbonio per i campioni è stata quindi calibrata in età riferita al nostro calendario utilizzando il software OxCal Ver. 3.10 basato su dati marini (MARINE04) (Reimer P.J. *et alii*, 2004). Il risultato delle datazioni calibrate effettuate sui quattro campioni sono riassunti nella Tabella 6.

Queste datazioni evidenziano chiaramente che il Blocco A, del peso di circa 32 tonn, è stato spostato da un evento meteo-marino precedente a quello che ha provocato lo spostamento del Blocco X più piccolo.

Queste datazioni evidenziano chiaramente che il Blocco A, del peso di circa 32 tonn, è stato spostato da un evento meteo-marino avvenuto in epoca Neolitica, quindi, precedente a quello che avrebbe provocato lo spostamento del Blocco X più piccolo. Questo, invece, sarebbe stato spostato in tempi più recenti, addirittura storici.



Figura 19 – Posizione del Blocco X, più piccolo del Blocco A, da cui sono stati prelevati i campioni di *Vermetus sp.* SF2 A e SF2 B.

Codice	Campione Laboratorio	Specie	Metodo	Età ¹⁴ C Convenzionale (BP)	δ ¹³ C (‰)	Datazione Calibrata
SF2 A Blocco X	LTL6182A	<i>Dendropoma sp.</i>	Radiocarbonio ¹⁴ C	442 ± 45	+2.6 ± 0.4	1713AD (95.4%) 1950AD
SF2 B Blocco X	LTL6182B	<i>Dendropoma sp.</i>	Radiocarbonio ¹⁴ C	504 ± 45	+2.9 ± 0.3	1691AD (95.4%) 1950AD
SF1 A Blocco A	LTL6183A	<i>Dendropoma sp.</i>	Radiocarbonio ¹⁴ C	3632 ± 45	+8.7 ± 0.5	1770BC (95.4%) 1280BC
SF1 B Blocco A	LTL6183B	<i>Dendropoma sp.</i>	Radiocarbonio ¹⁴ C	3690 ± 45	+ 11.4 ± 0.2	1860BC (95.4%) 1380BC

Tabella 6 – Riepilogo delle datazioni calibrate per i campioni prelevati.

5. Discussioni

5.1 - Datazioni al Radiocarbonio

Le analisi sono state condotte a prescindere dalla commessa di tale studio e, purtroppo, in un numero limitato rispetto al loro valore statistico nel caso specifico di studio. Il dato che loro restituiscono per quanto di indubbio valore strumentale, può essere confermato solo nel caso di disponibilità di un numero maggiore di datazioni stimabile in almeno tre datazioni su almeno tre blocchi per unità stratigrafica individuata sul terreno. Inoltre la calibrazione effettuata pecca dell'indisponibilità di un DR significativo del braccio di mare studiato e pertanto i dati sono stati elaborati considerando un valore medio per tutto il bacino del Mar Mediterraneo. Il valore di DR è strettamente collegato alle situazioni chimico/fisiche locali. Non è pertanto pensabile che si possa considerare assoluto il dato calibrato ottenuto, sino a che non sarà disponibile in letteratura scientifica un valore significativo per le coste nordoccidentali della Sardegna.

Possiamo pertanto solo ragionare in linea di massima sulle attribuzioni cronologiche riportate che individuerrebbero due eventi marini eccezionali da collocarsi a circa 1800 anni a.C. oppure in corrispondenza circa dell'A.D. 1700.

5.2 - Modellizzazione Idrodinamica

Per lo studio idrodinamico dell'area è stata effettuata una ricerca sulle condizioni meteo-marine dell'intera area costiera oggetto del rilievo, utilizzando le registrazioni delle boe ondamiche e delle stazioni anemometriche della RON (Rete Ondamiche Nazionale) e dell'ISPRA (Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale).

In particolare sono stati utilizzati i dati relativi al periodo 1/07/1989 – 08/04/2008 registrati dalla boa di Alghero e dalla stazione di Alghero. Da queste registrazioni è stato possibile ottenere tutti i parametri necessari per la caratterizzazione meteo-marina del tratto costiero studiato (Fig. 20), quali:

- direzione del moto ondoso ($^{\circ}$ N);
- massima altezza d'onda registrata (H_0);
- periodo massimo (T).

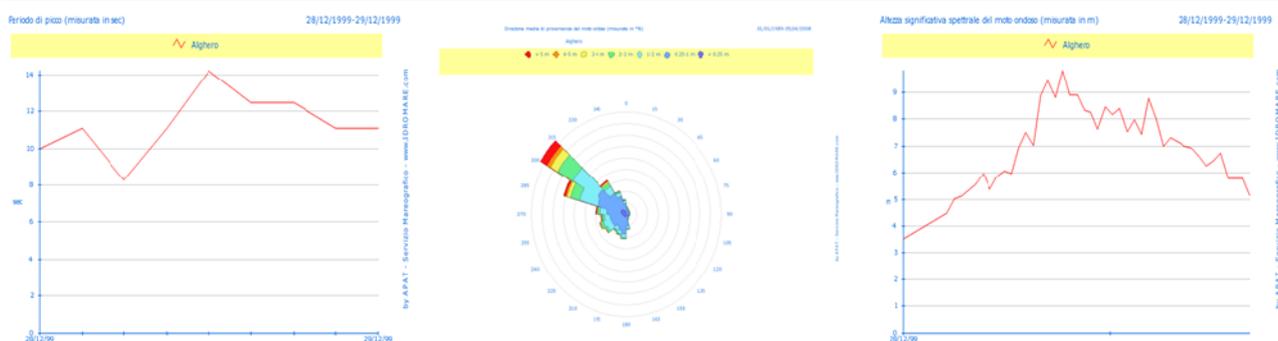


Figura 20 – Grafici relativi al periodo T (a sinistra), alla direzione del moto ondoso °N (al centro) e all’altezza d’onda H0 (a destra) (Fonte: www.idromare.it).

Il periodo massimo (T) è stato utilizzato per il calcolo della lunghezza d’onda $L_0 = (T^2 g) / 2\pi$ dove g rappresenta l’accelerazione di gravità (Tabella 7).

Dati registrati dalla boa ondometrica di Alghero	
Direzione Moto Ondoso	300 – 315 °N
H ₀ il 28/12/1999	9,88 m
T il 28/12/1999	14,3 s
L ₀ il 28/12/1999	319,10 m

Tabella 7 – Dati meteorologici della Rete Ondometrica Nazionale.

Il rilievo geomorfologico ha permesso di dedurre che l’attuale posizione dei blocchi non sia quella originale ma che sia stata il risultato di uno spostamento ad opera di un evento meteo-marino estremo. Per lo studio di tale evento meteo-marino necessario allo spostamento dei blocchi, sono state utilizzate le equazioni idrodinamiche proposte da Nott (1997; 2003), successivamente riviste da Pignatelli et alii (2009), considerando tali blocchi appartenenti ad un “Joint Bounded Scenario”; questa situazione rappresenta una condizione in cui i blocchi si ritrovano parzialmente distaccati dal substrato roccioso prima dell’impatto di un treno d’onde con il loro successivo distacco e deposito in una posizione diversa da quella di partenza (Fig. 21).

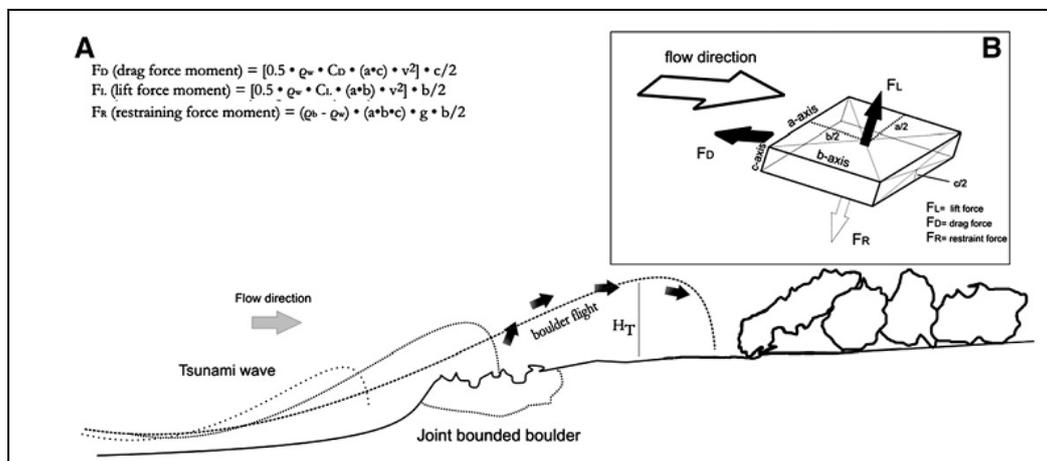


Figura 21 – Schema rappresentativo di “Joint Bounded Scenario” (Fonte: Pignatelli et alii, 2009).

Per poter valutare l'evento meteo-marino, *tsunami* o mareggiata eccezionale, responsabile dello spostamento dei blocchi in tale scenario sono state utilizzate le seguenti equazioni idrodinamiche:

$$H_T = [0.5c (\gamma_b - \gamma_w) / \gamma_w] / C_L \qquad H_S = [2c (\gamma_b - \gamma_w) / \gamma_w] / C_L$$

dove

- H_T : altezza d'onda per uno tsunami;
- H_S : altezza d'onda per una mareggiata;
- c : asse minore del blocco;
- γ_b : densità del blocco;
- γ_w : densità dell'acqua;
- C_L : coefficiente di lift.

I valori calcolati attraverso le precedenti equazioni idrodinamiche devono essere supportati dai reali parametri meteo-marini caratteristici del tratto costiero, in accordo con l'equazione proposta da Sunamura e Horikawa (1974):

$$H_b / H_0 = (\tan \beta)^{0.2} (H_0 / L_0)^{-0.25}$$

dove

- H_0 : altezza d'onda registrata;
- H_b : altezza d'onda alla rottura;
- L_0 lunghezza d'onda;
- β : pendenza del fondale alla rottura;

Nella Tabella 8 vengono riassunti tutti i parametri geometrici, fisico-meccanici e idrodinamici, sia quelli registrati sia calcolati in base alle formule precedenti, relativi ai due blocchi studiati.

	BLOCCO A	BLOCCO B
T: Periodo (s)	14.3	14.3
L ₀ : Lunghezza d'onda (m)	319.1	319.1
Direzione moto ondoso (°N)	300° - 315°	300° - 315°
Direzione blocchi (°N)	260°	260°
C: Asse minore (m)	0.807	2.070
γ _w : Densità acqua (g/cm ³)	1.02	1.02
γ _b : Densità blocco (g/cm ³)	2.43	2.43
V: Volume (m ³)	13.32	15.91
P: Peso (t)	32.36	38.66
H ₀ : Altezza onda (m)	9.88	9.88
C _L : Coefficiente di lift	0.178	0.178
B: Pendenza fondale alla rottura (gradi)	1.9°	1.9°
H _b : Altezza d'onda alla rottura (m)	11.91	11.91
H _t : Altezza onda tsunami (m)	3.13	8.03
H _s : Altezza mareggiata (m)	12.53	32.15

Tabella 8 – Parametri geometrici, fisico-meccanici e idrodinamici dei Blocchi studiati.

5.3 – Correlazioni e individuazione di Ondazioni eccezionali

Caso Blocco A

Le datazioni mediante radiocarbonio ¹⁴C effettuate sui due campioni di vermetidi prelevati dal Blocco A hanno restituito un'età calibrata, rispettivamente, di 1770 BC e 1860 BC, corrispondente a circa 3800 anni fa.

Le correlazioni stratigrafiche eseguite sulle carote dei siti 6, 7 e 9 hanno messo in evidenza la corrispondenza tra i depositi di gusci intatti e/o predati di Gasteropodi, frammenti di bivalvi, *Cerastoderma sp.*, interi e frammentati, *Posidonia* in livelli e a gruppi, ritrovati tra i 276 e 340 cm di profondità dal piano campagna. In accordo con la curva del cambiamento del livello del mare ricostruita per la Sardegna in Antonioli *et alii* (2007), si può individuare e collocare il livello del mare di circa 3800 anni fa a -2,8 m dal livello del mare attuale. Le caratteristiche sedimentologiche descritte nelle carote possono, così, essere relazionate proprio alla posizione del livello del mare di circa 3800 anni fa.

Tutti questi aspetti possono essere interpretati come effetti del verificarsi di un evento meteo-marino parossistico di elevata energia, riconducibile o ad una mareggiata di notevole intensità o ad uno *tsunami*.

Lo studio idrodinamico effettuato sui Blocchi A e B, con particolare attenzione al Blocco A oggetto delle datazioni radiometriche, ha permesso di stimare la minima altezza d'onda necessaria per lo spostamento di questo blocco, considerando sia l'impatto di uno *tsunami* che quello di una mareggiata. Le altezze d'onda stimate sono, rispettivamente, 3,13 m e 12,53 m (Tab. 8).

Le registrazioni della Rete Ondametrica Nazionale negli ultimi 25 anni, non hanno mai riportato altezze d'onda significative superiori a 9,88 m. Di conseguenza, onde di mareggiata non potrebbero essere considerate responsabili di tali evidenze geomorfologiche e sedimentarie.

In ragione di tutte queste considerazioni, datazioni assolute, caratterizzazione sedimentologica, equazioni idrodinamiche e riferimenti bibliografici, appare verosimile considerare l'impatto di uno *tsunami*, verificatosi approssimativamente 3800 anni fa, come causa probabile sia della presenza dei particolari depositi nelle carote sia dello spostamento del Blocco A.

Caso Blocco X

Le datazioni relative ai due campioni prelevati dal Blocco X più piccolo (v. Fig. 19) hanno fornito un'età calibrata di 1691 AD e 1713 AD. Questi valori sono compatibili con un evento di tsunami generatosi al largo delle isole Baleari (Spagna), il 24 marzo 1721, così come riportato nel catalogo internazionale degli tsunami del N.O.A.A. (National Oceanic and Atmospheric Administration) e riportato da Soloviev *et alii* (2000). Per questo evento in particolare è possibile anche azzardare una istintiva correlazione con uno tsunami che avrebbe lasciato tracce lungo la costa dell'Algeria e la cui attribuzione al 1700 circa è ipotizzata da Maouche *et alii* (2007) grazie allo studio di accumuli di blocchi lì riconosciuti.

È altresì vero però che, date le dimensioni del blocco e la sua attuale posizione rispetto alla linea di costa, un suo spostamento a causa dell'impatto di una mareggiata eccezionale non può essere escluso.

Il verificarsi di tale evento non trova alcuna conferma sotto forma di discontinuità sedimentologica, paleontologica o litologica nelle carote analizzate.

5.4 - Stima dell'Inondazione

Lo studio idrodinamico condotto lungo il tratto costiero interessato dal rilevamento geomorfologico ha permesso di stimare il limite d'inondazione delle acque di ingressione verso l'entroterra, X_{max} , supponendo che le ondate eccezionali responsabili dello spostamento dei blocchi ritrovati in località Argentiera (v. par. 5.2) siano da associare ad un evento meteo-marino di *tsunami*.



Figura 22 – Stima del limite di inondazione da *tsunami*.

Per il calcolo di tale parametro (Fig. 22) sono state utilizzate le equazioni idrodinamiche proposte da Hills e Mader (1997), riviste da Pignatelli et alii (2009), considerando il Blocco A:

$$X_{max} = D + (H_T - h_c)^{1.33} n^{-2} k \cos \alpha$$

dove

X_{max} = massima penetrazione dell'onda verso l'entroterra (limite d'inondazione);

D = distanza del blocco dalla linea di costa;

H_T = altezza d'onda;

h_c = altezza della costa;

n = numero di Manning (rugosità della superficie);

k = costante (Bryant, 2001)

α = pendenza del tratto costiero emerso.

Nella Tabella 9 sono riportati tutti i valori dei parametri sopra descritti necessari per il calcolo della massima penetrazione dell'onda da tsunami, X_{max} .

D	H_T	h_c	n	k	α	X_{max}
16 m	3,13 m	0,4 m	0,050	0,06	7,5°	140 m

Tabella 9 – Valori per il calcolo di X_{max} .

La massima penetrazione delle acque, sulla base di questi valori e considerando l'andamento plano-altimetrico dell'area, avrebbe raggiunto una quota topografica di circa 8 m sul livello del mare.

6. Conclusioni

Gli studi sinora condotti non forniscono una risposta esaustiva e definitiva circa i quesiti che abbiamo formulato nelle prime pagine: possono essere stati degli tsunami a determinare la caduta della civiltà nuragica? O anche: cosa ha determinato il collasso di una delle civiltà più antiche del Mediterraneo? Perché decine di nuraghi, forse centinaia, sono distrutti coperti da depositi di fango e sabbia?

Troppi nuraghi giacciono sotto coltri di sabbia mai studiati dal punto di vista geologico *sensu lato* per capire i motivi del loro crollo fisico e del loro abbandono. I nostri studi si sono concentrati in alcuni siti, invero pochi, riconosciuti lungo la costa occidentale della Sardegna. Un minimo contributo per iniziare a capire e a cercare di dare una risposta alle sollecitazioni che vengono dal riconoscere che ci deve essere stata una causa per cui la civiltà nuragica è stata abbandonata.

I nostri studi forniscono una risposta chiara: le coste della Sardegna occidentale sono state colpite da ondate eccezionali, così come evidenziato dai livelli anomali delle carote di Sena Arrubia, dai blocchi di Capo Sa Sturaggia e dai blocchi di Argentiera. I due eventi eccezionali – ma potrebbero essercene altri di cui non abbiamo trovato le tracce nei siti indagati, tracce che invece potrebbero essere tranquillamente da qualche altra parte conservate – si sarebbero verificati in epoca Neolitica, dell'Età del Bronzo e in tempi recentissimi, storici. Gli elementi a disposizione sembrano suggerire in buon accordo che i responsabili delle ondate eccezionali possano essere stati due distinti *tsunami* avvenuti nel 1800 a.C. circa e nel 1721 A.D.. Essi, caratterizzati da onde non superiori agli 8 m, non avrebbero determinato inondazioni tali da superare i pochi m di quota e solo lì dove la morfologia era assolutamente priva di ostacoli, all'interno delle lagune e degli stagni costieri essi sono stati capaci di propagarsi sino a circa 2 km oltre la linea di costa.

Gli stessi dati che suggeriscono queste risposte non permettono però di escludere in assoluto che quelle evidenze geologiche siano invece dovute a forti mareggiate, eventualmente amplificate da effetti di sito, capaci di creare accumuli di blocchi fuori taglia lungo le coste rocciose e di depositare strati fuori contesto nelle parti più interne delle lagune.

Lo spirito del ricercatore deve essere sempre critico anche dinanzi a dati che apparentemente perfettamente correlabili, possono essere fuorvianti.

L'unica cosa certa è che lungo le coste della Sardegna occidentale si è verificato l'impatto di due ondate eccezionali, al di fuori della normalità. L'ipotesi che queste siano state generate da *tsunami* è altamente probabile ma non ancora dimostrata con assoluta certezza.

Ringraziamenti

Un grazie particolare va all'ispiratore di questo lavoro il Dott. Sergio Frau che con il suo coinvolgente entusiasmo ci ha condotto a fare il nostro mestiere di ricercatori nel campo delle onde eccezionali in Sardegna.

Un sentito ringraziamento per l'amicizia e la stima dimostrata, la documentazione bibliografica, e la gestione delle operazioni di rilievo va ai Prof. Paolo Orrù dell'Università di Cagliari e al Prof. Vincenzo Pascucci dell'Università di Sassari.

Un grazie sincero a tutti coloro che ci hanno reso possibile e gradevole il nostro lavoro nella bellissima terra di Sardegna.

Riferimenti Bibliografici

- Antonioli F., Anzidei M., Lambeck K., Auriemma R., Gaddi D., Furlani S., Orrù P., Solinas E., Gaspari A., Karinja S., Kovacic V., Surace L. (2007). Sea level change during Holocene from Sardinia and northeastern Adriatic (Central Mediterranean sea) from archaeological and geomorphological data. *Quaternary Science Reviews*, 26, 2463-2486.
- Antonioli F., Ferranti L., Fontana A., Amorosi A., Bondesan A., Braitenberg C., Dutton A., Fontolan G., Furlani S., Lambeck K., Mastronuzzi G., Monaco C., Spada G., Stocchi P. (2009). Holocene relative sea-level changes and vertical movements along the Italian and Istrian coastlines. *Quaternary International*, 206, 102-133.
- Auriemma R., Mastronuzzi G., Sansò P. (2004). Relative sea-level changes during the Holocene along the Coast of Southern Apulia (Italia). *Géomorphologie*, 1, 19-34.
- Auriemma R., Solinas E. (2009). Archaeological sites as sea level change markers: data and methods. *Geoitalia 2007*, sessione sulla mobilità costiera T39, Epitome, volume degli abstract, 231.
- Bruins H., Macgilliray J.A., Synolakis C.E., Benamini C., Keller J., Kisch H.J., Klügel A., Van Der Plicht J. (2008). Geoarchaeological tsunami deposits at Palaikastro (Crete) and the Late Minoan IA eruption of Santorini. *Journal of Archaeological Science*, 35 (1), 191-212.
- Bryant E.A. (2001). *Tsunami. The Underrated Hazard*. Cambridge University Press, Cambridge, U.K., 320 pp.
- Chow V.T. (1959). *Open Channel Hydraulics*. McGraw-Hill, USA, 680.
- Davis W.M. (1899). The geographical cycle. *Geogr. Journ.*, 14, 481 pp.
- De Martini P. M., Barbano M. S., Smedile A., Gerardi F., Pantosti D., Del Carlo P., Pirrotta C. (2010). A unique 4,000 yrs long geological record of multiple tsunami inundations in the Augusta Bay (eastern Sicily, Italy). *Marine Geology*, 276, 42-57.
- De Muro S., Orrù P. (1998). Il contributo delle beach-rock nello studio della risalita del mare olocenico. Le beach-rock post-glaciali della Sardegna nord-orientale. *Il Quaternario, Italian Journal of Quaternary Sciences*, 11 (1), 19-39.
- Diamond J. (2005). *Collasso. Come le società scelgono di morire o di vivere*. Einaudi, 566 pp.
- Edey M.A., Johanson D.C. (1990). *Sulle tracce dell'uomo*. Rizzoli, 459 pp.
- Faraglia M, Frau S. (2006) *Le colonne d'Ercole, un bilancio, i progetti*. NurNeon, 203 pp.
- Ferranti L., Antonioli F., Amorosi A., Dai Prà G., Mastronuzzi G., Mauz B., Monaco C., Orrù P., Pappalardo M., Radtke U., Renda P., Romano P., Sansò P., Verrubbi V. (2006). Elevation of the Last Interglacial highstand in Sicily (Italy): a benchmark of coastal tectonics. *Quaternary International*, 145-146, 30-54.
- Forti S., Orrù P. (1995). Geomorfologia costiera e sottomarina della penisola del Sinis (Sardegna occidentale). *Bollettino Società Geologia Italiana*, 114, 3-21, 2 tavv.
- Frau S. (2002). *Le colonne d'Ercole. Un'inchiesta*. Ed. Nur Neon, 672 pp.
- Guidoboni E., Comastri A. (2005). *Catalogue of Earthquakes and Tsunamis in the Mediterranean area from the 11th to the 15th century, vol. 2 - INGV-SGA 2005*.
- Hills J.G., Mader C.L. (1997). Tsunami produced by the impacts of the small asteroids. *Ann. N.Y. Acad. Sci.* 822, 381-394.
- Lambeck K., Antonioli F., Purcell A., Silenzi S. (2004). Sea-level change along the Italian coast for the past 10,000 yr. *Quaternary Science Review*, 23, 1567-1598.
- Manzi G. (2007). *L'evoluzione Umana. Il Mulino*, n.141, 136 pp.
- Mastronuzzi G. (2010). Tsunami in Mediterranean sea. *The Egyptian Journal of Environmental Change*, 2, 1, 1-9.

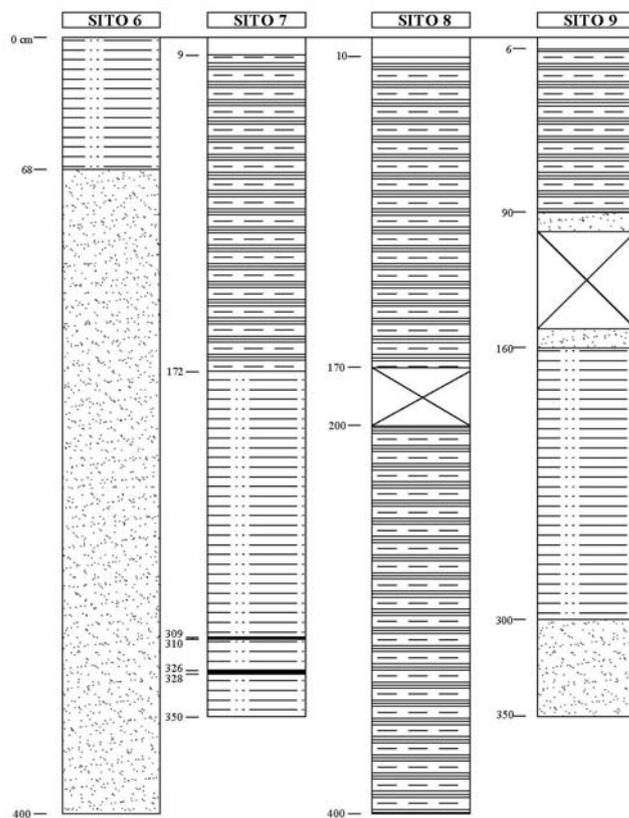
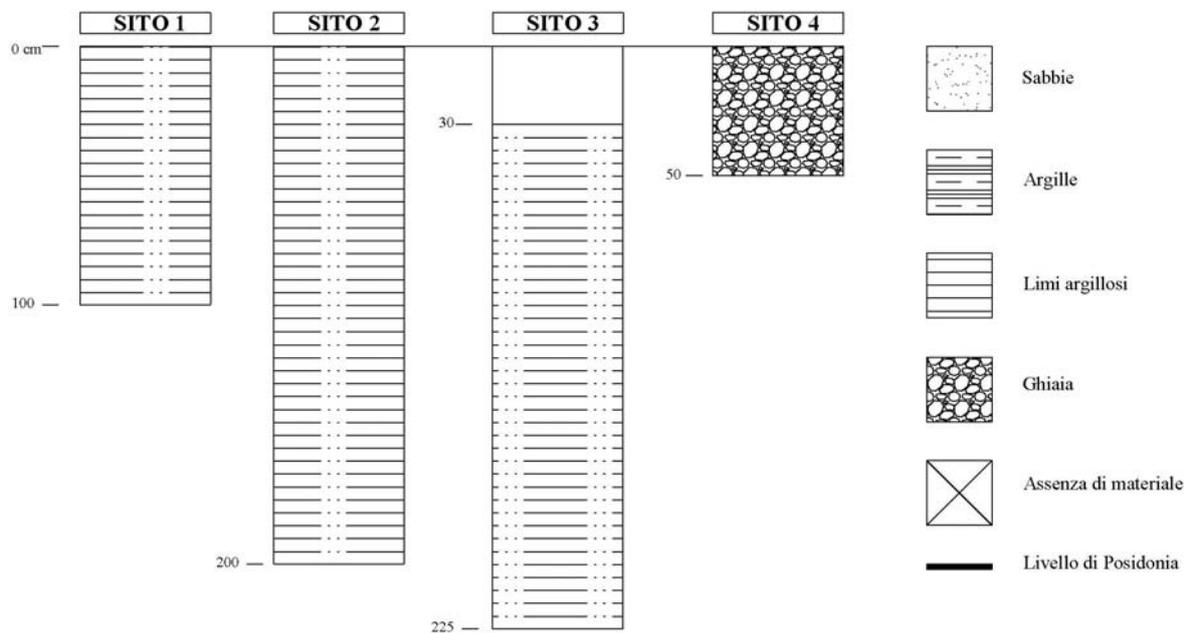
- Mastronuzzi G., Pignatelli C. (2011). Determination of Tsunami Inundation Model Using Terrestrial Laser Scanner Techniques. In: Mörner N.-A. (Ed) *The Tsunami Threat, Research and Technologies*, INTECH, 219-236 pp., INTECHWEB.ORG, ISBN: 978-953-7619-X-X.
- Mastronuzzi G., Pignatelli C., Sansò P., Selleri G. (2007). Boulder accumulations produced by the 20th of February, 1743 tsunami along the coast of southeastern Salento (Apulia region, Italy). *Marine Geology*, 242, 191-205.
- Mastronuzzi G., Pignatelli C., Sansò P. (2006). Boulder fields: a valuable morphological indicator of paleotsunami in the Mediterranean Sea. *Z. Geomorphol., NF Suppl.bd*, 146, 173-194.
- Mastronuzzi G., Sansò P. (2000). Boulders transport by catastrophic waves along the Ionian coast of Apulia (Southern Italy). *Marine Geology*, 170, 93-103.
- Mastronuzzi G., Sansò P. (2003). Field Guide. Puglia 2003 — Final Conference Quaternary Coastal Morphology and Sea Level Changes. IGCP 437 Project, Otranto/Taranto 22–28 settembre 2003, *GI²S Coast*, 184 pagine, Brizio srl, Taranto.
- Mastronuzzi G., Sansò P. (2004). Large boulder accumulations by extreme waves along the Adriatic coast of southern Apulia (Italy). *Quaternary International*, 120, 173-184.
- Mastronuzzi G., Sansò P. (2006). Risk assessment of catastrophic waves impacts on coastal environment. *Geografia Fisica Dinamica Quaternaria*, 29 (1), 83-91.
- Mastronuzzi G., Sansò P., Bruckner H., Vott A., Pignatelli C., Caputo R., Coppola D., Di Bucci D., Fracassi U., May S.M., Milella M., Selleri G. (2008). Paleotsunami imprints along the coast of the central Mediterranean sea. 2nd International Tsunami Field Symposium. Ostuni (Puglia, Italy) – Lefkas (Ionian Islands, Greece), 21-27 September 2003, *GI²S Coast – Gruppo Informale di Studi Costieri*, Research Publication, 7, 198 pagine, Digilabs s.r.l., Bari.
- Maouche S., Morhange C., Meghraoui M. (2009). Large boulder accumulations on the Algerian coast evidence tsunami events in the western Mediterranean. *Marine Geology*, 262, 96-104.
- N.O.A.A. - National Oceanic and Atmospheric Administration, www.noaa.com
- Nott, J. (1997). Extremely high wave deposits inside the Great Barrier Reef, Australia; determining the cause tsunami or tropical cyclone. *Marine Geology*, 141, 193-207.
- Nott J. (2003). Waves, coastal boulder deposits and the importance of the pre-transport setting. *Earth and Planetary Science Letters*, 210, 269-276.
- Orrù P., Antonioli F., Lecca C., Panizza V., Pintus M., Puliga G. (2005). Evoluzione olocenica della piana costiera di Cagliari. Convegno Nazionale dell'Associazione Italiana Geomorfologia e Geografia Fisica, Padova 15-17 febbraio 2005, Extended Abstract, 139-141.
- Orrù P., Antonioli F., Pintus M., Puliga G. (2005). Climatic and eustatic variability during Holocene: morphological evidences in the Cagliari coastal and marine area (Sardinia, Western Mediterranean). Sixth International Conference on Geomorphology, Zaragoza 7-11 settembre 2005 (Spain).
- Orrù P., Ulzega A. (1986). Ricerche sulla piattaforma continentale della Sardegna con immersioni subacquee. *Atti 7° Congresso AIOL, Trieste*, 525-536.
- Pignatelli C., Sansò P., Mastronuzzi G. (2009). Evaluation of tsunami flooding using geomorphologic evidence. *Marine Geology*, 260, 6-18.
- Pignatelli C., Piscitelli A., Damato B., Mastronuzzi G. (2010a). Estimation of the value of Manning's coefficient using Terrestrial Laser Scanner techniques. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 54, 3, 317-336.
- Pignatelli C., Scheffers A., Scheffers S., Mastronuzzi G. (2010b). Evaluation of tsunami flooding from geomorphologic evidence in Bonaire (Netherlands Antilles). *Zeitschrift für Geomorphologie*, accepted, 54, 3, 219-245.
- Pignatelli C., Ferilli S., Capolongo D., Marsico A., Milella M., Pennetta L., Piscitelli A., Mastronuzzi G. (2010c). Evidenze morfologiche, rilievo digitale ed applicazioni informatiche al fine della valutazione del limite di inondazione da tsunami. *Italian Journal of Remote Sensing*, 42, 2, 129-142.

- Reimer P.J., Baillie M.G.L., Bard E., Bayliss A., Beck J.W., Bertrand C.J.H., Blackwell P.G., Buck C.E. (2004). IntCal04 Terrestrial Radiocarbon Age Calibration, 0-26 Cal Kyr BP. *Radiocarbon*, 46, 1029-1058.
- R.O.N. – Rete Ondametrica Nazionale, www.idromare.com
- Scarano T., Auriemma R., Mastronuzzi G., Sansò P. (2008). L'archeologia del paesaggio costiero e la ricostruzione delle trasformazioni ambientali: gli insediamenti di Torre Santa Sabina e Torre Guaceto (Carovigno, Br). Secondo Simposio Internazionale "Il Monitoraggio Costiero Mediterraneo: Problematiche e Tecniche di Misura", Napoli, 1-6 giugno 2008, CNR-IBIMET, Firenze, pp. 391-402.
- Solinas E., Orrù P. (2004). Santa Gilla: spiagge sommerse e frequentazioni di epoca punica. Atti del Convegno Internazionale, Genova, 9-10 dicembre 2004.
- Soloviev Sergey L., Solovieva Olga N., Go Chan N., Kim Khen S., Shchetnikov Nikolay A. (2000). Tsunamis in the Mediterranean Sea 2000 B.C.-2000 A.D.. *Advances in Natural and Technological Hazards Research*, Volume 13, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands, 237 pagine.
- Stuiver M., Reimer P. (2005). Calib 5.0 software. <http://radiocarbon.pa.qub.ac.uk/calib/>.
- Sunamura T., Horikawa K. (1974). Two-dimensional beach transformation due to waves. *Proc. 14th Coastal Eng. Conf., Am. Soc. Civil Engr.*, 920-938.
- Tanaka N.Y., Sasaki M.I.M., Mowjood K.B., Jindasa S.N., Homuchen, Samang (2007). Coastal Vegetation structures and their function in tsunami protection: experience of the recent Indian Ocean tsunami. *Landsc. Ecol. Eng.*, 3 (1), 33-45.
- Tinti S., Maramai A., Graziani L. (2004). The new catalogue of the Italian tsunamis. *Natural Hazards*, 33, 439-465.
- Ulzega A. (1988). Carta geomorfologica della Sardegna marina e continentale. 1:500.000 – P.F. Oceanografia e Fondi Marini, CNR.

ALLEGATI

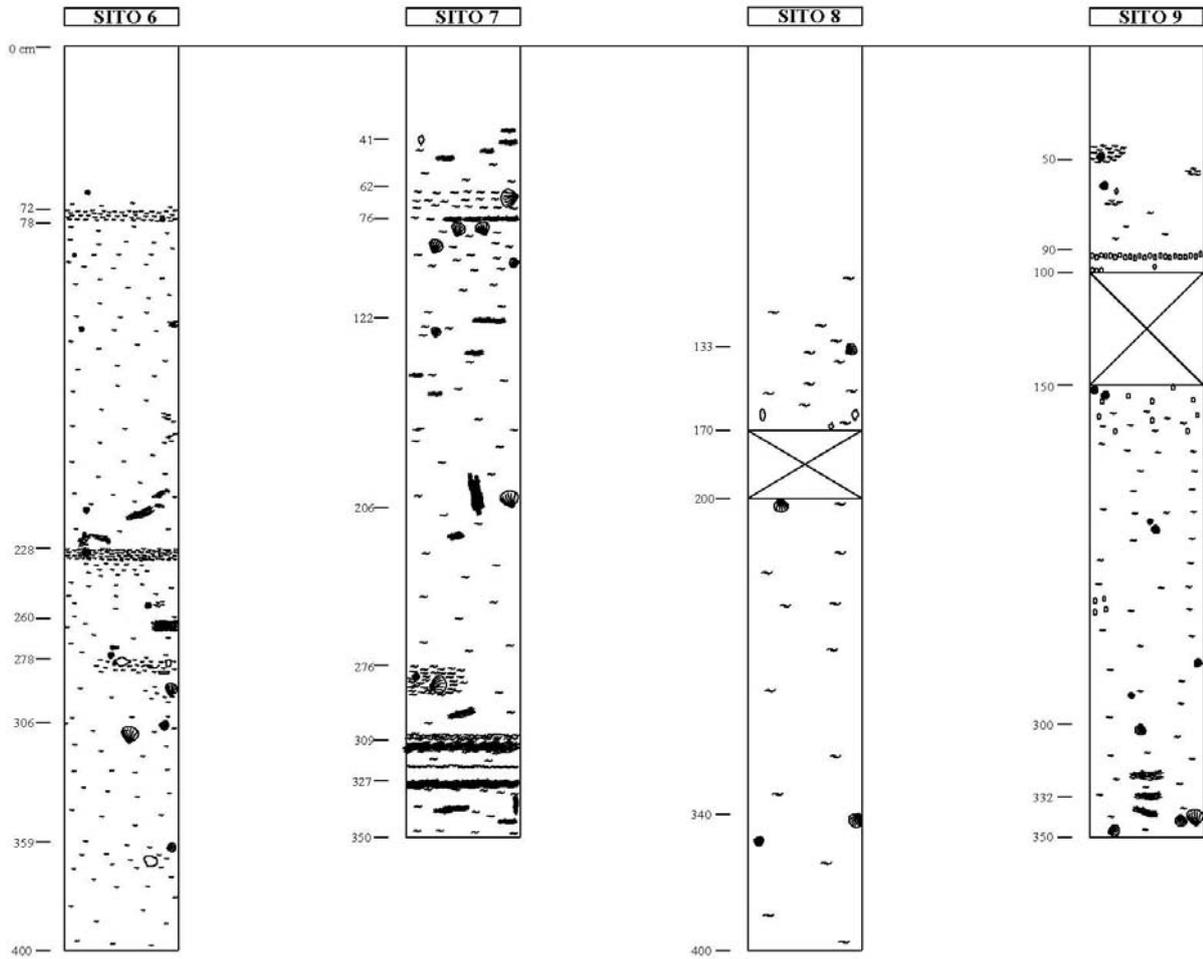
ALLEGATO 1

COLONNE STRATIGRAFICHE



ALLEGATO 2

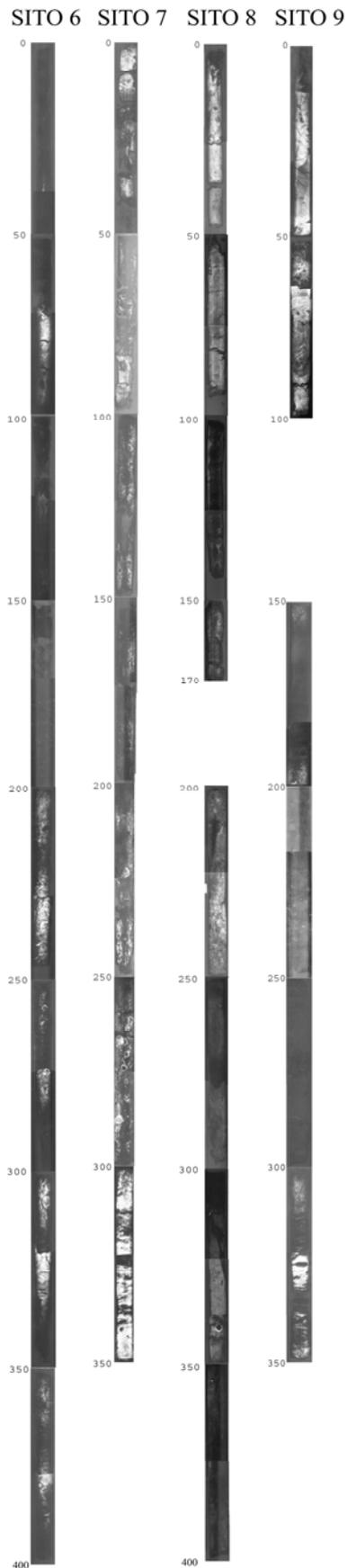
DESCRIZIONE DEL CONTENUTO FOSSILIFERO



-  Cardium
-  Frammenti di bivalvi
-  Posidonia
-  Frammenti di bivalvi
-  Gasteropodi
-  Ciottoli di varie dimensioni

ALLEGATO 3

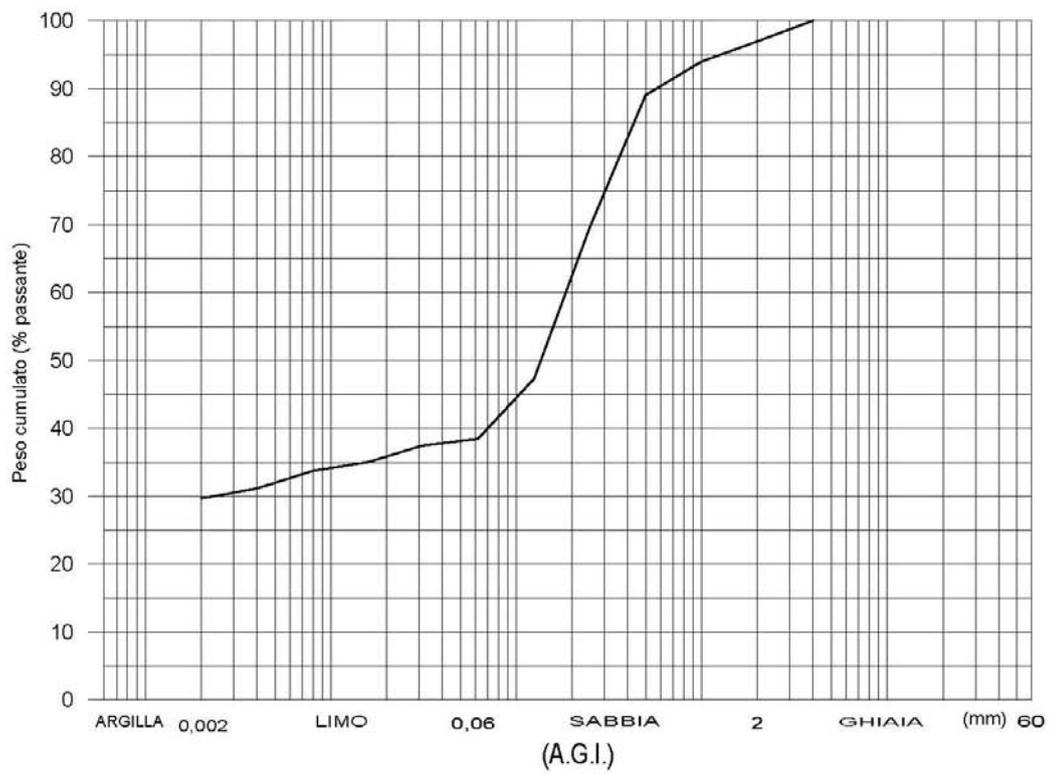
RADIOGRAFIE RX DELLE CAROTE PRELEVATE



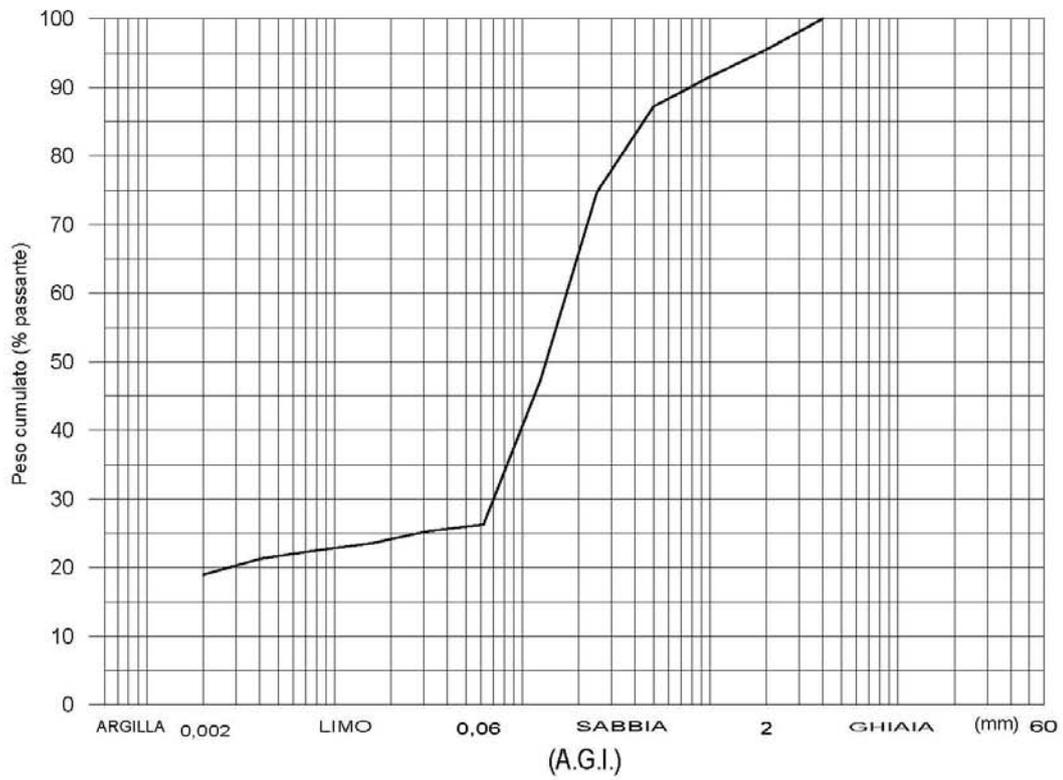
ALLEGATO 4

ANALISI GRANULOMETRICHE

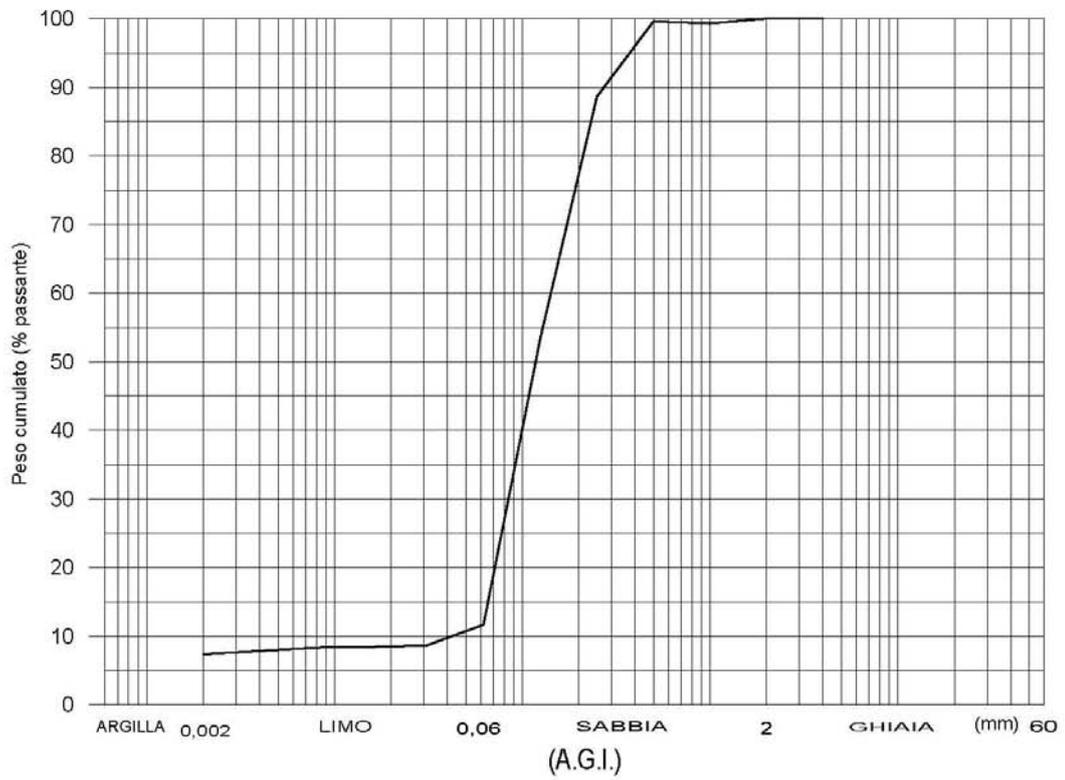
CAMPIONE: C6-2



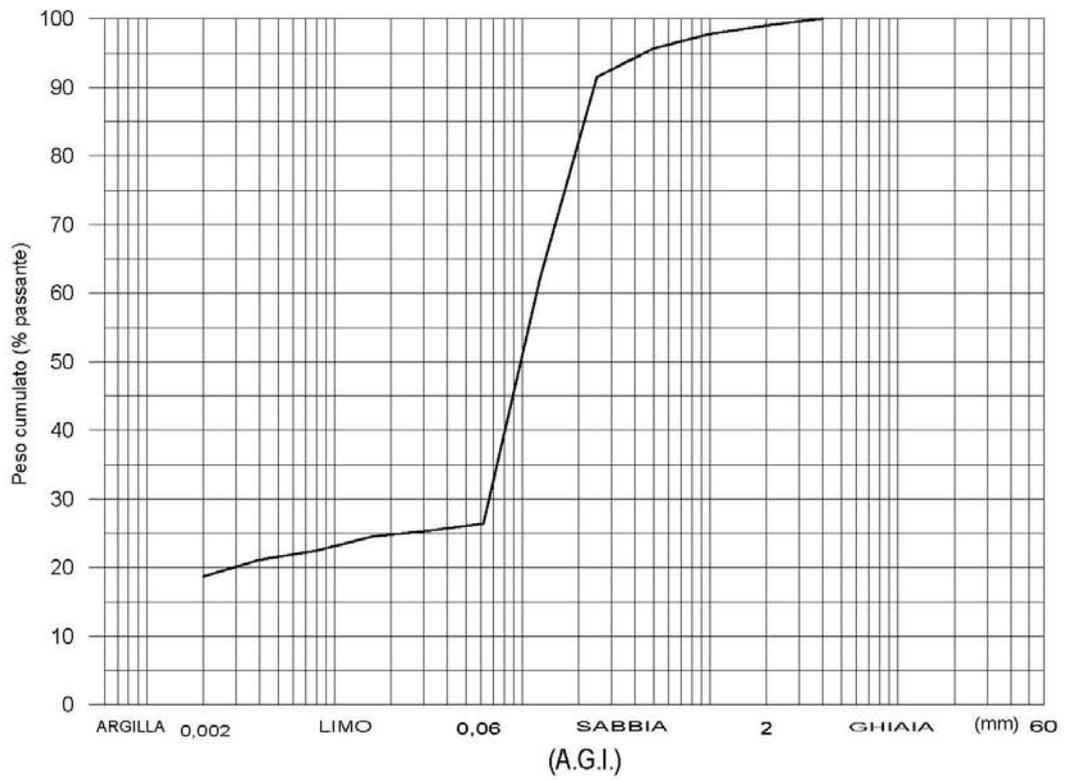
CAMPIONE: C6-3



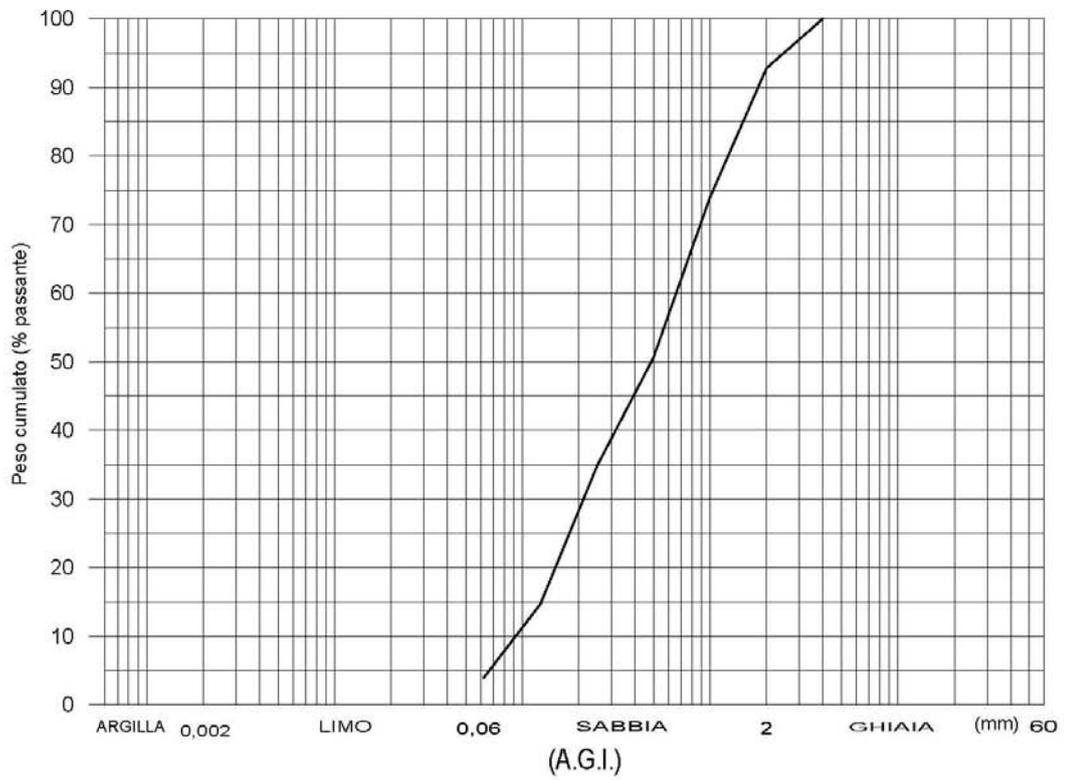
CAMPIONE: C6-4



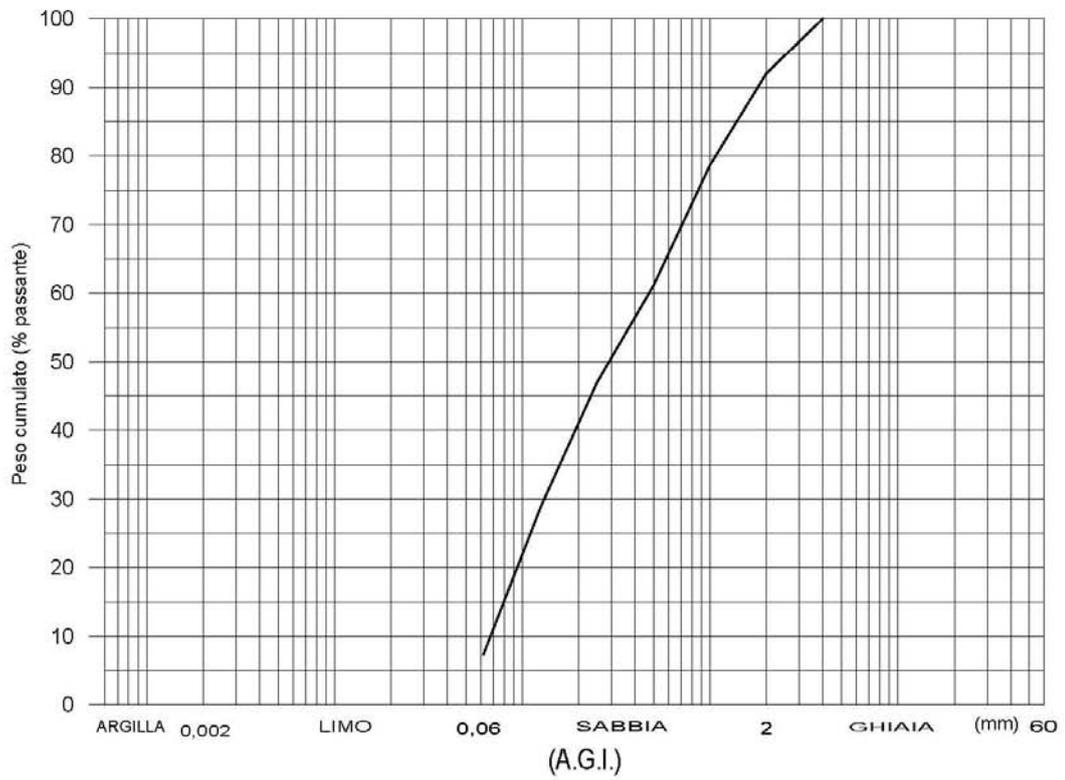
CAMPIONE: C6-5



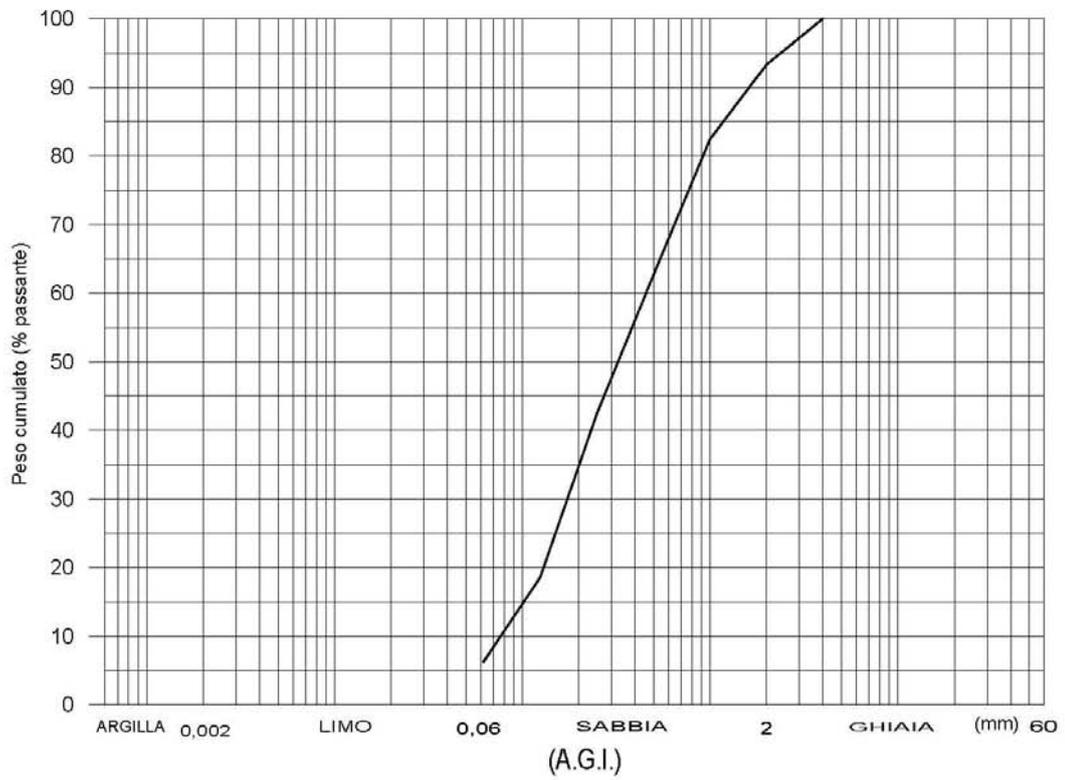
CAMPIONE: C6-6



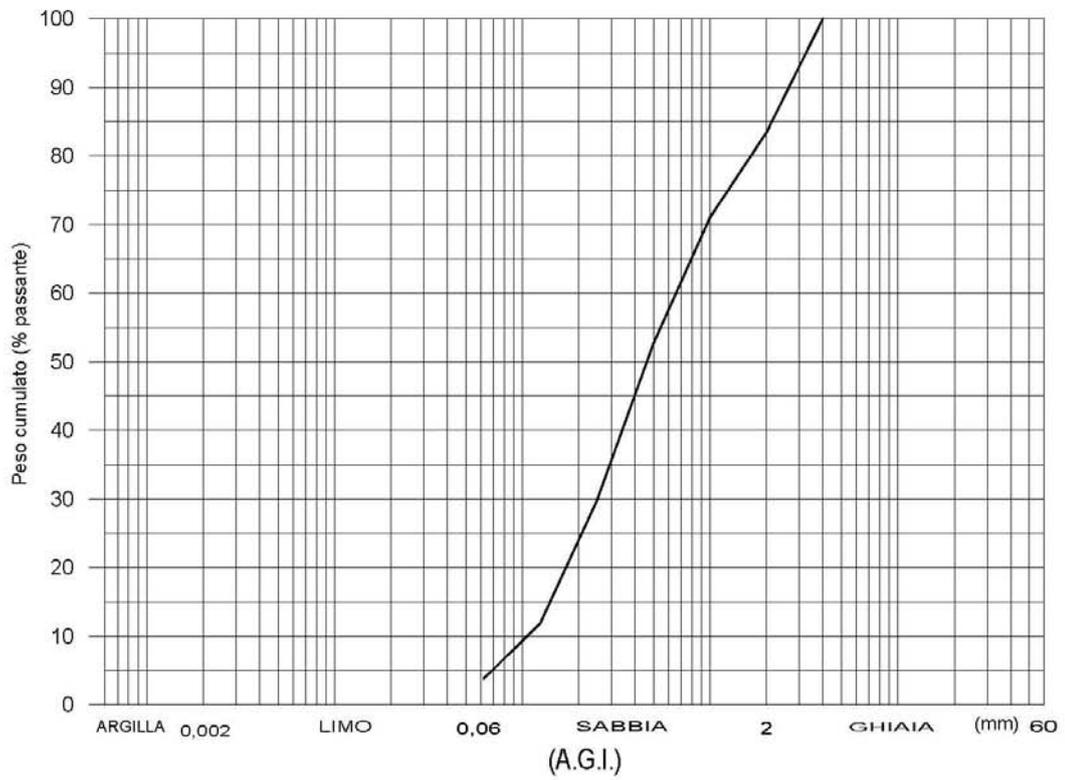
CAMPIONE: C6-7



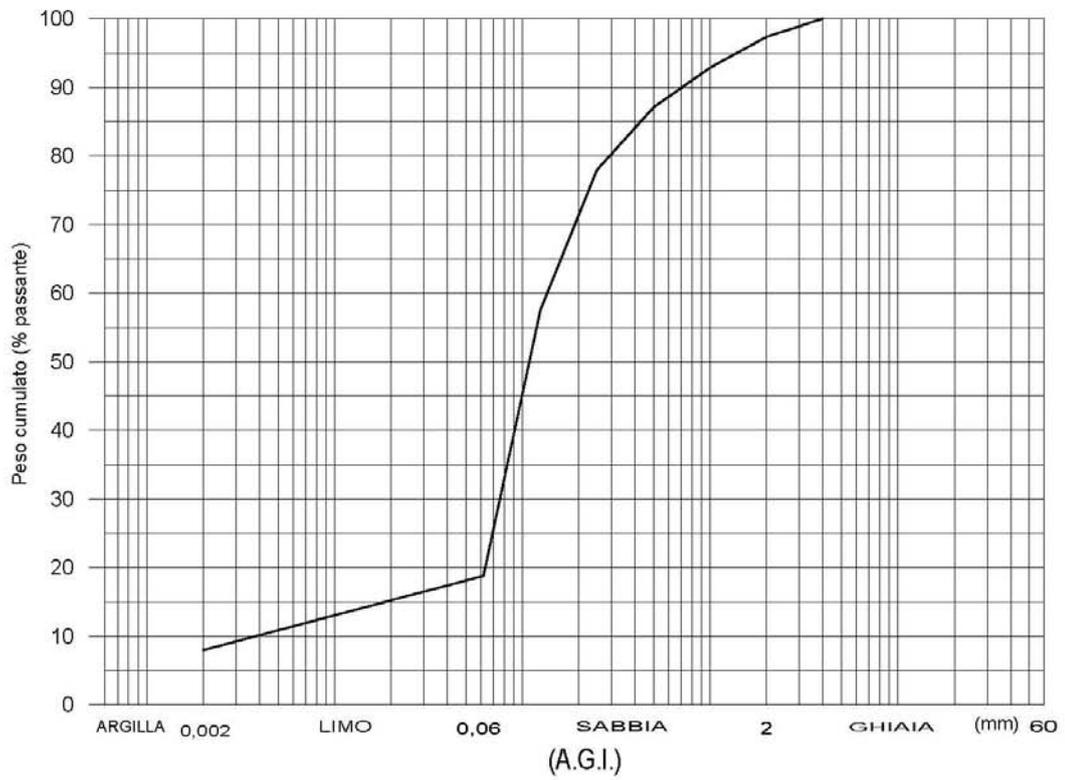
CAMPIONE: C6-8



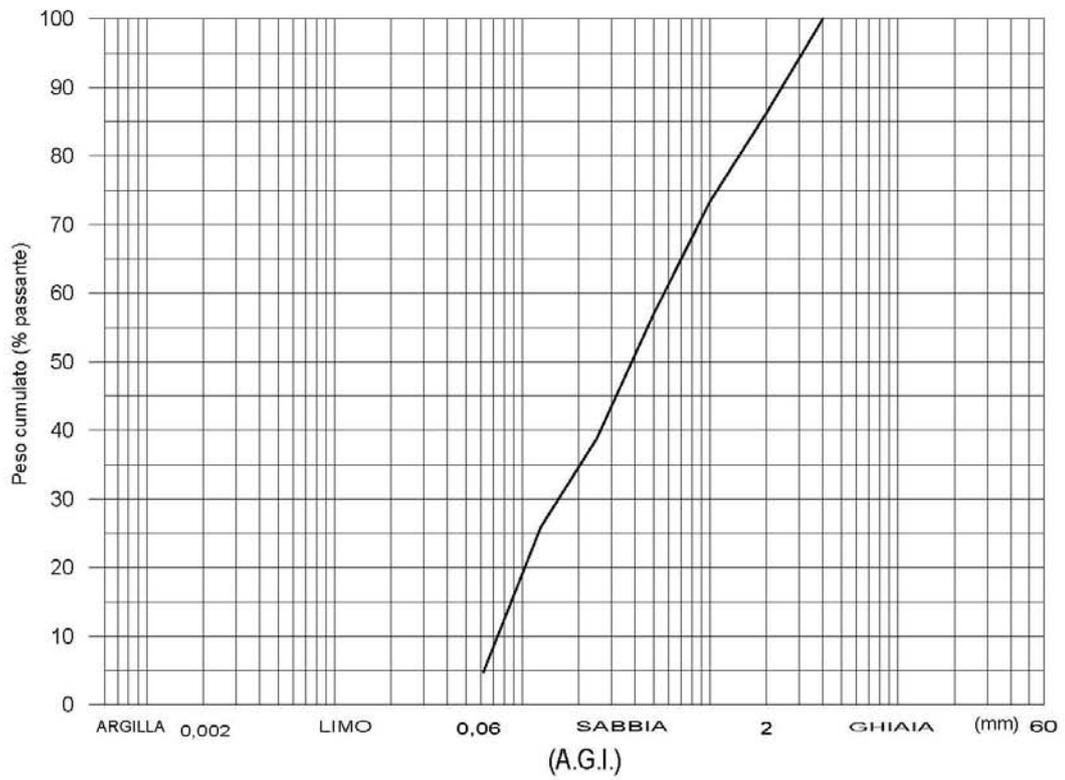
CAMPIONE: C6-9



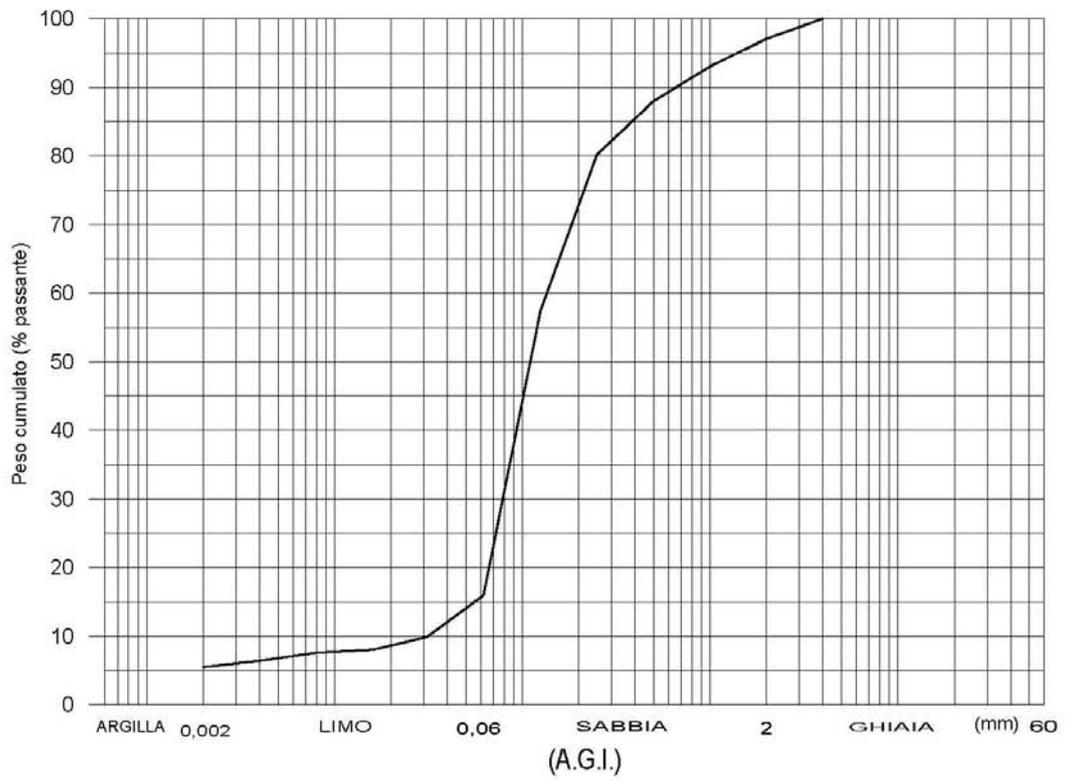
CAMPIONE: C6-10



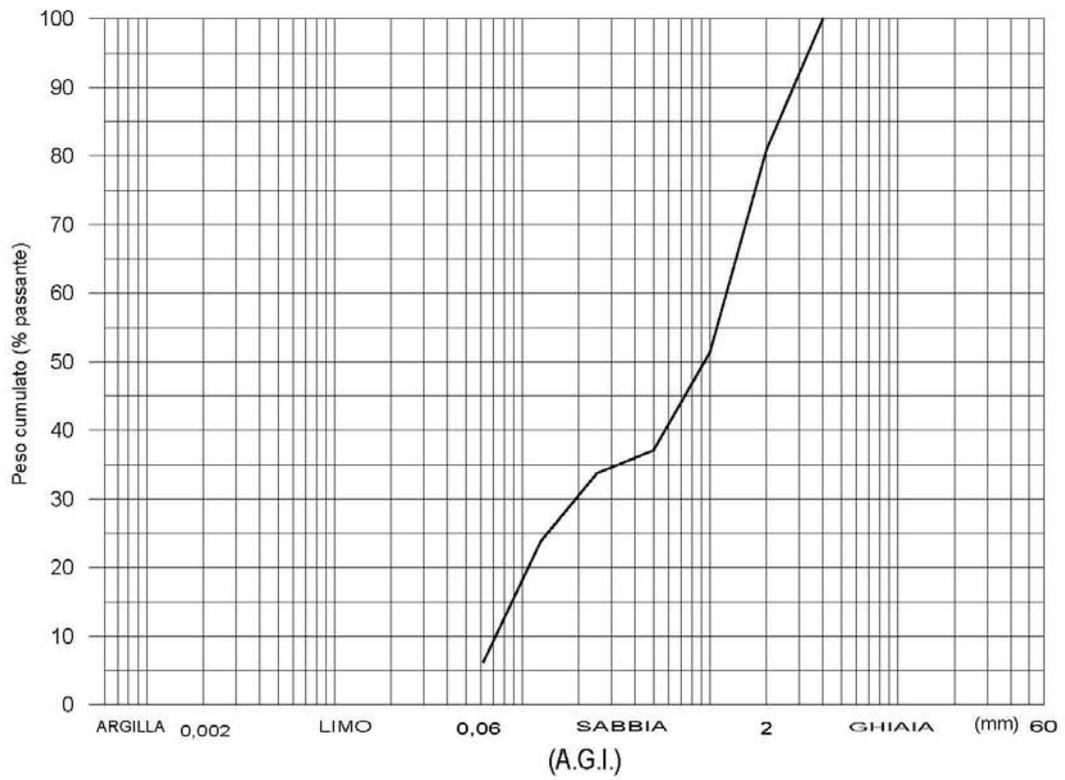
CAMPIONE: C6-11



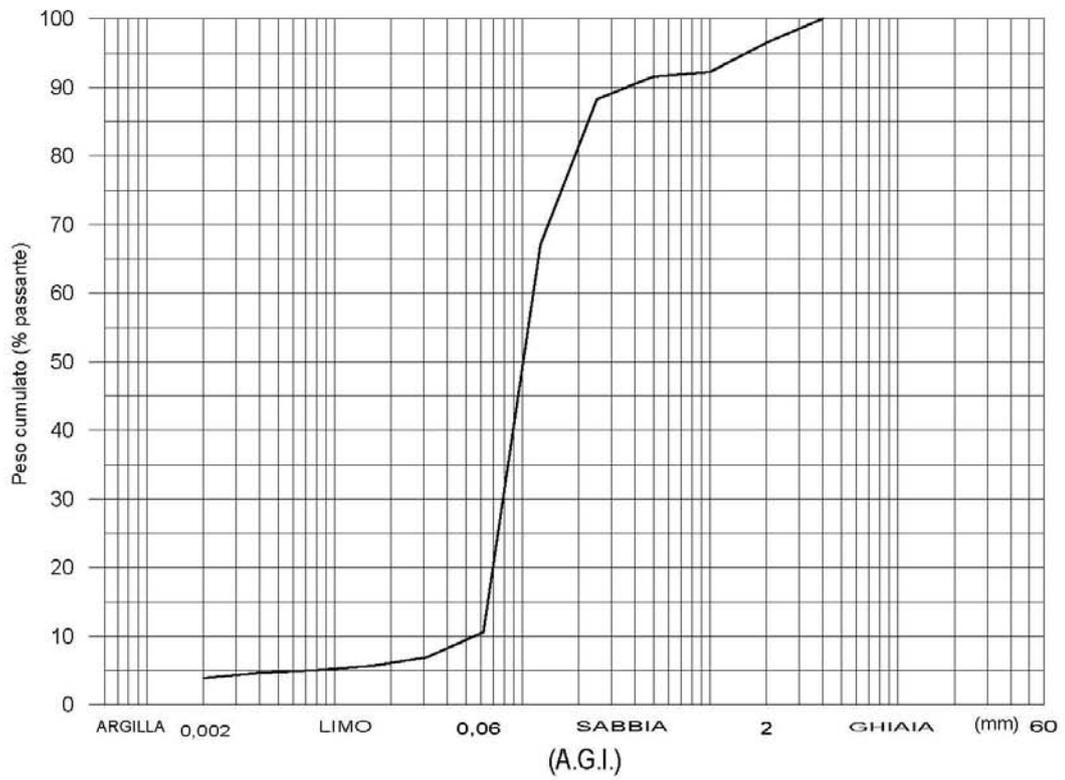
CAMPIONE: C6-12



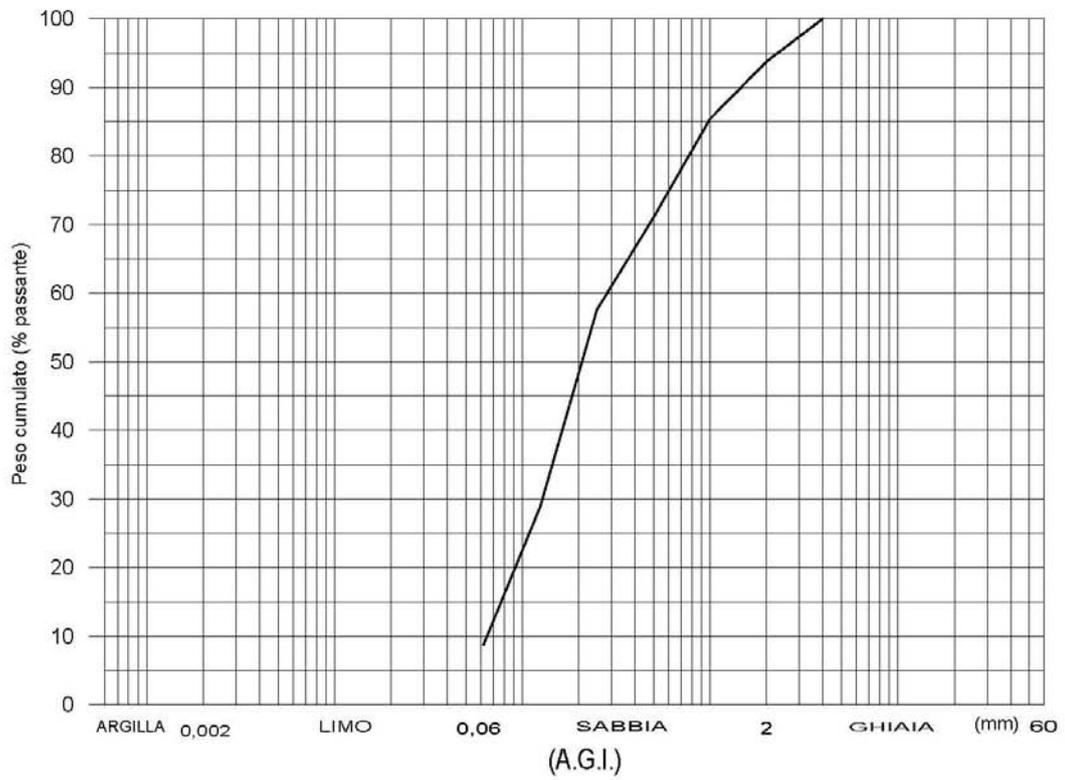
CAMPIONE: C6-13



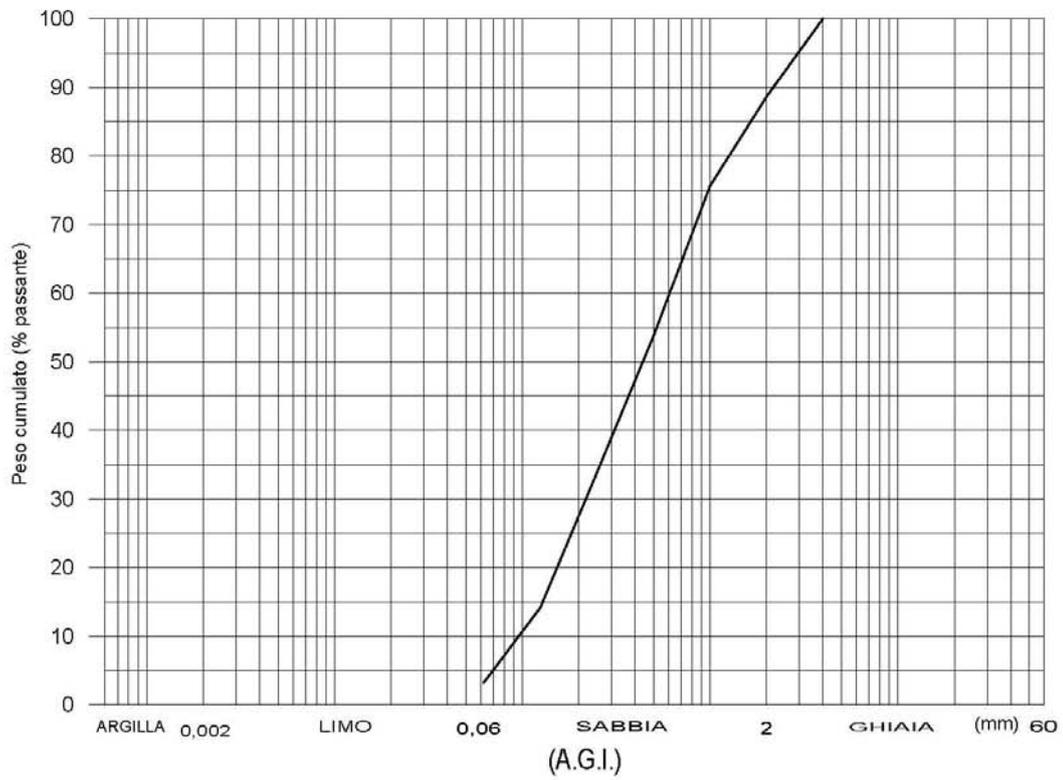
CAMPIONE: C6-14



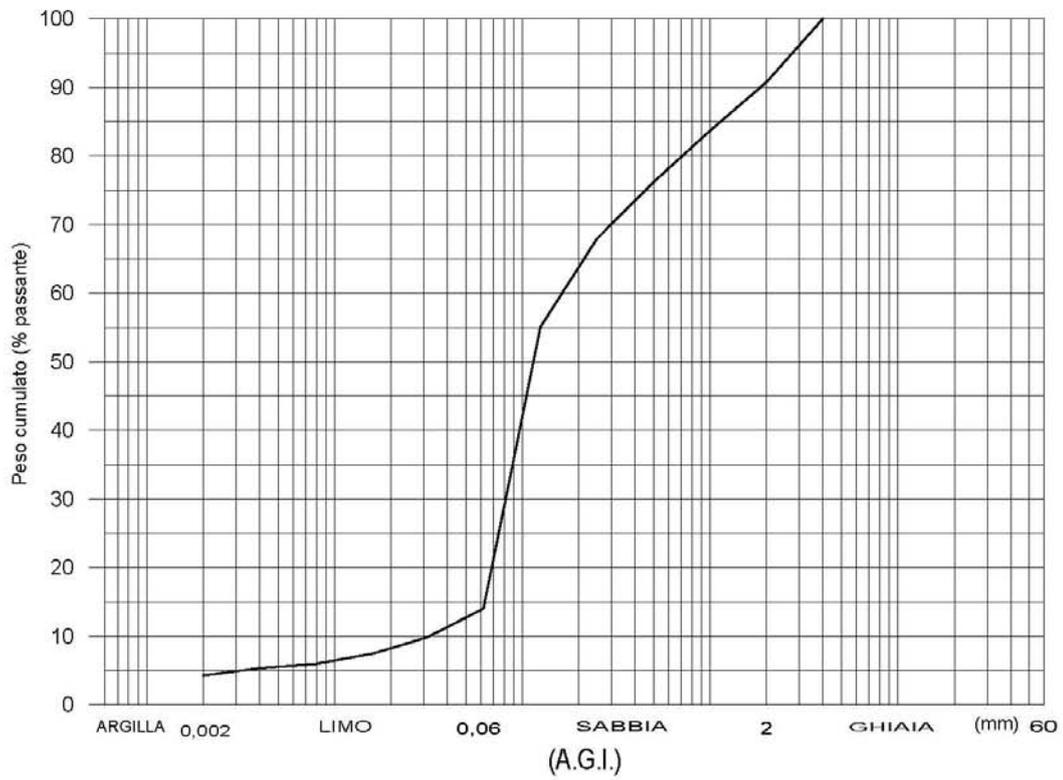
CAMPIONE: C6-15



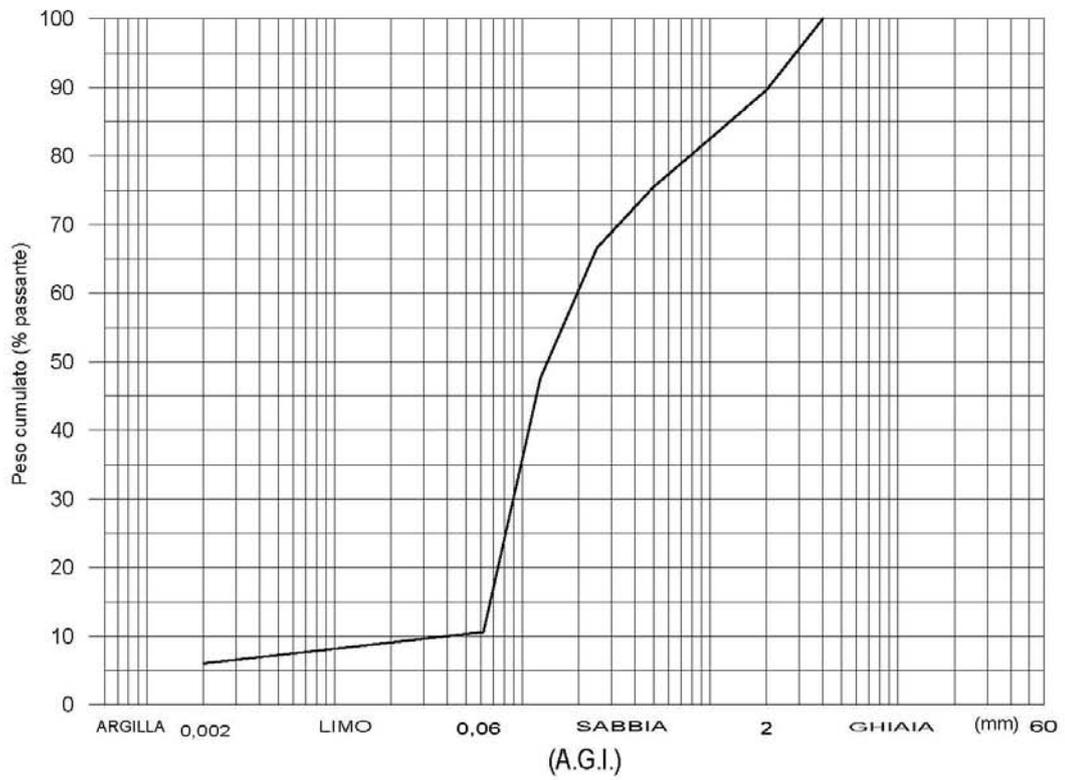
CAMPIONE: C6-16



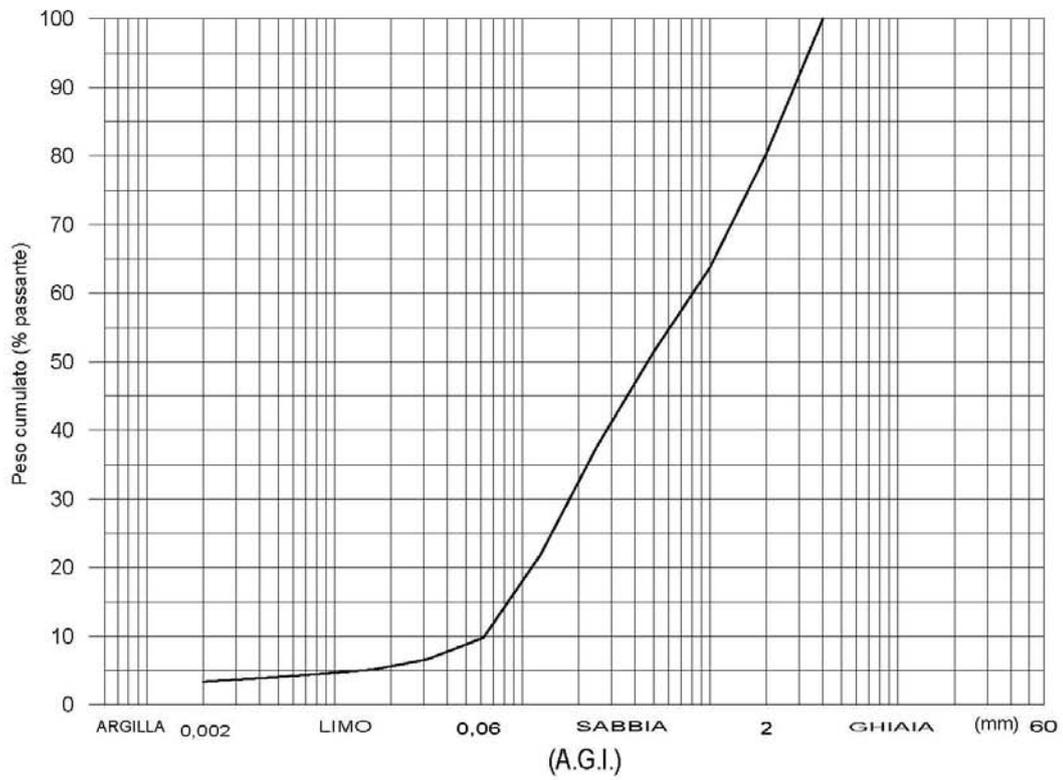
CAMPIONE: C6-17



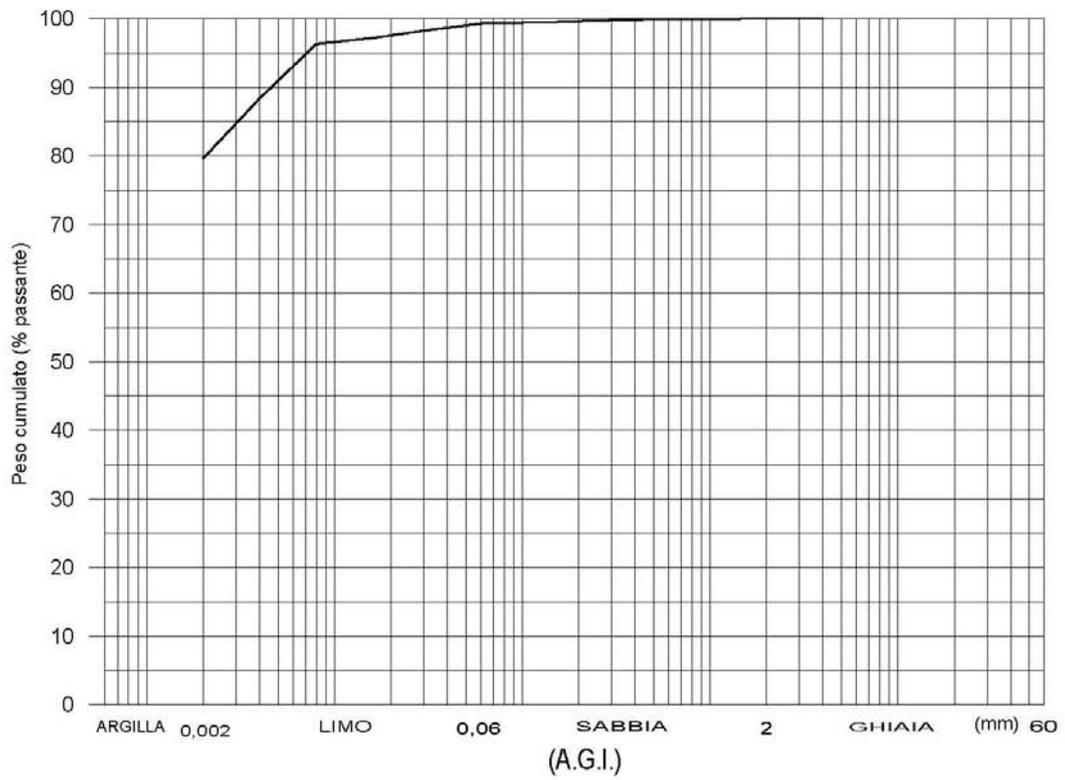
CAMPIONE: C6-18



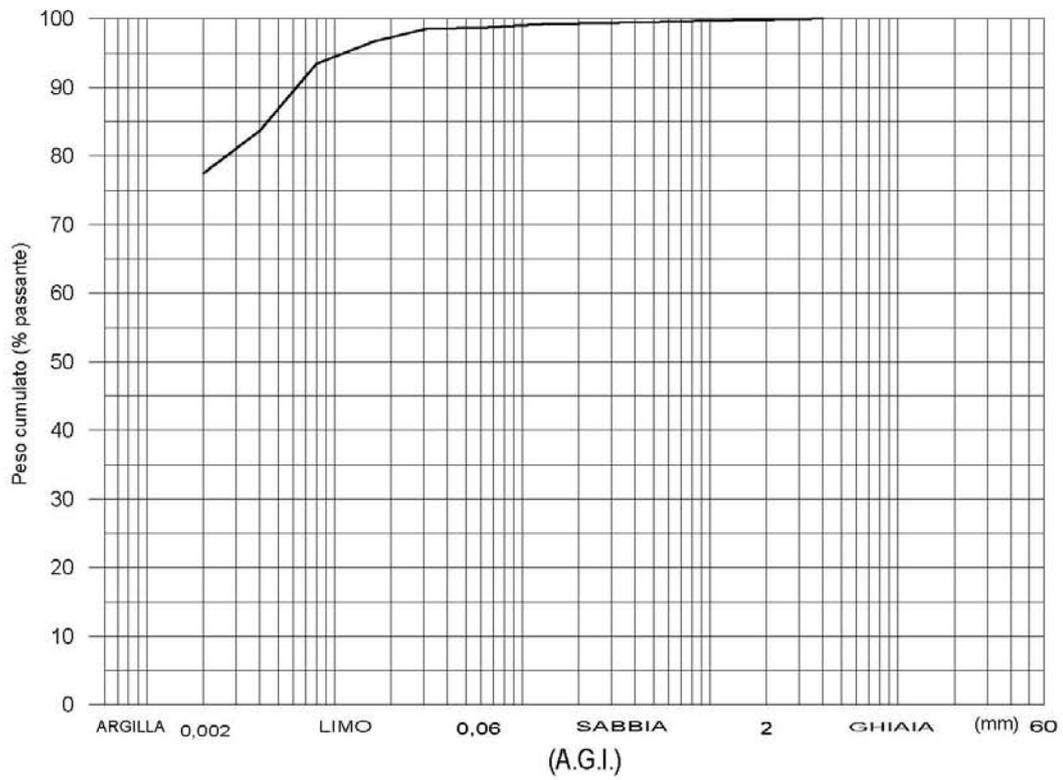
CAMPIONE: C6-19



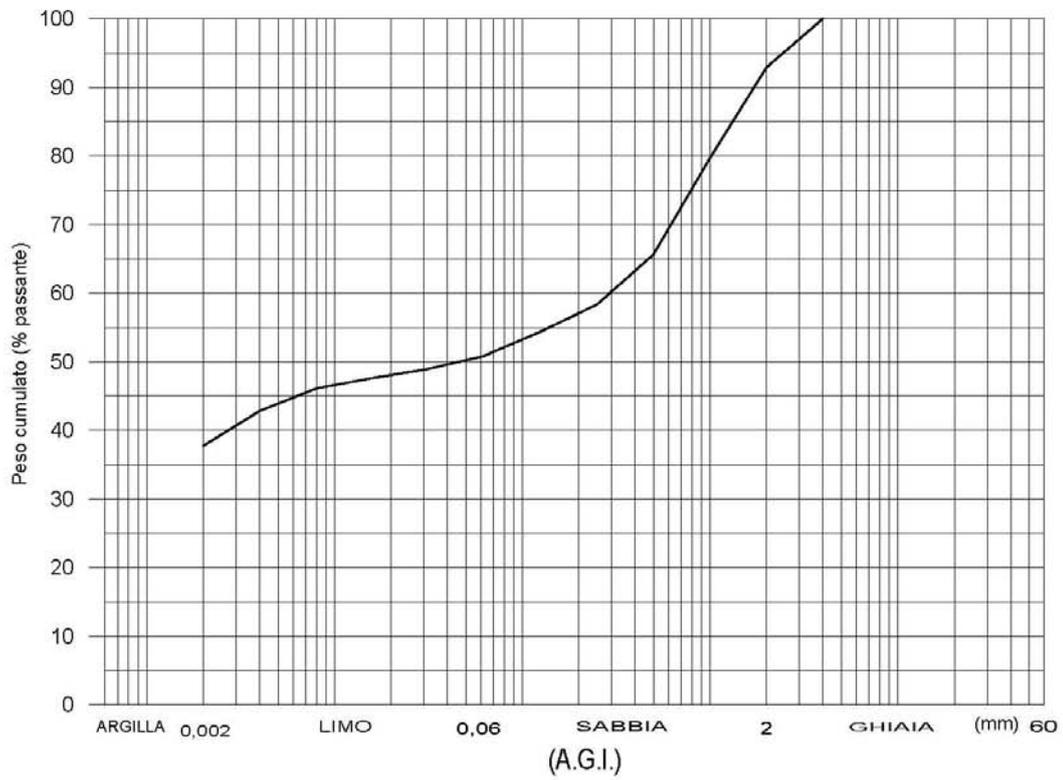
CAMPIONE: C7-1



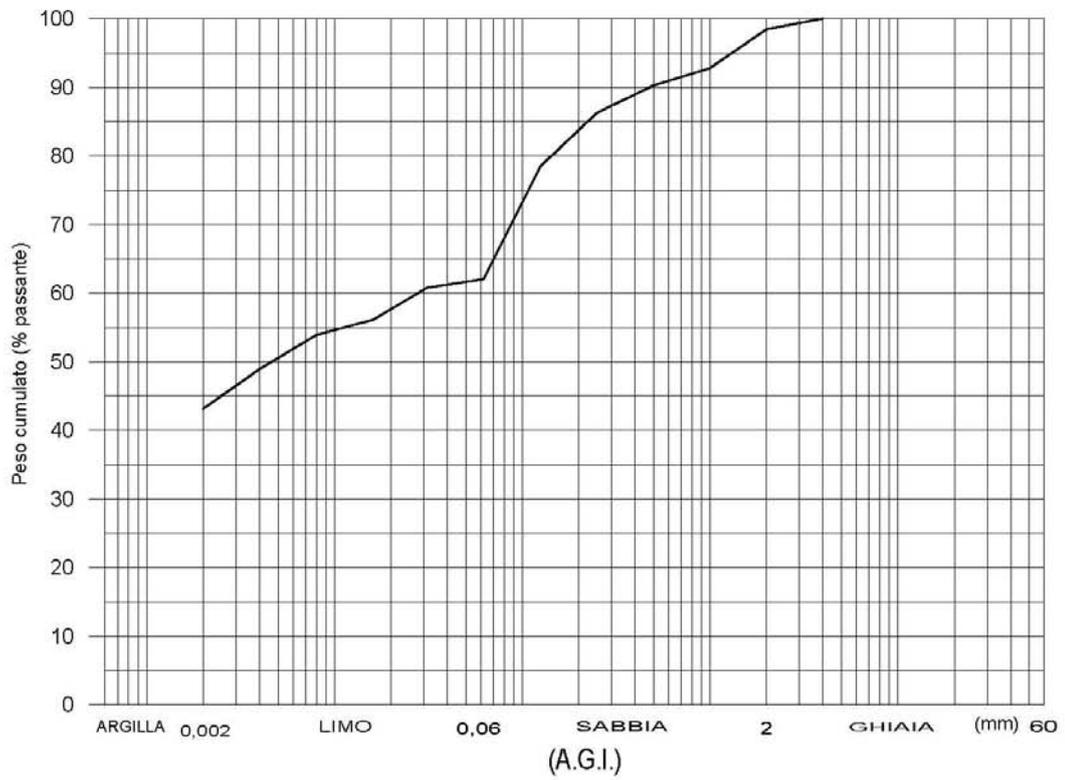
CAMPIONE: C7-2



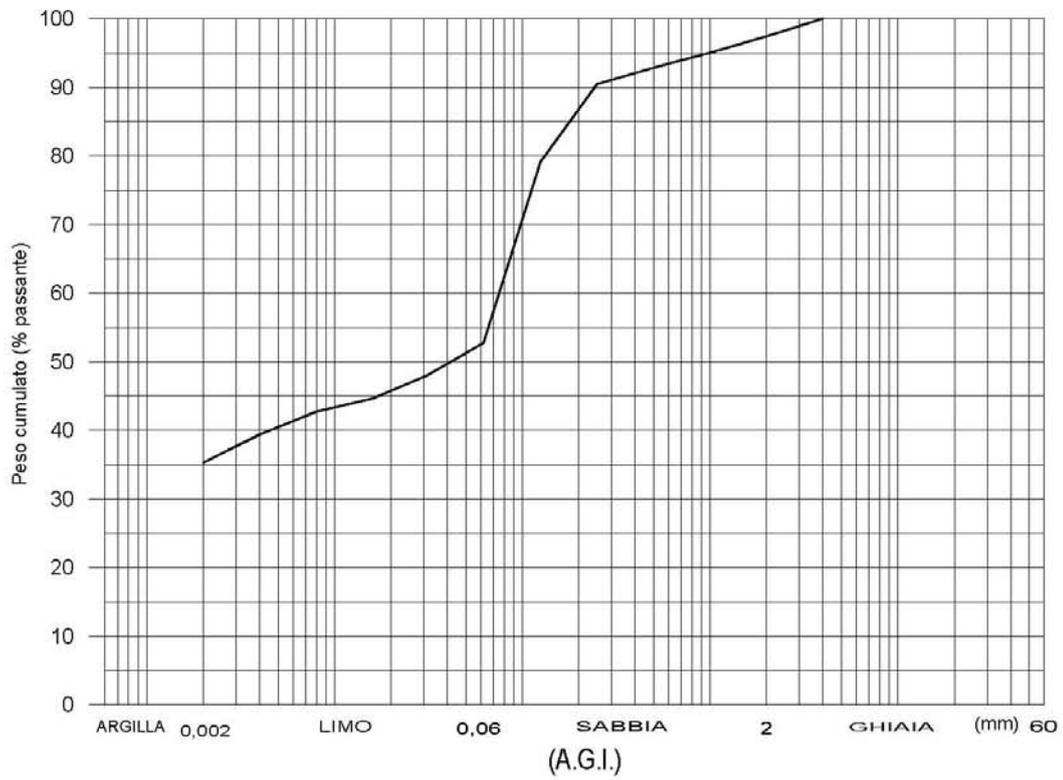
CAMPIONE: C7-3



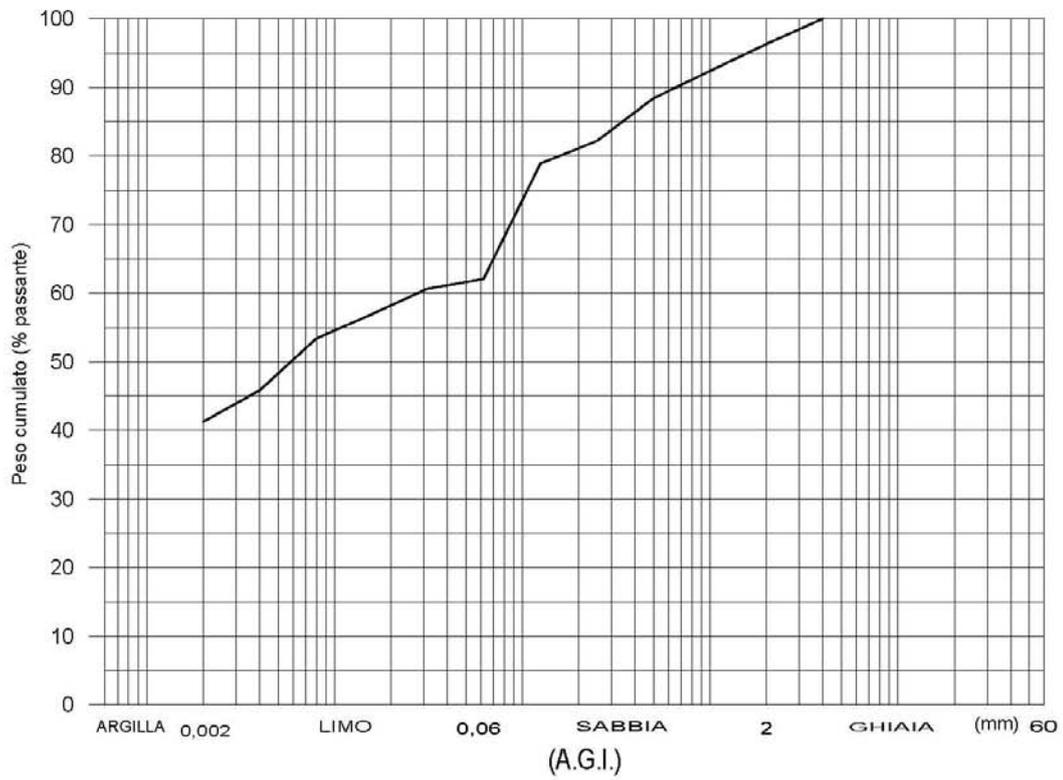
CAMPIONE: C7-4



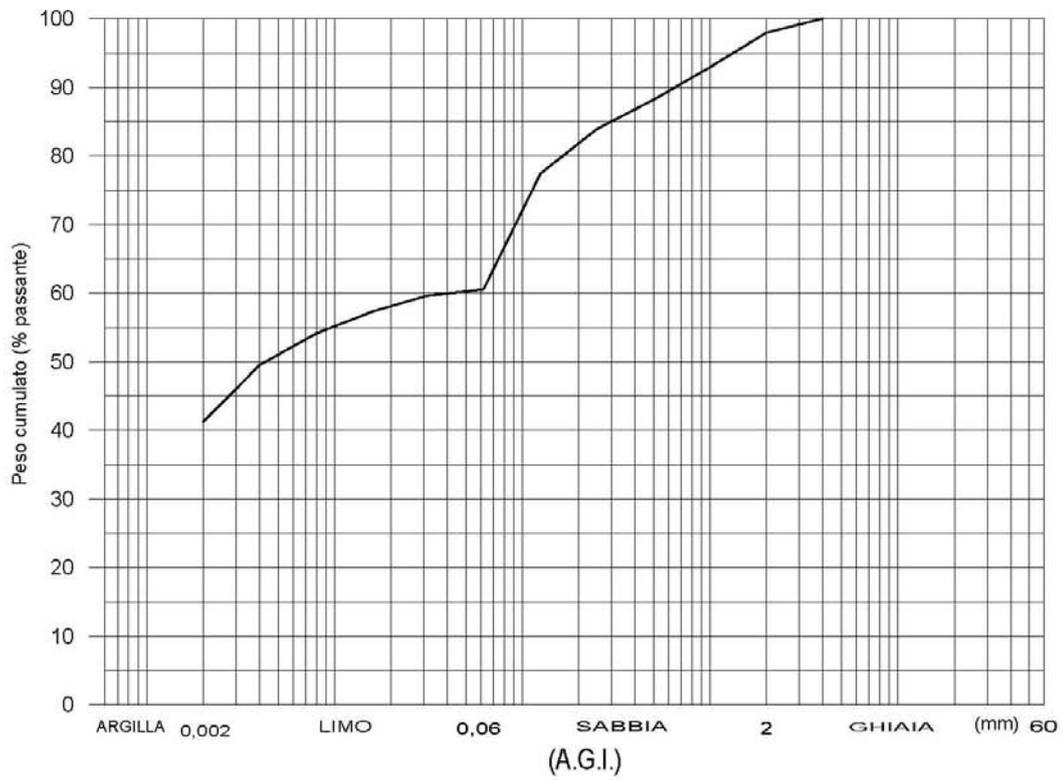
CAMPIONE: C7-5



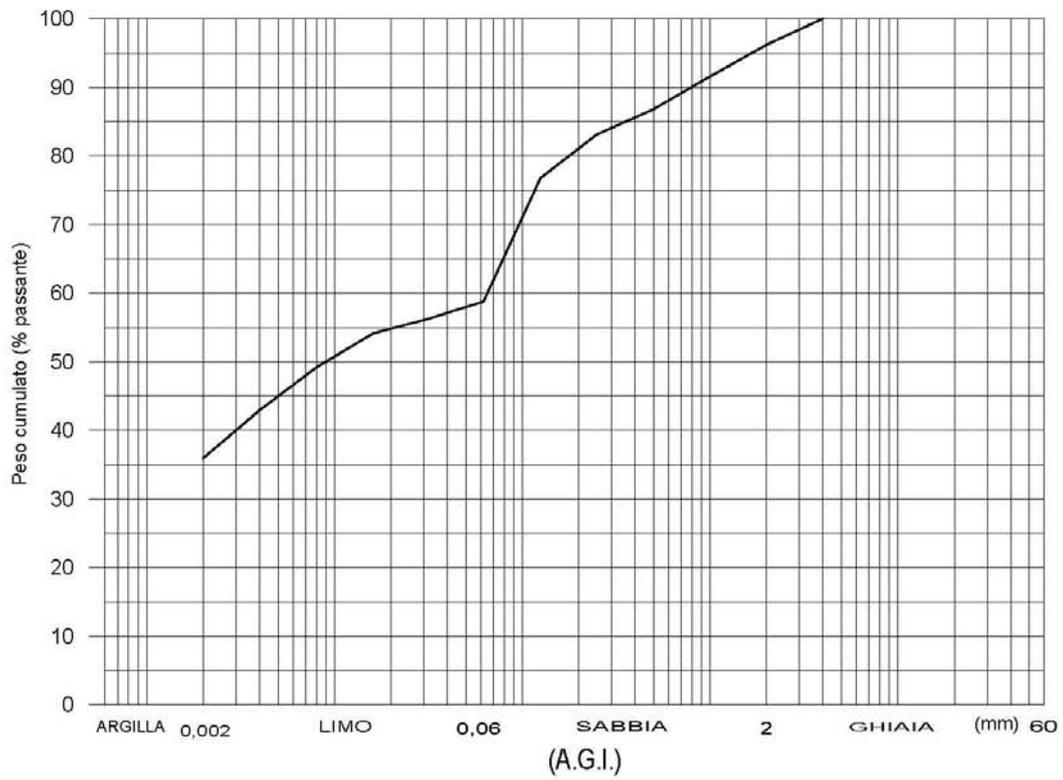
CAMPIONE: C7-6



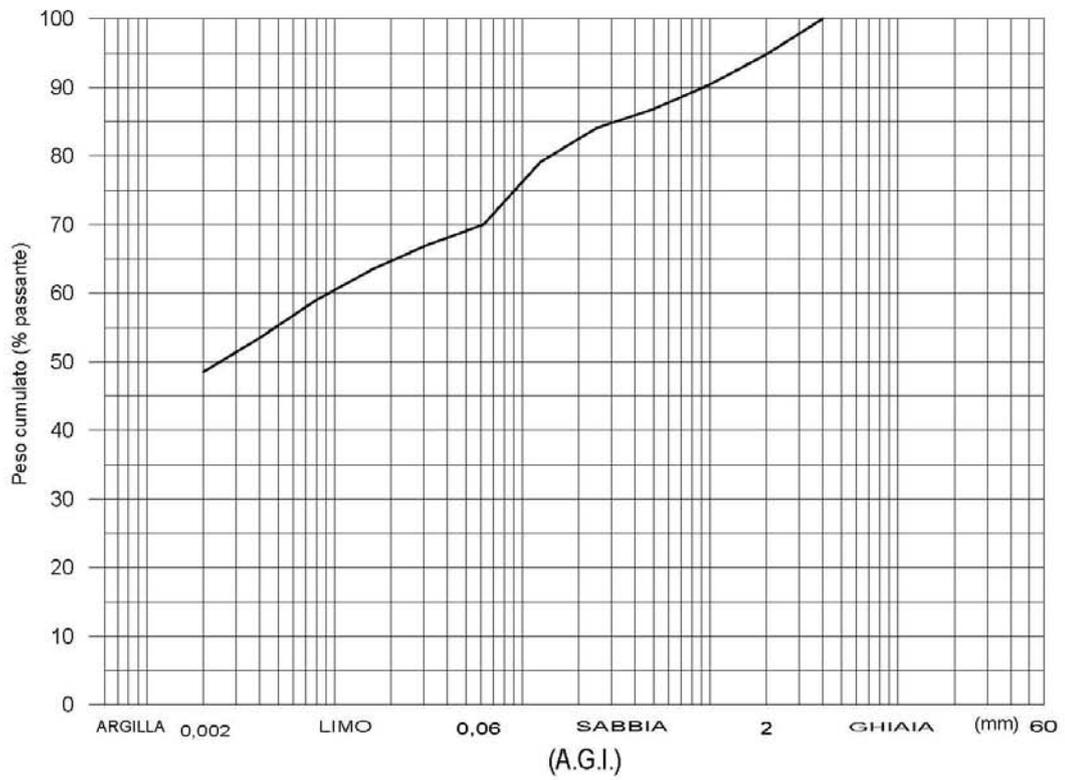
CAMPIONE: C7-7



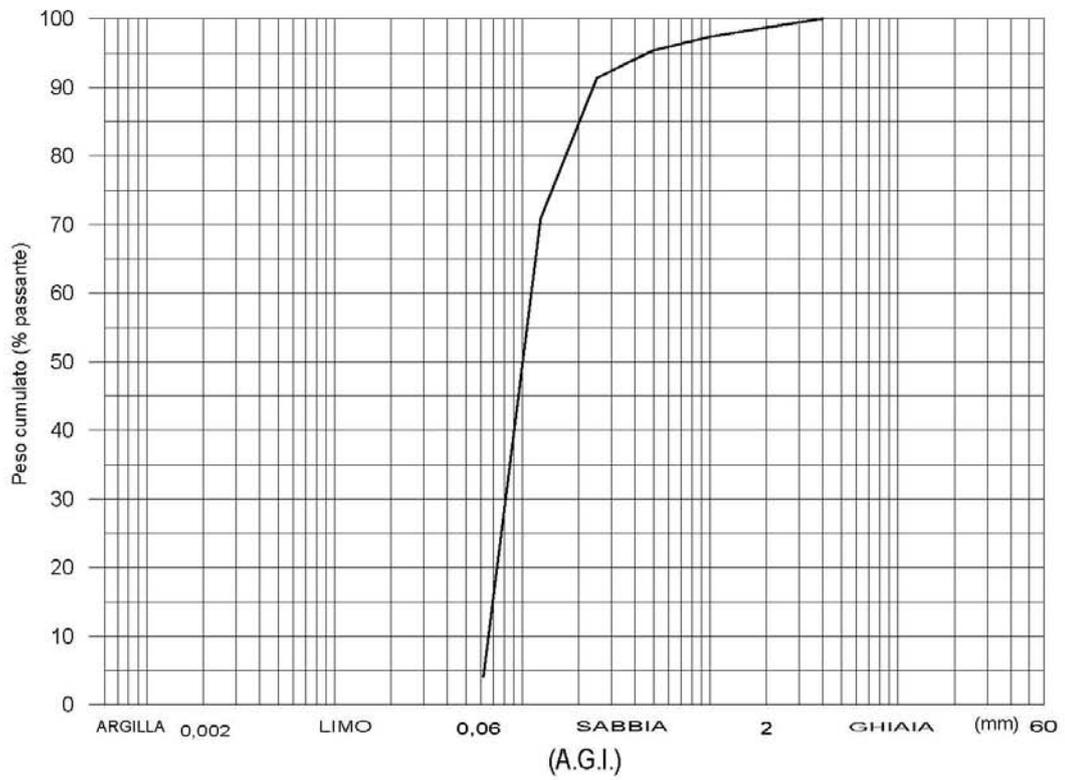
CAMPIONE: C7-8



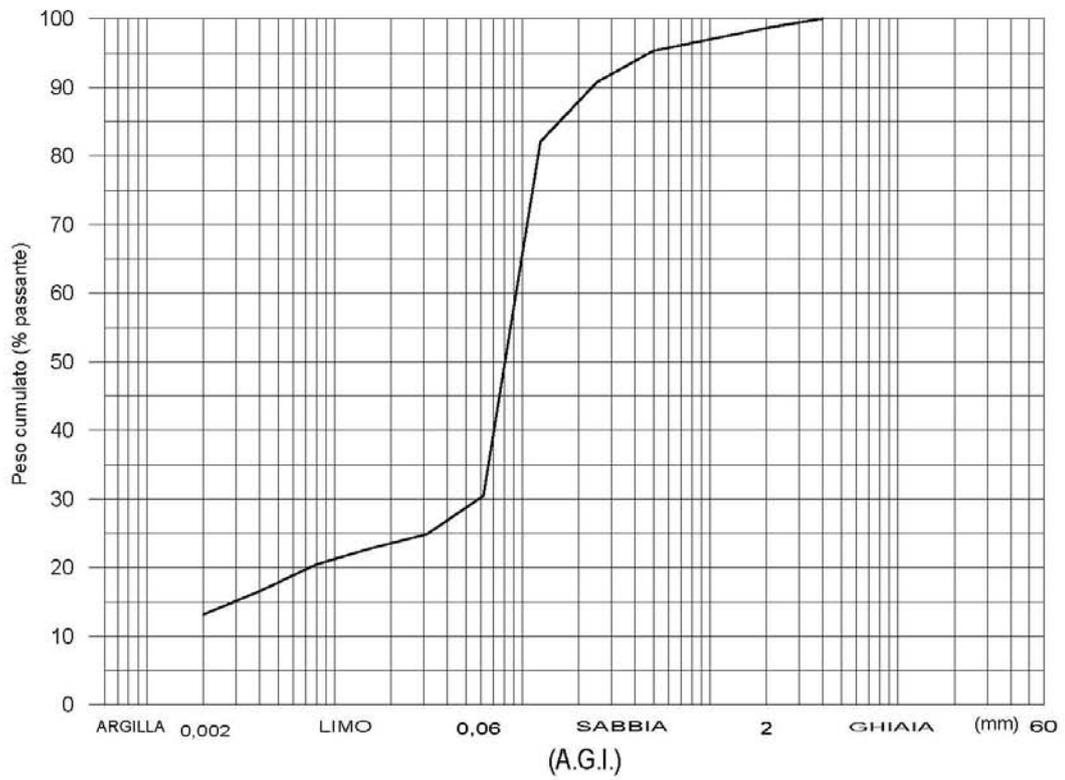
CAMPIONE: C7-9



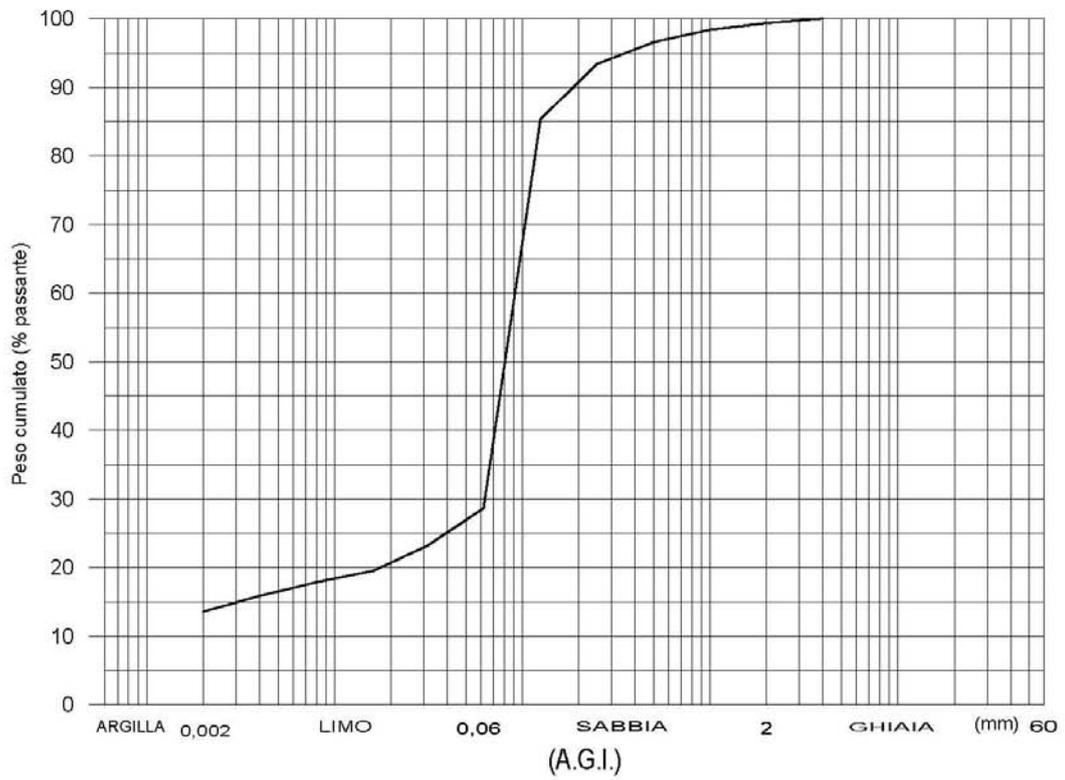
CAMPIONE: C7-10



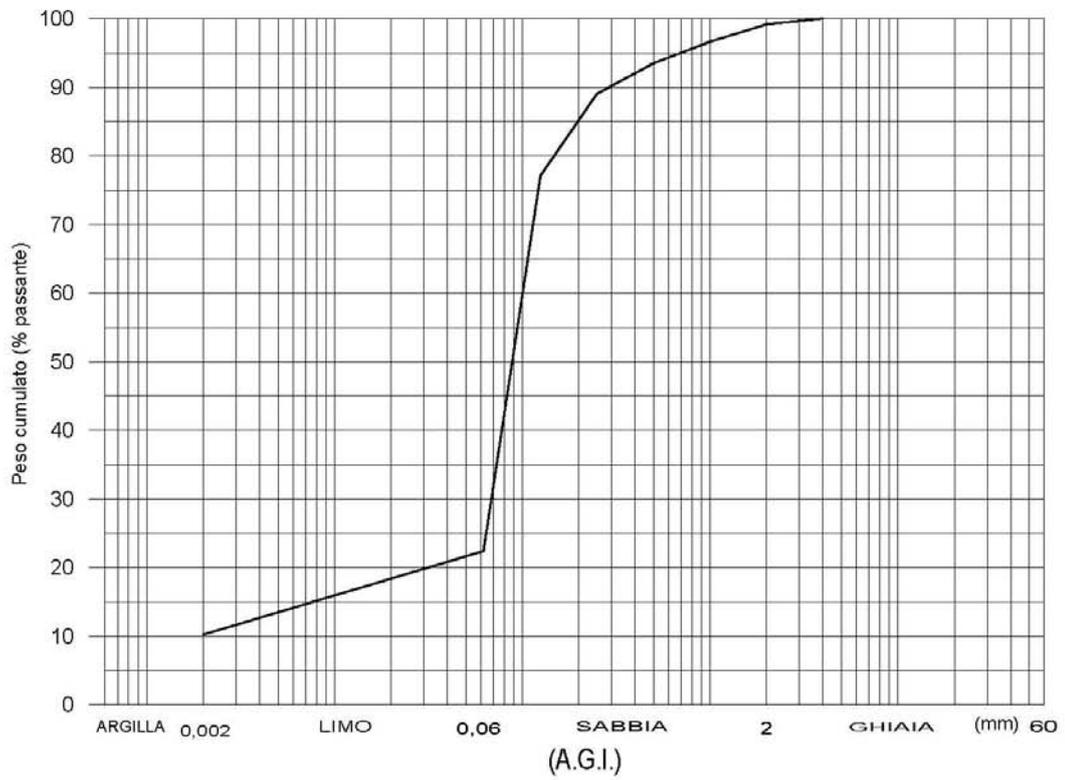
CAMPIONE: C7-11



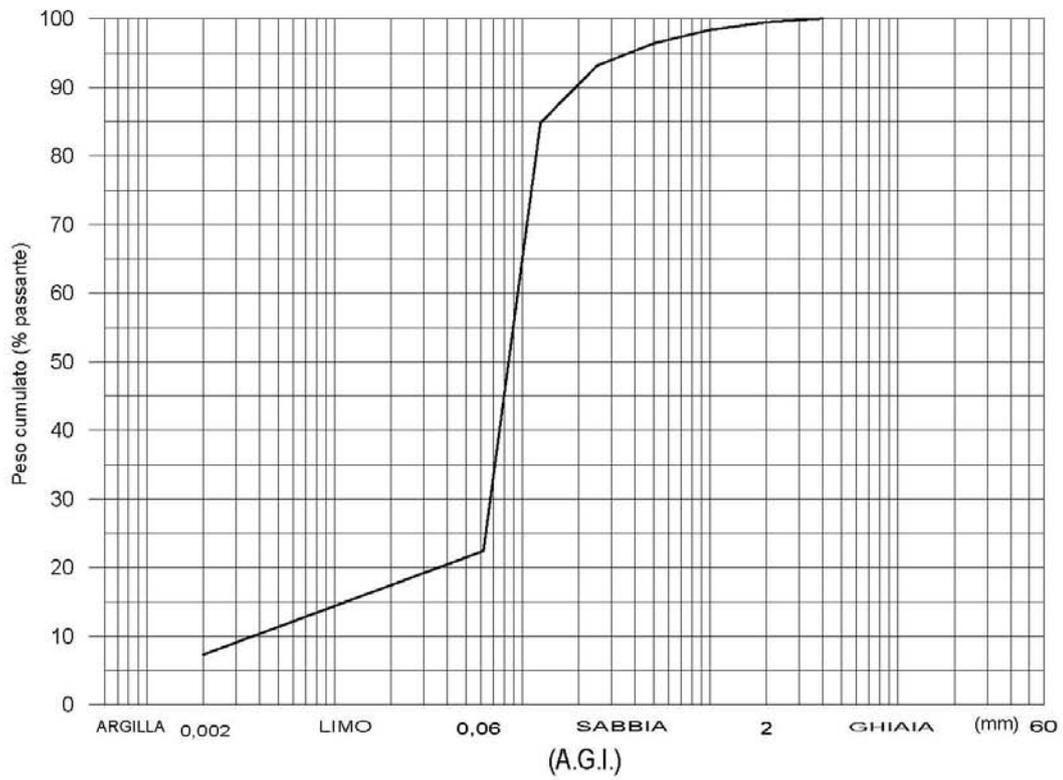
CAMPIONE: C7-12



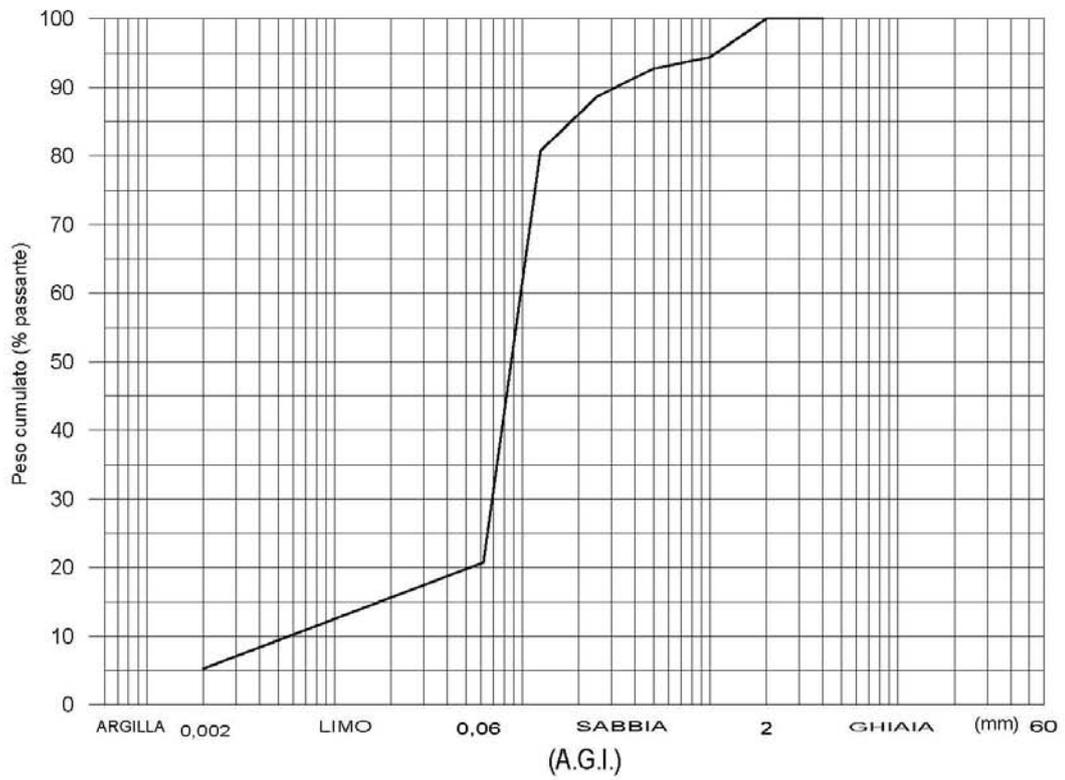
CAMPIONE: C7-13



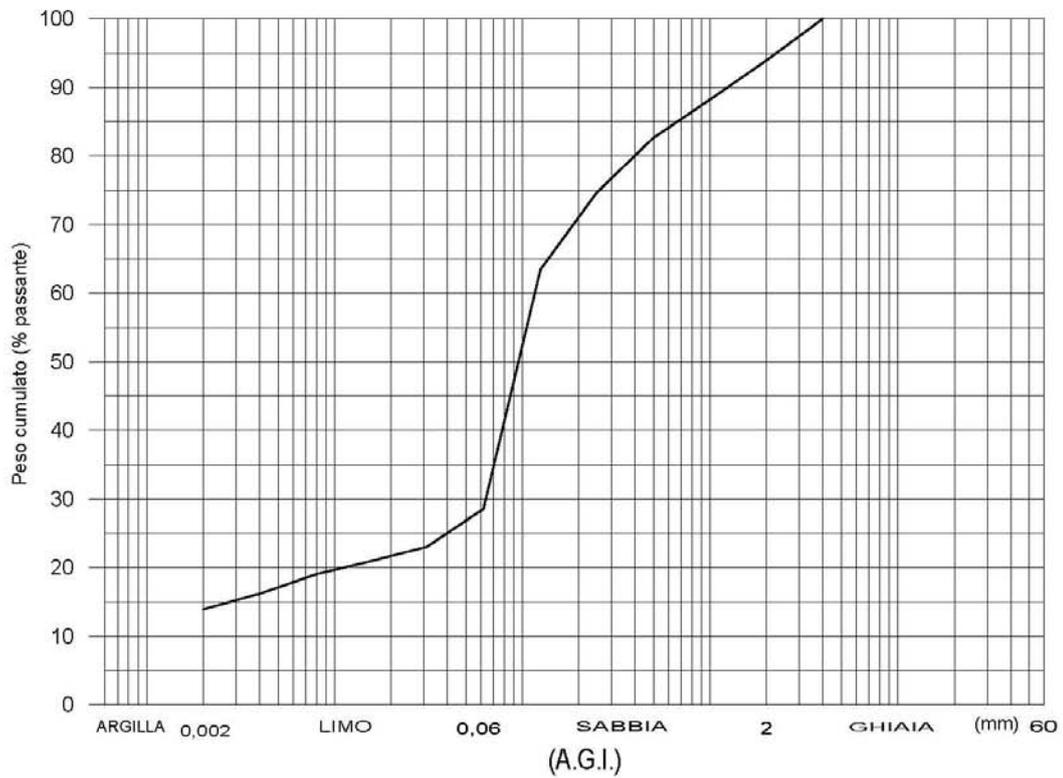
CAMPIONE: C7-14



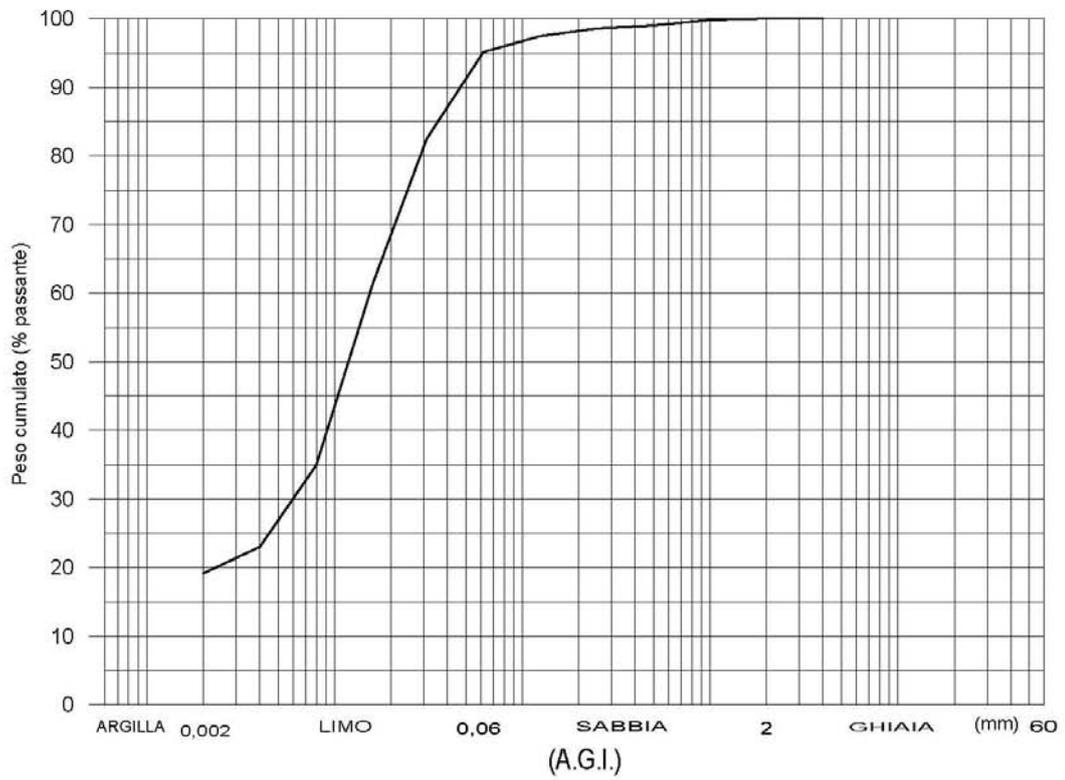
CAMPIONE: C7-15



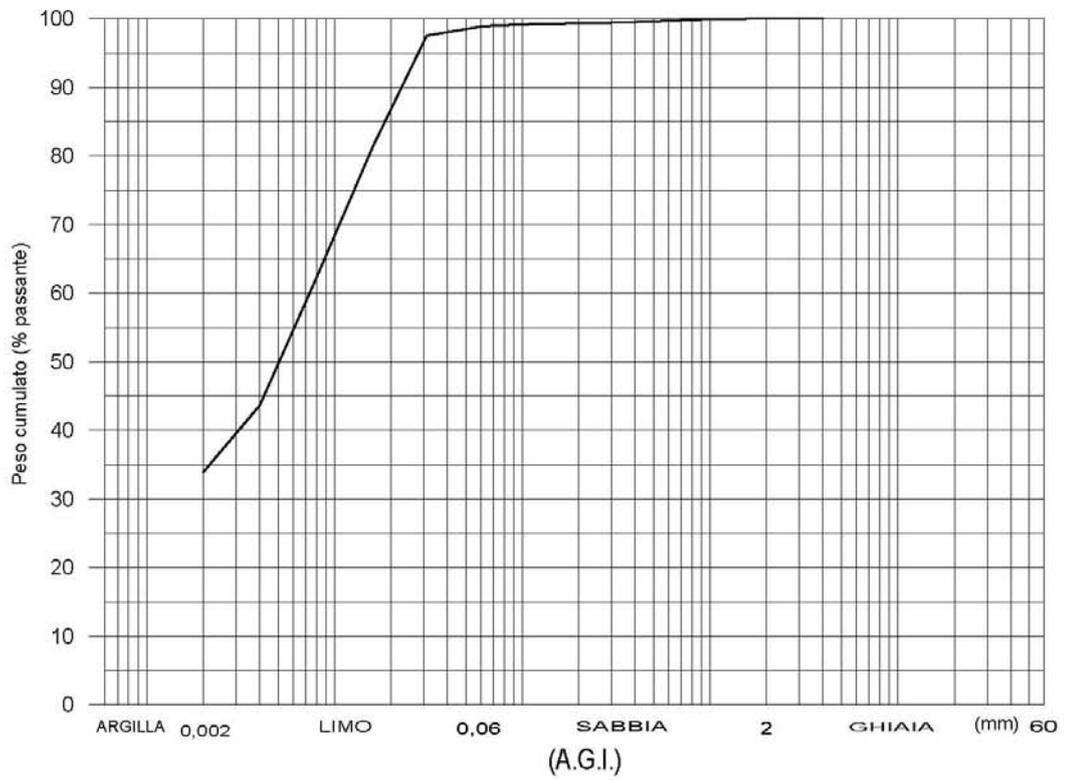
CAMPIONE: C7-16



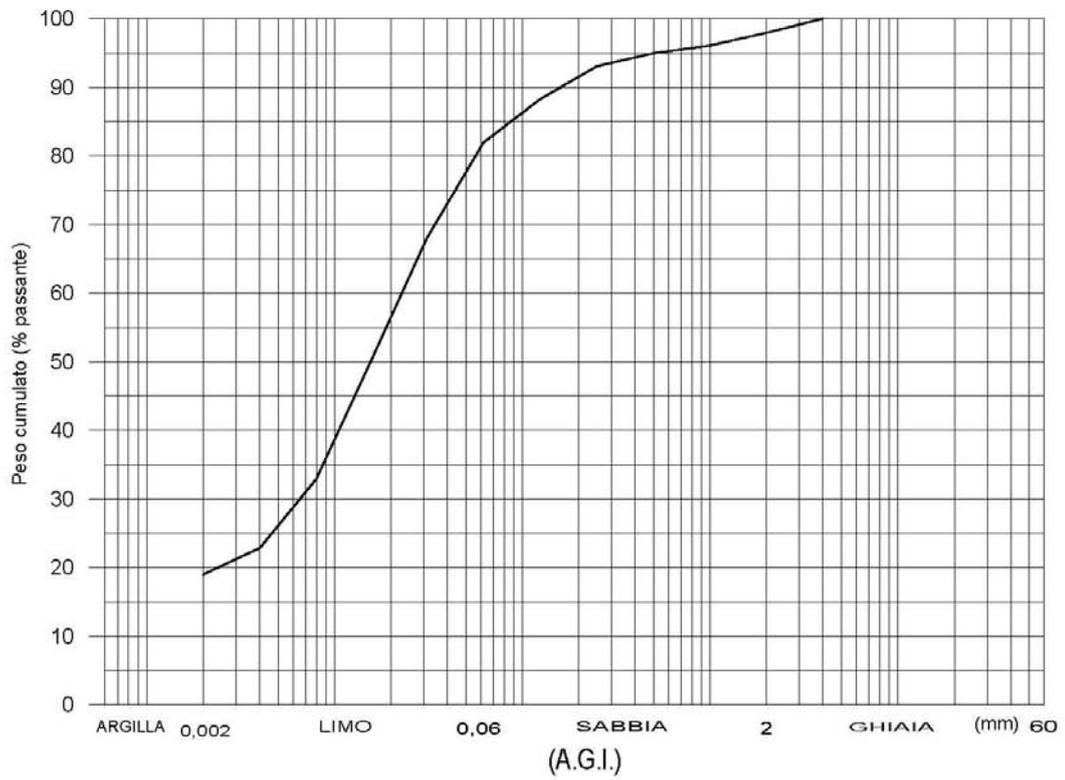
CAMPIONE: C8-1



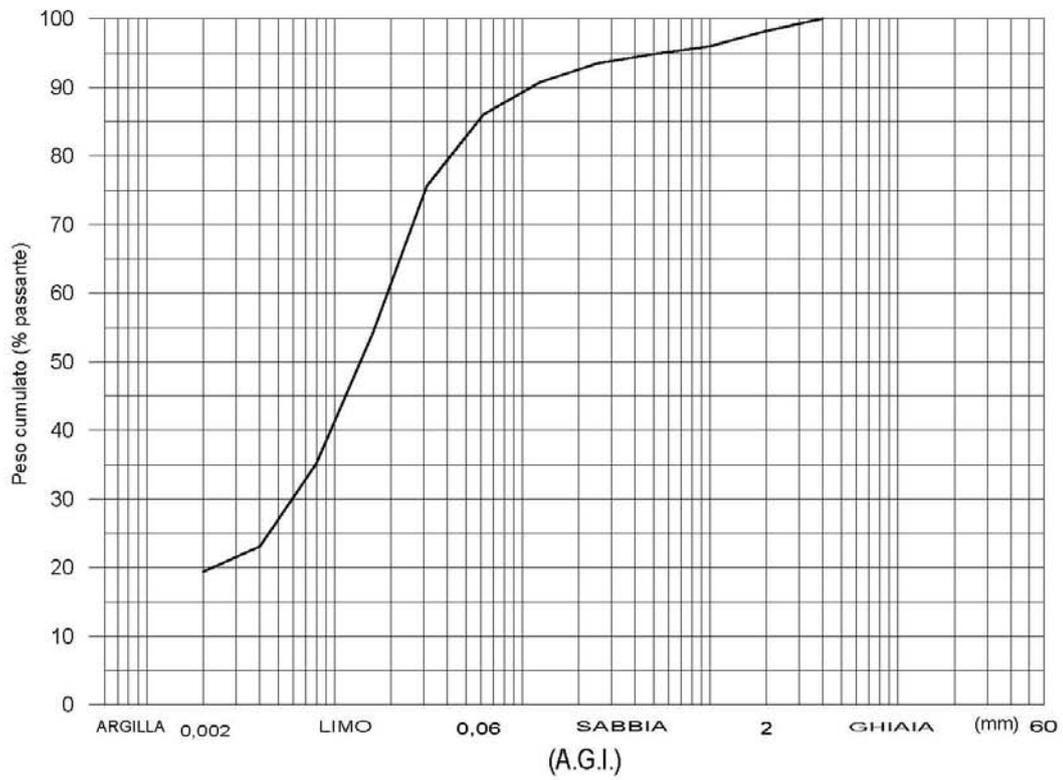
CAMPIONE: C8-2



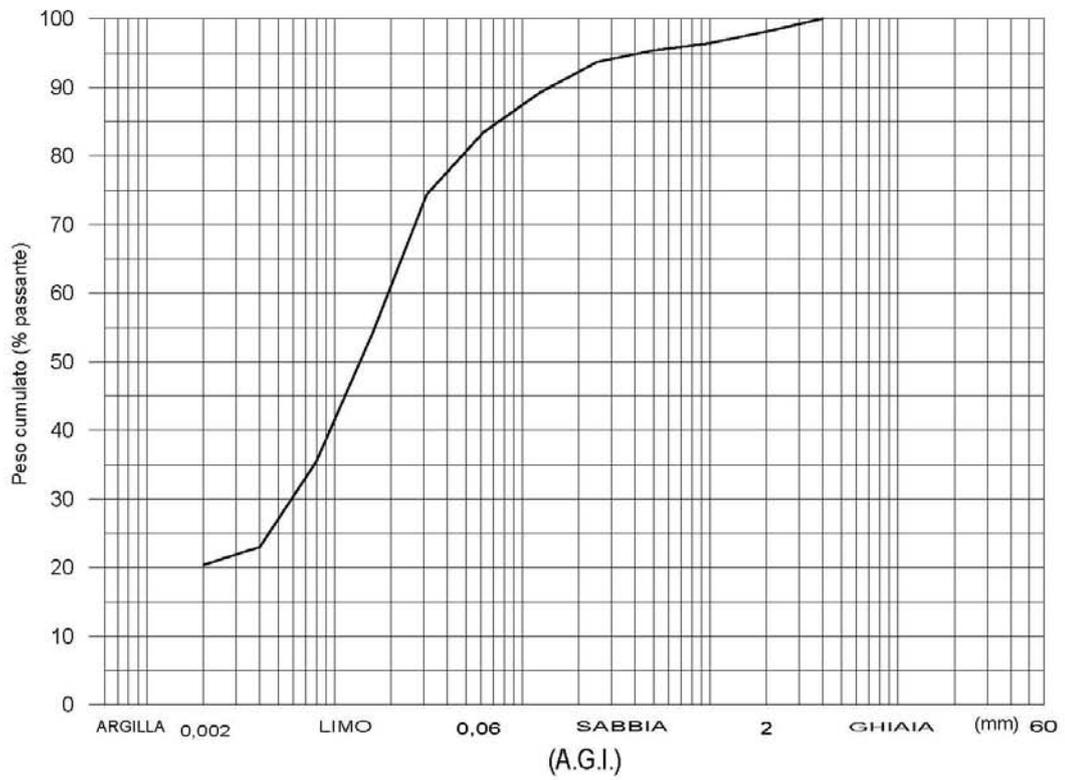
CAMPIONE: C8-3



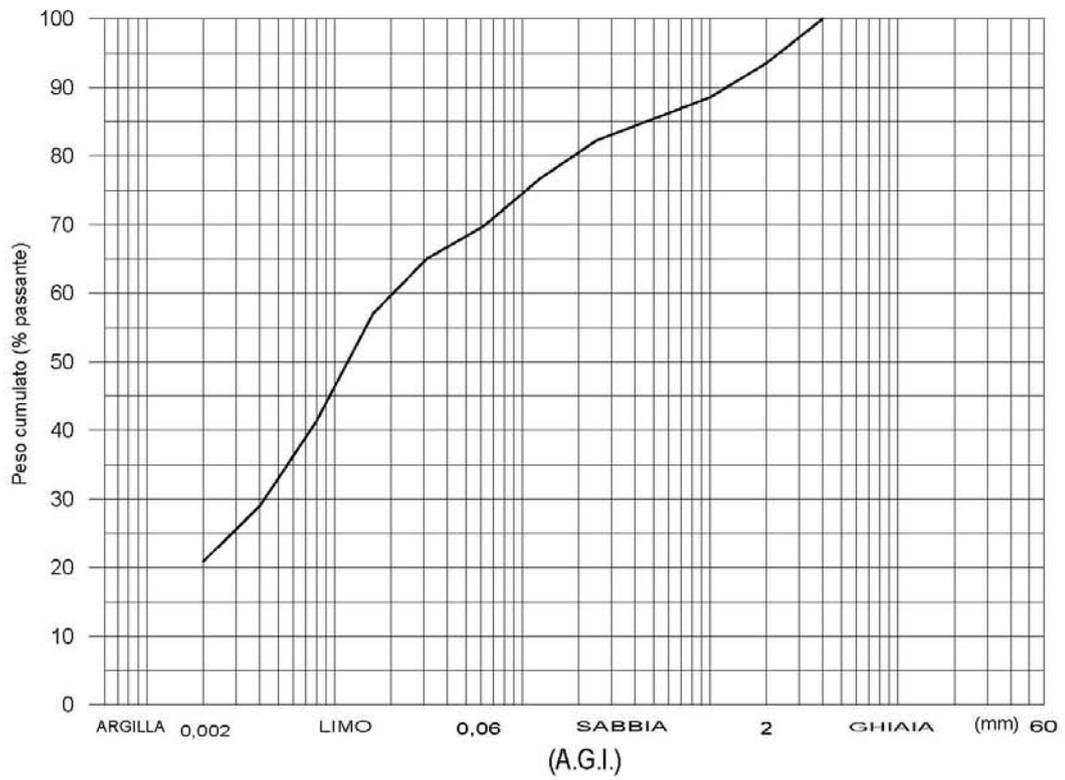
CAMPIONE: C8-4



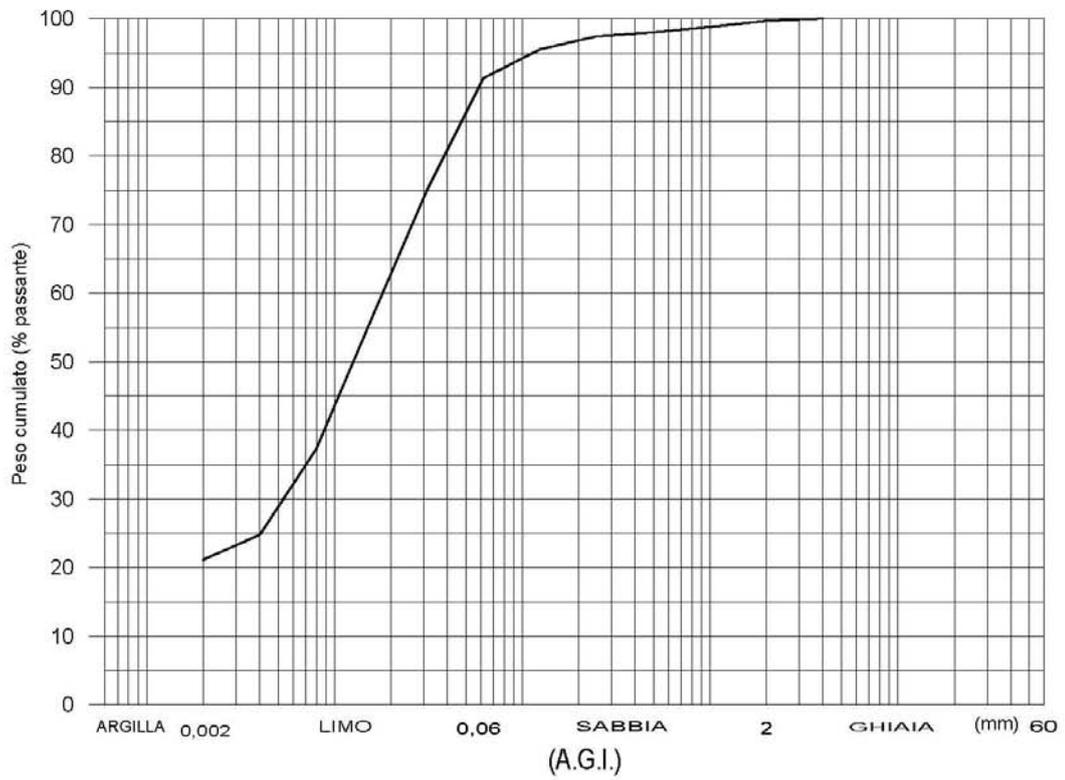
CAMPIONE: C8-5



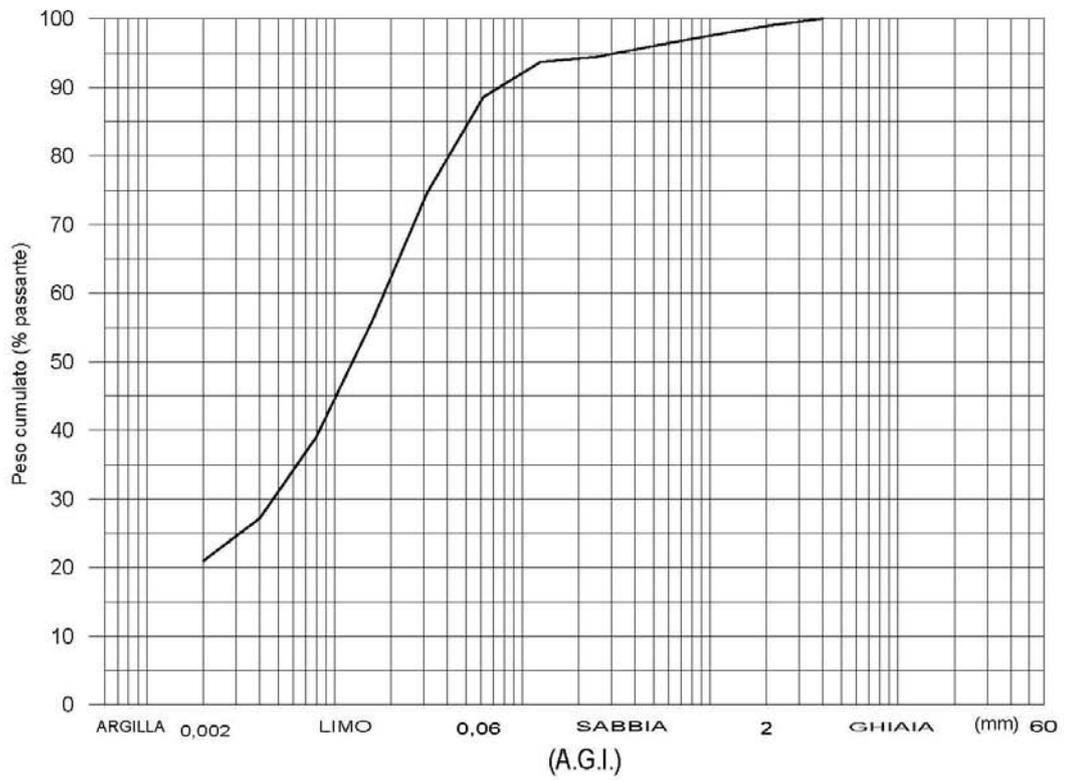
CAMPIONE: C8-6



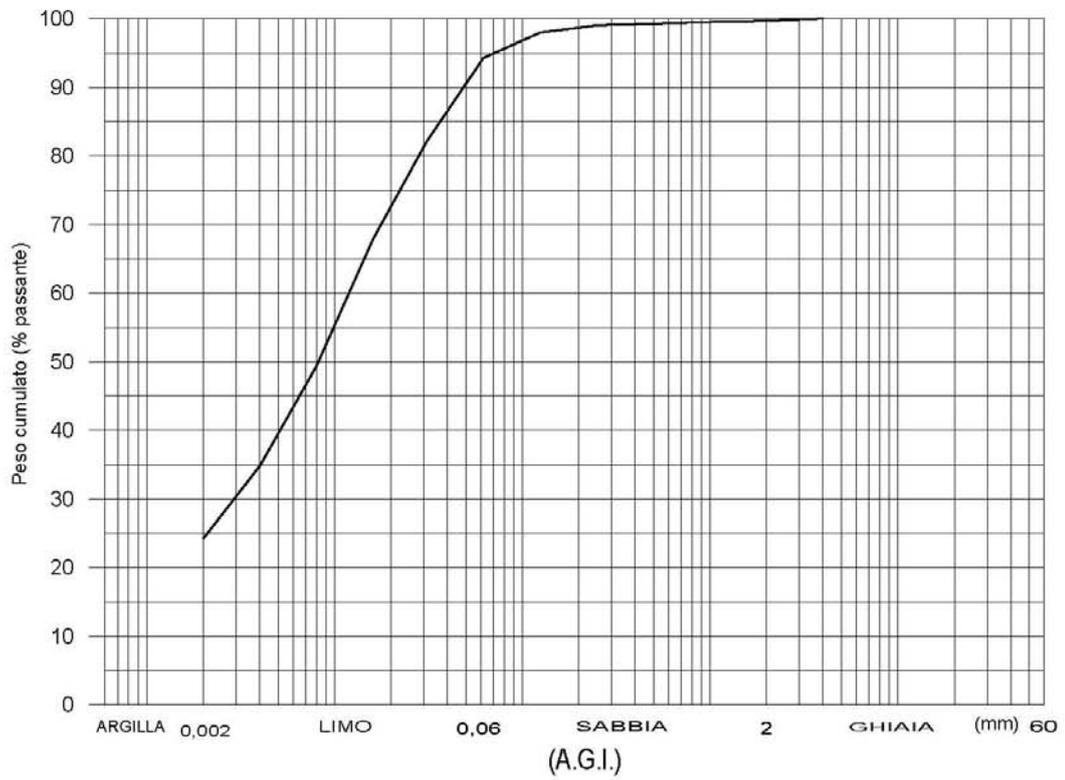
CAMPIONE: C8-7



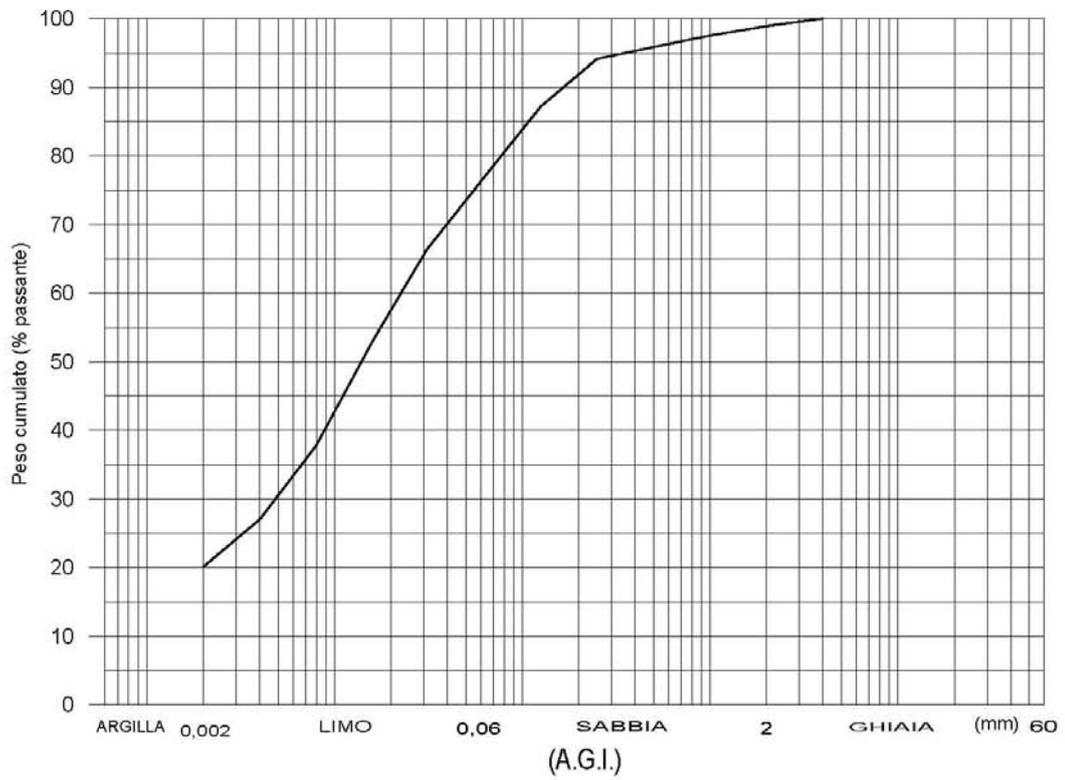
CAMPIONE: C8-8



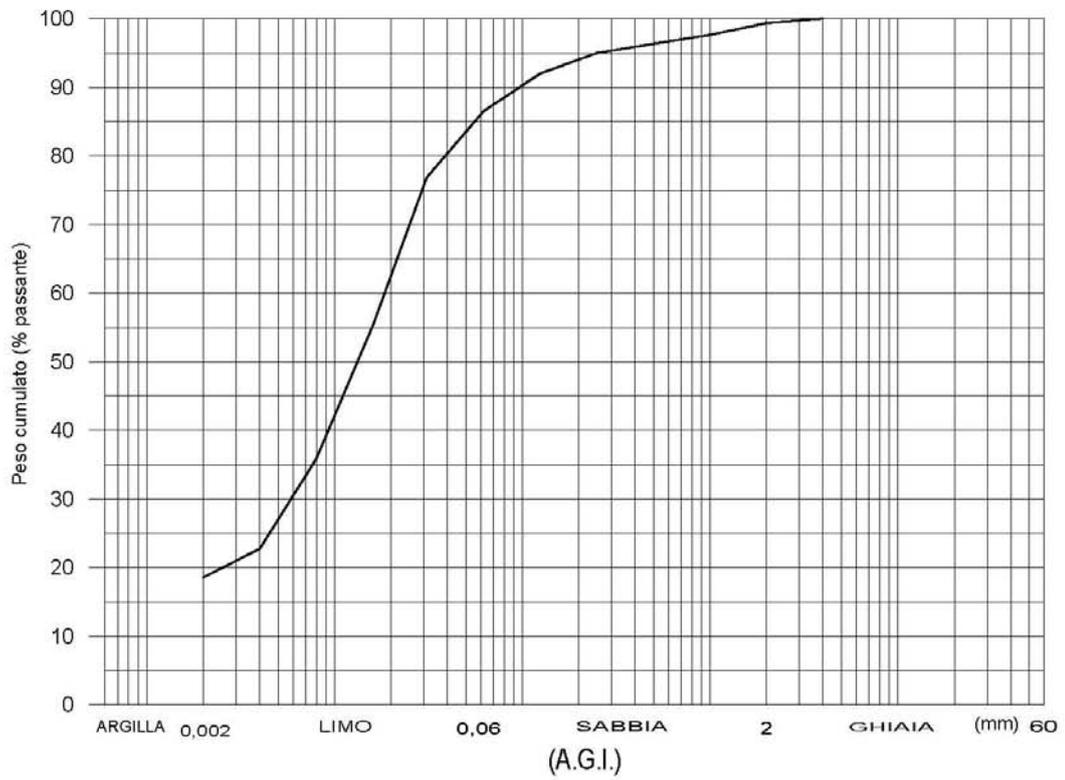
CAMPIONE: C8-9



CAMPIONE: C8-10



CAMPIONE: C8-11



ALLEGATO 5

DATAZIONI RADIOMETRICHE



UNIVERSITÀ
DEL SALENTO

Dipartimento di Ingegneria dell'Innovazione



Centro di Datazione e Diagnostica

Rif.CEDAD: 2011_0178

OGGETTO: Risultati delle datazioni con il radiocarbonio.

I campioni indicati in Tabella 1 sono stati sottoposti a datazione con il metodo del radiocarbonio mediante la tecnica della spettrometria di massa ad alta risoluzione (AMS), presso il Centro di Datazione e Diagnostica (CEDAD) dell'Università del Salento.

Codice	Codice CeDaD	Provenienza
SF2, A	LTL6182A	
SF2, B	LTL6182B	
SF1, A	LTL6183A	
SF1, B	LTL6183B	

TABELLA 1. ELENCO DEL MATERIALE ANALIZZATO E RELATIVO CODICE IDENTIFICATIVO.

I macrocontaminanti presenti nei campioni, sono stati individuati mediante osservazione al microscopio ottico e rimossi meccanicamente.

Il trattamento chimico di rimozione delle contaminazioni dal campione è stato effettuato sottoponendo il materiale selezionato ad attacchi chimici alternati acido-alcalino-acido.

Il materiale estratto è stato successivamente convertito in anidride carbonica mediante acidificazione, e quindi in grafite mediante riduzione. Si è utilizzato H₂ come elemento riducente e polvere di ferro come catalizzatore.

La quantità di grafite estratta dai campioni è risultata sufficiente per una accurata determinazione sperimentale dell'età.

CEDAD - Centro di Datazione e Diagnostica
Dipartimento di Ingegneria dell'Innovazione, Università del Salento
c/o Cittadella della Ricerca, S.S. 7 per Mesagne, Km. 7 +300, 72100 Brindisi
Tel. +39 0832 295050 FAX +39 0832 295058
e-mail: info-cedad@unile.it
web: www.cedad.unile.it



**UNIVERSITÀ
DEL SALENTO**

Dipartimento di Ingegneria dell'Innovazione



CEntro di DATazione e Diagnostica

La concentrazione di radiocarbonio è stata determinata confrontando i valori misurati delle correnti di ^{12}C e ^{13}C , e i conteggi di ^{14}C con i valori ottenuti da campioni standard di Saccarosio C6 forniti dalla IAEA.

La datazione convenzionale al radiocarbonio è stata corretta per gli effetti di frazionamento isotopico sia mediante la misura del termine $\delta^{13}\text{C}$ effettuata direttamente con l'acceleratore, sia per il fondo della misura.

Campioni di concentrazione nota di Acido Ossalico forniti dalla NIST (National Institute of Standard and Technology) sono stati utilizzati come controllo della qualità dei risultati. Per la determinazione dell'errore sperimentale nella data al radiocarbonio è stato tenuto conto sia dello scattering dei dati intorno al valore medio, sia dell'errore statistico derivante dal conteggio del ^{14}C .

La Tabella 2 riporta la datazione al radiocarbonio (non calibrata) per i campioni con l'indicazione dell'errore assoluto della misura.

<i>Campione</i>	<i>Radiocarbon Age (BP)(*)</i>	<i>$\delta^{13}\text{C}$ (‰)</i>	<i>Note</i>
LTL6182A	442 ± 45	+2.6 ± 0.4	
LTL6182B	504 ± 45	+2.9 ± 0.3	
LTL6183A	3632 ± 45	+8.7 ± 0.5	
LTL6183B	3690 ± 45	+ 11.4 ± 0.2	

TABELLA 2. VALORE MISURATO DELLA RADIOCARBON AGE.

(*) Con BP si intende qui una datazione convenzionale al radiocarbonio non calibrata il cui calcolo implica (cfr. M. Stuiver, H.A. Polach, Radiocarbon, Vol. 19, No.3, 1977, 355-363):

- L'uso del tempo di dimezzamento di Libby (5568 anni) rispetto al valore corretto di 5730 anni;
- L'anno 1950 come anno di riferimento.
- L'utilizzo diretto o indiretto dell'acido ossalico come standard di riferimento.

(**) Vengono convenzionalmente indicati come "Moderni" i campioni con una datazione convenzionale al radiocarbonio minore di 200 anni BP.

CEDAD - CEntro di DATazione e Diagnostica
Dipartimento di Ingegneria dell'Innovazione, Università del Salento
c/o Cittadella della Ricerca, S.S. 7 per Mesagne, Km. 7 +300, 72100 Brindisi
Tel. +39 0832 295050 FAX +39 0832 295058
e-mail: info-cedad@unile.it
web: www.cedad.unile.it



UNIVERSITÀ
DEL SALENTO

Dipartimento di Ingegneria dell'Innovazione



CEntro di DATazione e Diagnostica

La datazione al radiocarbonio per i campioni è stata quindi calibrata in età di calendario utilizzando il software OxCal Ver. 3.10 basato su dati marini (MARINE04) [Reimer PJ, et al. 2004 *Radiocarbon* 46:1029-1058] ed un valore del termine $\Delta R=58\pm 85$ yrs come valore medio per il mar Mediterraneo . Il risultato della calibrazione è riportato nei grafici e nelle Tabelle seguenti.

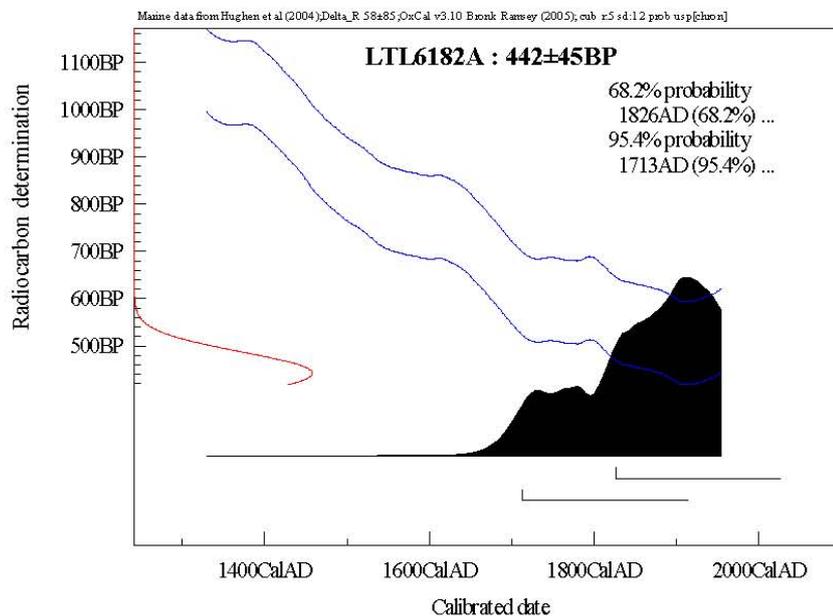


Figura 1. Calibrazione della data convenzionale al radiocarbonio del campione LTL6182A

CEDAD - CEntro di DATazione e Diagnostica
Dipartimento di Ingegneria dell'Innovazione, Università del Salento
c/o Cittadella della Ricerca, S.S. 7 per Mesagne, Km. 7 +300, 72100 Brindisi
Tel. +39 0832 295050 FAX +39 0832 295058
e-mail: info-cedad@unile.it
web: www.cedad.unile.it



**UNIVERSITÀ
DEL SALENTO**

Dipartimento di Ingegneria dell'Innovazione



CEntro di DATazione e Diagnostica

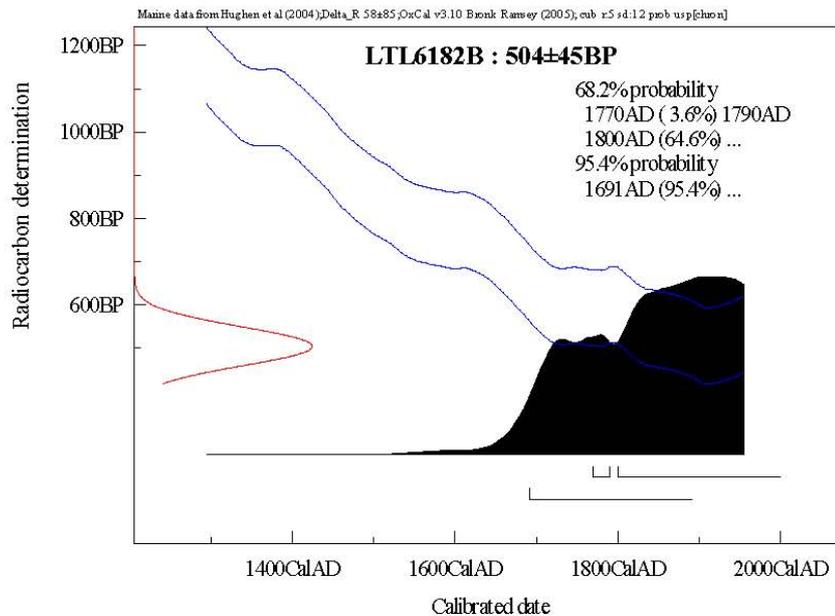


Figura 2. Calibrazione della data convenzionale al radiocarbonio del campione LTL6182B

CEDAD - CEntro di DATazione e Diagnostica
Dipartimento di Ingegneria dell'Innovazione, Università del Salento
c/o Cittadella della Ricerca, S.S. 7 per Mesagne, Km. 7 +300, 72100 Brindisi
Tel. +39 0832 295050 FAX +39 0832 295058
e-mail: info-cedad@unile.it
web: www.chedad.unile.it



UNIVERSITÀ
DEL SALENTO

Dipartimento di Ingegneria dell'Innovazione



Centro di DATazione e Diagnostica

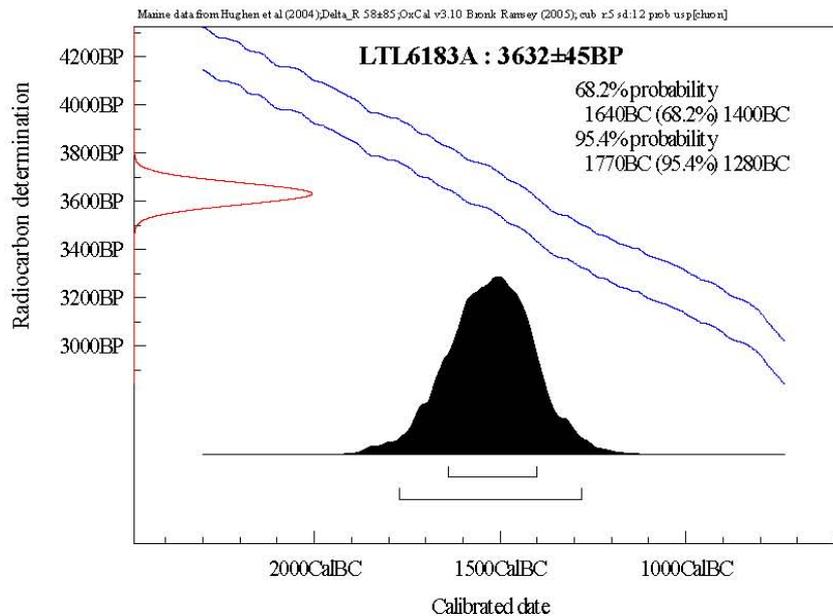


Figura 3. Calibrazione della data convenzionale al radiocarbonio del campione LTL6183A

CEDAD - Centro di DATazione e Diagnostica
Dipartimento di Ingegneria dell'Innovazione, Università del Salento
c/o Cittadella della Ricerca, S.S. 7 per Mesagne, Km. 7 +300, 72100 Brindisi
Tel. +39 0832 295050 FAX +39 0832 295058
e-mail: info-cedad@unile.it
web: www.cedad.unile.it



**UNIVERSITÀ
DEL SALENTO**



Dipartimento di Ingegneria dell'Innovazione

CEntro di DATazione e Diagnostica

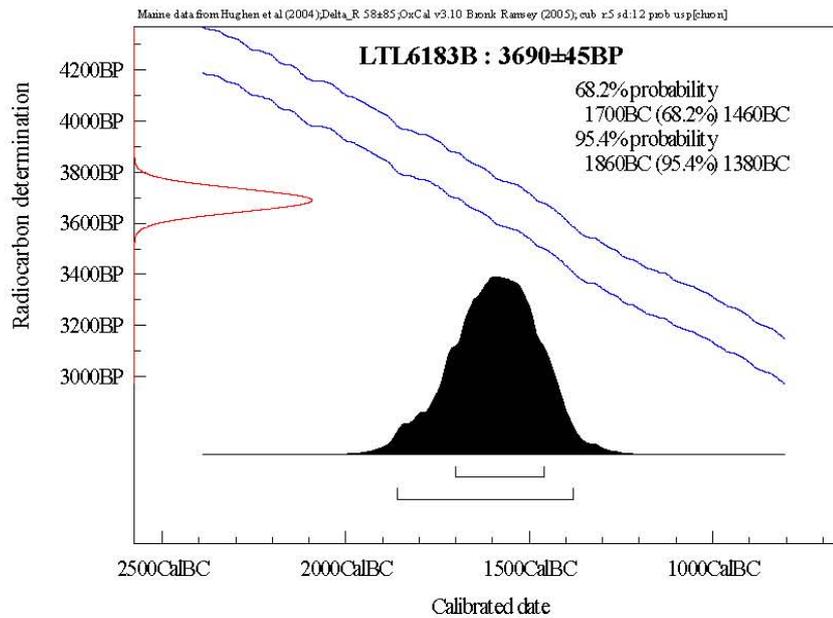


Figura 4. Calibrazione della data convenzionale al radiocarbonio del campione LTL6183B

CODICE CEDAD	CAMPIONE	DATAZIONE CALIBRATA (LIVELLO DI CONFIDENZA 2σ)
LTL6182A	SF2, A	1713AD (95.4%) 1950AD
LTL6182B	SF2, B	1691AD (95.4%) 1950AD
LTL6183A	SF1, A	1770BC (95.4%) 1280BC
LTL6183B	SF1, B	1860BC (95.4%) 1380BC

TABELLA 3. Riepilogo delle datazioni calibrate per i campioni.

CEDAD - CEntro di DATazione e Diagnostica
Dipartimento di Ingegneria dell'Innovazione, Università del Salento
c/o Cittadella della Ricerca, S.S. 7 per Mesagne, Km. 7 +300, 72100 Brindisi
Tel. +39 0832 295050 FAX +39 0832 295058
e-mail: info-cedad@unile.it
web: www.cedad.unile.it

ALLEGATO 6

REPORT FOTOGRAFICO

SITO 1



SITO 2



SITO 3



SITO 4



SITO 5



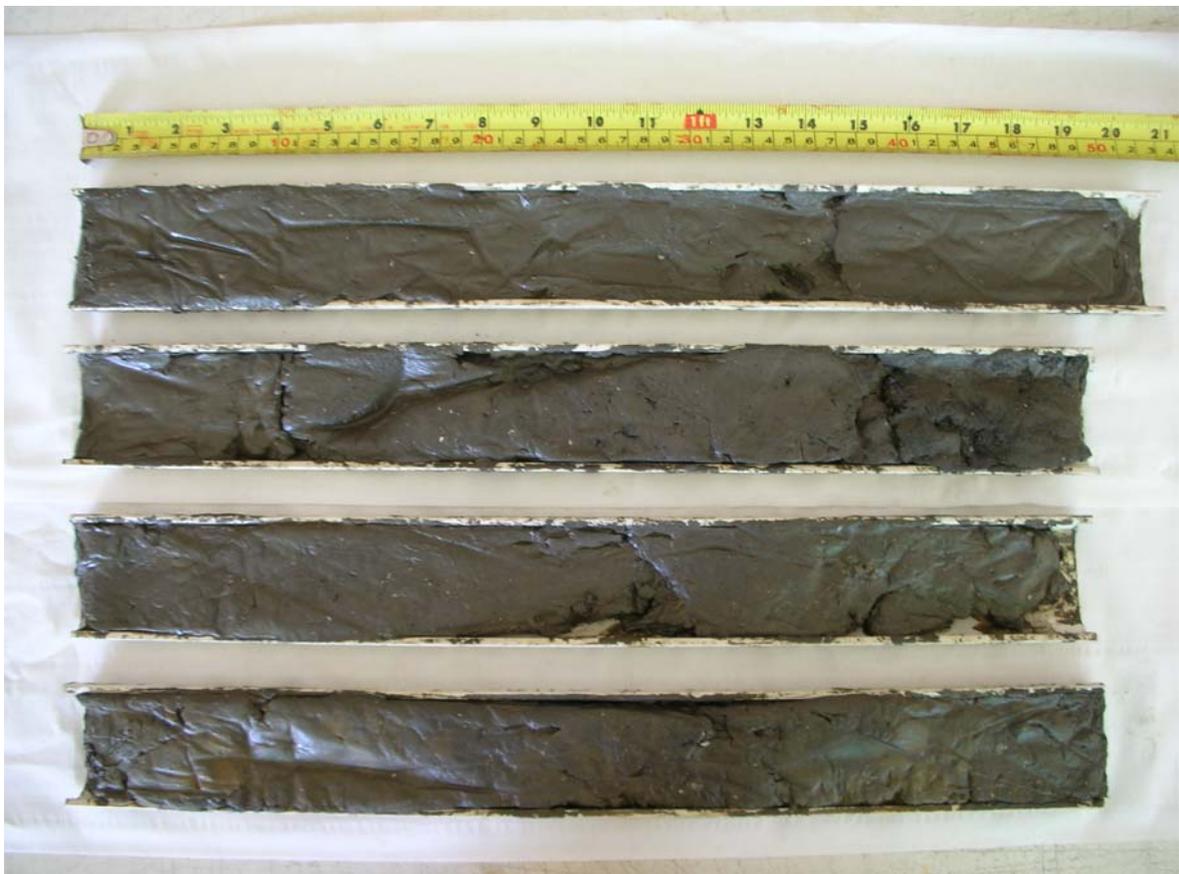
SITO 6



SITO 7



SITO 8



SITO RITROVAMENTO BLOCCHI

