



REGIONE SICILIANA

Assessorato Beni Culturali ed Ambientali  
e Pubblica Istruzione

Dipartimento Beni Culturali ed Ambientali  
ed Educazione Permanente

Centro Regionale per la Progettazione  
ed il Restauro

# Il Teatro greco-romano di Taormina

*Progetto pilota*

Analisi, studi ed indagini  
*Prima fase*

*I teatri antichi sono un ricchissimo patrimonio culturale diffuso in Sicilia ed in molte altre regioni, che in larga parte si affacciano sul Mediterraneo.*

*Sono edifici archeologici ancora vivi perché si ripropongono nei loro palcoscenici le tragedie e commedie greche e romane, contribuendo a riconoscere una identità culturale comune ed a promuovere un dialogo di pace. Occorre perciò mantenere l'utilizzo di questi spazi proponendo accanto al repertorio classico anche eventi teatrali e musicali moderni; ma occorre anche che si fissino criteri e limiti di sostenibilità della loro fruizione.*

*Nei paesaggi che attraversano i teatri antichi tracciano trame culturali, ma dai paesaggi subiscono gli attacchi nocivi indotti dalla realtà ambientale e dall'azione dell'uomo; è necessaria una conservazione programmata che mitighi vulnerabilità e pericolosità, e definisca criteri efficaci di gestione e fruizione.*

*Una Carta del Rischio dei teatri antichi siciliani permetterà di valutare le dinamiche dei processi di degrado, in relazione agli attacchi naturali ed antropici, e di verificare la correttezza dei sistemi di intervento proposti, contribuendo a migliorare l'offerta turistico culturale e promuovere lo sviluppo locale.*



REGIONE SICILIANA

Assessorato Beni Culturali ed Ambientali e della Pubblica Istruzione  
Dipartimento Beni Culturali ed Ambientali ed Educazione Permanente  
Centro Regionale per la Progettazione e il Restauro  
Palermo



CARTA DEL RISCHIO DEL PATRIMONIO CULTURALE  
ED AMBIENTALE DELLA REGIONE SICILIANA

# Il Teatro greco-romano di Taormina

*Progetto pilota*

Analisi, studi ed indagini  
*Prima fase*



*P.O.R. Sicilia 2000-2006 Asse II Misura 2.02 Azione B*

CARTA DEL RISCHIO DEL PATRIMONIO CULTURALE  
ED AMBIENTALE DELLA REGIONE SICILIANA  
IL TEATRO GRECO-ROMANO DI TAORMINA  
PROGETTO PILOTA

Copyright ©2004 Regione Siciliana  
Assessorato dei Beni Culturali ed Ambientali e della Pubblica Istruzione  
Dipartimento Beni Culturali ed Ambientali ed Educazione Permanente-  
Centro Regionale per la Progettazione e il Restauro  
e per le scienze naturali ed applicate ai Beni Culturali  
[www.regione.sicilia/benicult/centrorestauro.it](http://www.regione.sicilia/benicult/centrorestauro.it)

Carta del rischio del patrimonio culturale  
ed Ambientale della Regione Siciliana  
Il Teatro greco-romano di Taormina  
Progetto pilota

Il Teatro greco-romano di Taormina : progetto pilota : analisi, studi ed indagini : prima fase. - Palermo : Regione siciliana, Assessorato dei beni culturali ed ambientali e della pubblica istruzione, Dipartimento dei beni culturali e ambientali e dell'educazione permanente, 2004.

1. Taormina - Teatro greco-romano - Conservazione.  
725.827094581127 CDD-20

*CIP - Biblioteca centrale della Regione siciliana "Alberto Bombace"*

*Coordinamento*  
Guido Meli

*Referente Progetto Carta del Rischio*  
Roberto Garufi

*Referente per le collaborazioni scientifiche*  
G. Maria Spanò

*Redazione*  
Elena Lentini

*Collaborazione grafica*  
Giacchino Mangano

*Cura editoriale*  
Enzo Brai

*Stampa, legatura e impaginazione*  
Officine Tipografiche Aiello & Provenzano, Bagheria (Palermo)

Stampa su concessione della Regione Siciliana  
Assessorato Regionale BB.CC.AA. e P.I.  
Centro Regionale per la Progettazione e il Restauro  
e per le scienze naturali ed applicate ai Beni Culturali  
Palermo

Omaggio - Edizione fuori commercio - Vietata la vendita

## Premessa

*Le azioni intraprese dalla Regione Sicilia negli ultimi anni, nel campo della gestione e valorizzazione del patrimonio artistico-culturale, mettono palesemente in evidenza la tendenza ad esercitare un ruolo di ente di governo vero e proprio, in grado di pianificare e focalizzare le risorse su obiettivi specifici.*

*Affinché questo tipo di processo possa pienamente concretizzarsi mancano ancora oggi gli strumenti fondamentali di supporto alla definizione degli interventi, con i dati di base adeguatamente strutturati.*

*In questa prospettiva la "Carta del Rischio" rappresenta uno strumento idoneo per la definizione delle scelte di pianificazione, tutela e programmazione degli interventi. Nello specifico, essa analizza il patrimonio architettonico - monumentale nelle sue relazioni con il territorio, con un approccio che attribuisce loro il significato di insieme inscindibile.*

*L'obiettivo è di valutare preventivamente il rischio di danni per i beni culturali, al fine di operare la prevenzione, anche attraverso il controllo dei fattori che possono agire negativamente con l'evoluzione conservativa delle strutture.*

*Con questo approccio viene sostanzialmente ribaltato il processo di intervento tradizionale "a danno avvenuto" (ex-post), a favore di una logica di prevenzione e cura (ex-ante), permettendo così una programmazione mirata, alla luce della valutazione della pericolosità territoriale e del rischio individuale attinente il bene monumentale.*

*Nell'ambito del Progetto "Carta del Rischio del Patrimonio Culturale ed Ambientale della Regione Siciliana", finanziato con Fondi Strutturali Comunitari, il Centro Regionale per la Progettazione ed il Restauro ha avviato un progetto pilota di Carta del Rischio locale sul Teatro Greco-Romano di Taormina, complesso monumentale comprendente il manufatto architettonico e l'ambiente naturale nel quale esso si inserisce.*

*L'obiettivo del progetto pilota è definire un prototipo di intervento per l'utilizzo sostenibile e per la piena fruibilità dello spazio teatrale antico, nonché contemperare le esigenze di piena efficienza della macchina teatrale con la necessità di non snaturare l'immagine storicizzata del monumento; dunque: "conservazione consapevole", "fruizione compatibile" e "manutenzione programmata".*

*Tra i contributi analitici di base alla Carta del Rischio rientra la valutazione della pericolosità "statico-strutturale" del bene monumentale, determinata dal complesso dei "fattori di pressione" che influiscono sullo stato di conservazione del Teatro, quali le caratteristiche morfologiche dei luoghi, geologiche e geotecniche dei terreni di fondazione e strutturali del manufatto, dalle quali dipendono le condizioni di stabilità dei pendii e il rischio sismico.*

*E', pertanto, evidente che per la definizione di interventi finalizzati alla "conservazione consapevole", alla "fruizione compatibile" e alla "manutenzione programmata" occorre preliminarmente valutare la vulnerabilità del complesso teatrale nei confronti dei fattori di rischio "naturale". A tale scopo è stato effettuato uno studio specifico di carattere geologico e geotecnico, basato su una campagna di indagini e rilievi in situ ed in laboratorio, i cui risultati vengono presentati in questo lavoro.*

## Presentazione

*Il Bene Culturale, eredità preziosa del passato, deve essere conservato e mantenuto perché le generazioni future possano goderne. Questa azione di conservazione e recupero di quanto è giunto fino a noi non può che essere il frutto di uno stretto rapporto di collaborazione tra mondo scientifico e quello della conservazione e non è pensabile poter raggiungere risultati soddisfacenti se vengono a mancare il confronto e la possibilità di verificare le soluzioni tecnologiche adottate. Ogni intervento sul Bene richiede infatti la conoscenza dei materiali e delle tecniche di lavorazione utilizzate che la Scienza moderna può aiutare a costruire in maniera rapida e non invasiva.*

*Il Centro Restauro, strutturato in Unità di Ricerca, Laboratori Scientifici e Laboratori di Restauro, ha un duplice obiettivo: stimolare l'uso di nuove metodologie di indagine a fini di maggiore conoscenza del Bene Culturale e, in caso di deterioramento dovuto agli effetti del tempo o a cause antropiche, eseguire le "diagnosi" e suggerire le "terapie" idonee al recupero e al restauro del bene indagato, attraverso l'apporto sinergico delle Unità Operative dell'Istituto ed in collaborazione con Istituti di Ricerca Universitari, mediante l'attivazione di specifiche convenzioni.*

*Un approccio interdisciplinare consente di sviluppare studi e ricerche sui materiali costitutivi dei beni culturali, sugli agenti che ne causano il degrado, per giungere all'individuazione di metodologie sempre più efficaci per la diagnostica del degrado e la conservazione preventiva del patrimonio culturale. In tale contesto particolare rilevanza riveste lo studio del Teatro greco-romano di Taormina, oggetto di indagini effettuate sia con le tecniche classiche che con quelle più innovative, essenziali per una diagnosi preventiva dei processi di degrado, nonché campagne di monitoraggio, finalizzate ad approfondire la conoscenza dei principali rischi cui è sottoposto e a definire una metodologia di studio propedeutica ad un progetto di conservazione.*

*Gli ambiti di indagine, di cui in questo lavoro si presentano alcuni dei risultati preliminari, hanno riguardato: la caratterizzazione di materiali e malte; le analisi geodagnostiche, le analisi dei granuli pollinici e dei reperti di carbone microscopico, la caratterizzazione dei biodeteriogeni e della microflora algale e lichenica, la caratterizzazione delle specie di piante ruderali ed altre. Sulla base dei risultati delle diverse indagini si potrà individuare il percorso metodologico per la corretta conservazione e manutenzione del bene, guida, sotto il profilo diagnostico e conoscitivo, per altri interventi simili.*

G. MARIA SPANÒ  
Dirigente del Servizio Restauro C.R.P.R.

GUIDO MELI  
Direttore del Centro Regionale  
per la Progettazione e il Restauro

# La Carta del Rischio e il progetto pilota del Teatro Antico di Taormina

ROBERTO GARUFI

## INTERPRETAZIONE DELLA REALTÀ CONSERVATIVA

I teatri antichi, per la loro ubicazione all'aperto, costituiscono una gamma di architetture monumentali dove il naturale invecchiamento è particolarmente aggravato dall'azione combinata di fattori aggressivi presenti nel territorio di riferimento, riconducibili alla sfera statico strutturale (frane, valanghe, esondazioni, sisma, vulcanismo), ambientale (aerosol, inquinanti, vegetazione), o antropica (depressione e conseguente abbandono, pressione e quindi usura, vandalismi, furti, azioni belliche o di terrorismo). Questi fattori, combinati con la suscettibilità al danno del singolo edificio (la vetustà delle murature ma anche le trasformazioni o gli utilizzi impropri), si manifestano in un'estrema varietà di caratteristiche ed intensità, rendendo molto complessa l'esatta valutazione dei rischi e, di conseguenza, la scelta più opportuna delle tecniche di conservazione e di profilassi.

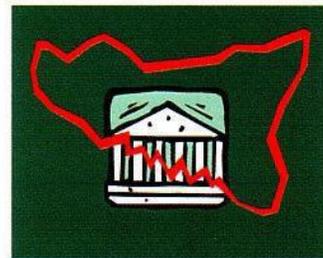
Il riordino e la condivisione della conoscenza dei materiali costitutivi e delle tecniche di lavorazione devono costituire la base della programmazione di questa attività conservativa per la definizione dei criteri opportuni di gestione di un teatro antico; una conoscenza che non può prescindere dalla comprensione delle dinamiche dei processi di degrado in relazione agli attacchi naturali ed antropici, e dalla valutazione della correttezza ed efficacia dei sistemi di intervento usualmente impiegati.

L'esperienza sul tema, sviluppata negli ultimi decenni nell'ambito nazionale, ha individuato nella *Carta del Rischio* lo strumento idoneo per osservare e valutare questi meccanismi di interazione, e per definire le strategie opportune di conservazione e gestione.

## IL PROGETTO REGIONALE DI CARTA DEL RISCHIO

È per questo scopo che il Centro Regionale per la Progettazione ed il Restauro sta sviluppando la *Carta del Rischio del Patrimonio Culturale ed Ambientale della Regione Siciliana*: un progetto finanziato dai fondi strutturali comunitari del Programma di

Sviluppo del Mezzogiorno 2000-2006 che integra, aggiorna e riconduce alla specificità del territorio isolano la *Carta del Rischio Nazionale*, realizzata dall'Istituto Centrale per il Restauro.



In questo strumento numerose cartografie tematiche registrano la consistenza e la distribuzione territoriale del patrimonio monumentale architettonico ed archeologico, descrivendo le diverse caratteristiche ed intensità dei fattori di pericolosità. Le informazioni così acquisite sono relazionate ai dati della schedatura conservativa del patrimonio, per valutarne la vulnerabilità.

A questo proposito per il Teatro antico di Taormina è stato previsto l'utilizzo della scheda **MA**, relativa ai monumenti ed ai complessi archeologici, integrata dalla registrazione dei processi di degrado che interessano gli apparati decorativi in relazione ai materiali costitutivi, utilizzando la scheda **RA** (Pavimenti, rivestimenti parietali, decorazioni e materiali lapidei archeologici). La conoscenza è ulteriormente approfondita utilizzando la scheda **AN** (Pericolosità antropica ed esposizione dei beni), per valutare l'efficacia dei sistemi di vigilanza e di controllo in relazione ai flussi turistico-culturali ed ai danneggiamenti e furti subiti nel tempo.

Il sistema di indagine di Carta del Rischio utilizza gli strumenti informatici sia nelle cartografie informatizzate a layers sovrapposti, che nella redazione delle schedature di vulnerabilità, che nei database testuali e iconografici che organizzano e gestiscono le diverse informazioni. In tal modo è favorita una costante aggiornabilità ed integrazione delle informazioni ed è possibile attivare meccanismi complessi di interazione tra i dati, per proporre osservazioni e valutazioni efficaci delle relazioni intessute dai diversi fattori.

Il progetto regionale di Carta del Rischio prevede uno sviluppo sperimentale della ricerca che verifica efficacia e applicabilità del modello di indagine e di valutazione approfondendo la scala di osservazione; e per far questo, tra le esperienze pilota già avviate, sta analizzando l'ambito territoriale comprendente i terri-

tori comunali di Taormina, Giardini Naxos e Castelmola.

## IL PROGETTO PILOTA DEL TEATRO ANTICO DI TAORMINA

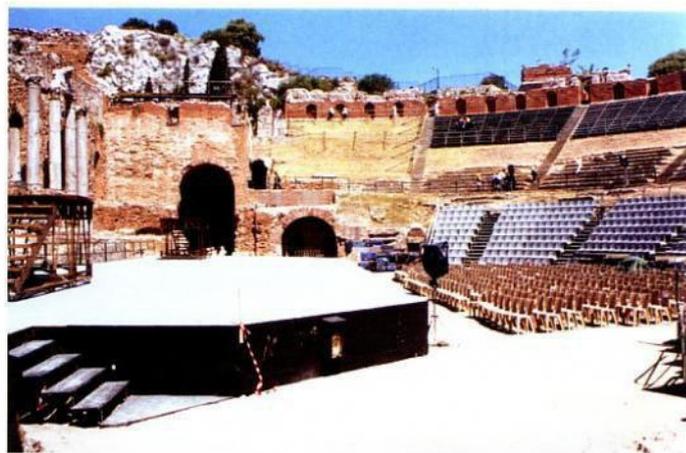
A completare le tappe di studio ed osservazione della realtà conservativa del patrimonio monumentale siciliano la Carta del Rischio regionale ha promosso, ed in alcuni casi già avviato, un piano di progetti pilota che, alla scala puntuale dell'edificio monumentale, affrontano tematiche centrali per la conservazione delle architetture monumentali. Il piano di ricerca sviluppa un programma sperimentale di organizzazione e gestione dei dati conoscitivi, delle indagini e attività di monitoraggio, delle valutazioni del rischio, applicando questa metodica ai seguenti edifici:

- la Chiesa di S. Antonio a Poggioreale vecchia per valutare la compatibilità tra le tradizionali tecniche di conservazione e la mitigazione del rischio sismico, alla luce delle normative specifiche di settore;
- la Galleria Regionale di Palazzo Abatellis a Palermo e il Palazzo Corvaja a Taormina per analizzare il problema del rischio del patrimonio artistico collocato in ambienti confinati, contribuendo in tal modo a sviluppare un itinerario di ricerca sperimentale rispetto al modello di indagine nazionale della Carta del Rischio, che restringe il campo di attenzione al patrimonio monumentale architettonico e archeologico;
- la Biblioteca di S. Agostino a Taormina per applicare una tecnica sperimentale di deacidificazione a libro chiuso di patrimonio librario antico e per definire i criteri di fruizione sostenibile di una biblioteca;
- il Teatro antico di Taormina per armonizzare esigenze conservative e di fruizione archeologica con l'efficienza della macchina teatrale, ed individuare criteri oggettivi di sostenibilità dell'utilizzo teatrale.

Il tema del teatro antico è denso di spunti significativi di ricerca: nella sua realtà di teatro all'aperto, è infatti sottoposto alle aggressioni ambientali e risulta particolarmente sensibile alle dinamiche dei terreni su cui si fonda; contestualmente rappresenta un'eccezione nel panorama archeologico per il permanere dell'uso cui era destinato fin dalle fasi di costruzione.

All'interno di queste problematiche, in apparenza conflittuali, si colloca il progetto pilota relativo al Teatro antico di Taormina, articolato in due temi generali, al cui interno si sviluppano le diverse attività di studio:

- organizzazione e gestione delle conoscenze, dei dati informativi, delle esperienze di intervento;
- codifica ed applicazione sperimentale di una metodologia di osservazione della realtà conservativa dell'edificio;
- individuazione di criteri e strumenti efficaci di fruizione e gestione del teatro, da estendere all'intero patrimonio teatrale siciliano.



### 1. Organizzare e gestire conoscenze ed esperienze

Il progetto regionale di Carta del Rischio prevede un ulteriore sviluppo sperimentale rispetto al modello nazionale, realizzando la stesura di una Carta del Rischio tematica, specificatamente dedicata alle architetture teatrali antiche presenti nell'isola; con l'obiettivo di costruire strumenti efficaci per osservare e interpretare correttamente le loro dinamiche conservative ed i processi d'intervento, che hanno interessato questi edifici e i relativi contesti ambientali.

In questa carta tematica i dati di conoscenza vengono organizzati in relazione alle specificità conservative e delle dinamiche di degrado che caratterizzano questo patrimonio: tra gli altri, la collocazione in aree ad elevata pericolosità sismica abbinata alla realtà ruderale dell'edificio teatrale (rischio statico strutturale), la contiguità a camini industriali o a centri abitati interessati da traffico veicolare intenso (rischio ambientale) l'incidenza dello stato di abbandono o l'assenza di piani specifici di manutenzione dell'area archeologica di riferimento (rischio antropico).

L'osservazione e valutazione dei principali fattori di rischio dovrà popolare la banca dati tematica dedicata alle architetture teatrali antiche della Sicilia, desumendo da schedature, testi, documenti scritti e iconografici le informazioni sui materiali costitutivi, tecniche costruttive, apparati decorativi, diverse componenti delle macchine teatrali, entità e ruolo assunto dai fattori di pericolosità nella definizione dei processi di degrado, modifiche, interventi di restauro e prassi manutentive.



## 2. Costruire un percorso codificato di conoscenza e interpretazione

Il Progetto Pilota del Teatro antico di Taormina basa lo sviluppo delle sue tappe di indagine a partire dal rilievo del monumento e delle aree circostanti, condotto con metodologia a scansione laser tridimensionale; la conoscenza diretta dell'edificio, condotta sul campo per riconoscere ed interpretare logiche costruttive e dinamiche di trasformazioni invecchiamenti e degradi, è integrata dalla sistematizzazione delle documentazioni storiche, testuali ed iconografiche, realizzando un regesto delle tappe della costruzione e delle trasformazioni, in relazione al mutare dei tipi di rappresentazione.

Lo sviluppo delle successive fasi di indagine segue la metodologia di osservazione della Carta del Rischio e codifica un percorso di osservazione che, verificatane l'efficacia, verrà esteso alla realtà complessiva dei teatri antichi siciliani.

Alla valutazione del *rischio statico strutturale* contribuiscono i risultati di :

- studi geostrutturali, geomorfologici e geomeccanici, per interpretare il contesto ambientale ed i terreni di fondazione del teatro;
- lettura incrociata della topografia antica, dell'arqueo-

logia del paesaggio e delle dinamiche di ecostoria, per ricostruire i nessi intessuti dall'edificio con il suo paesaggio nelle fasi di fondazione e della sua trasformazione dall'età greca a quella romana imperiale;

- studi di paleobotanica, per ricostruire l'originaria configurazione arborea e arbustiva dei terreni e valutarne il ruolo in relazione alla stabilizzazione dei pendii;
- studi strutturali e di interpretazione del rischio sismico, concentrati sulla lettura delle specifiche pericolosità dell'area di insediamento e sull'interpretazione della vulnerabilità dell'edificio per individuare le aree di criticità con particolare riguardo all'edificio scenico.

Per la valutazione del *rischio ambientale* sono previsti:

- monitoraggi microclimatici ed ambientali (orienta-

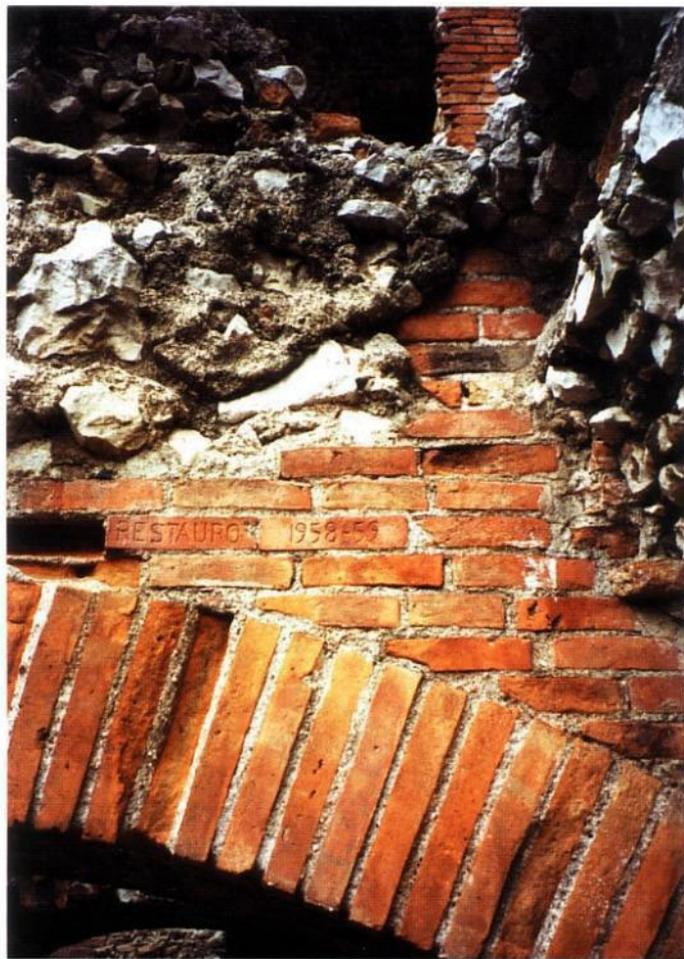


mento geografico, temperatura, umidità relativa e specifica, radiazione solare, ghiaccio, intensità e direzione del vento, precipitazioni);

- studi biologici e microbiologici, con particolare riguardo alle piante infestanti ed alle patine, sovrapposte a capitelli e frammenti erratici di colonne, costituite da alghe, cianobatteri, licheni e materiale inorganico.

Relativamente al *rischio antropico* l'osservazione si concentra su:

- le vicende dei restauri, verificandone correttezza ed efficacia e osservandone l'impatto fisico sulle muraure storiche delle trasformazioni operate e degli utilizzi impropri;
- il rischio da usura, che nella realtà dei teatri antichi ha un ruolo particolarmente significativo, perché legato alla fruizione turistica dell'edificio o allo svol-



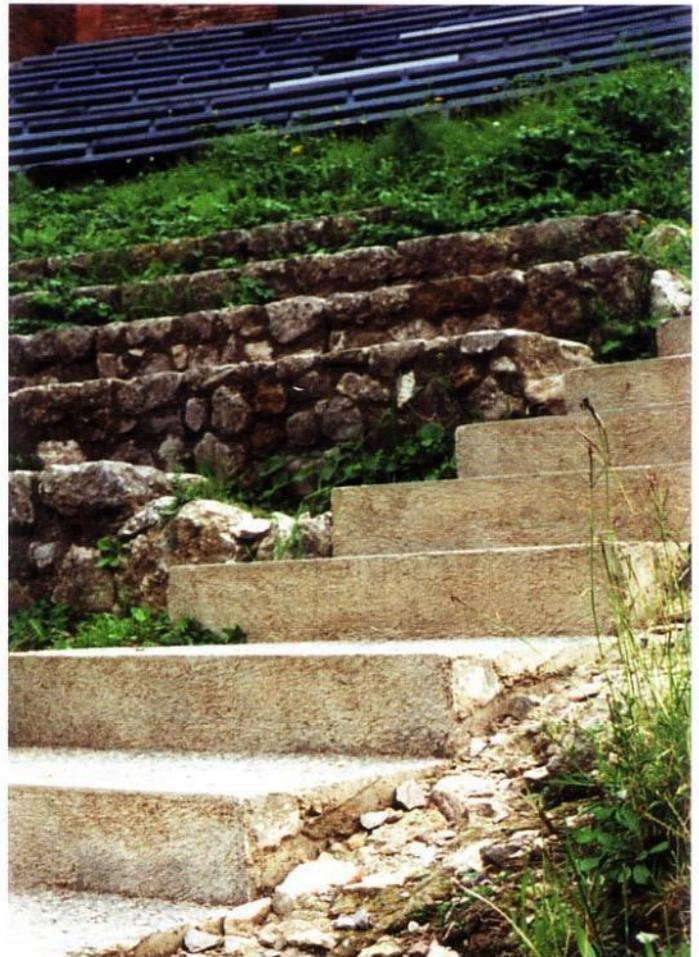
gimento di attività teatrali; la frequentazione eccessiva può infatti spezzare i delicati equilibri dettati dalla vetustà dei materiali determinando danni da stress sulle fabbriche, leggibili nelle lente ma inesorabili modificazioni apportate alle murature, nei solchi e avvallamenti in corrispondenza delle aree di massima densità della fruizione e in grado di attivare o accelerare processi di degrado dei materiali costitutivi;

- l'incidenza sulla conservazione determinata dall'utilizzo teatrale, analizzando i flussi di visita al sito archeologico e di partecipazione a rappresentazioni teatrali ed eventi musicali, e realizzando una mappa dell'edificio che registra la presenza delle strutture, fisse e mobili, per la fruizione e degli impianti tecnologici. Un capitolo a sé è costituito dall'analisi vibrometrica per valutare l'interferenza delle onde sonore su alcune aree critiche dell'edificio.

### 3. Efficienza della macchina teatrale e fruizione sostenibile del monumento

Il progetto prevede un settore di ricerca, conseguente alle due prime fasi di indagine che ne costituiscono le indispensabili basi conoscitive, mirato specificatamente a verificare la possibilità di utilizzare un teatro antico per lo sviluppo di spettacolarizzazioni, definendo criteri e parametri di sostenibilità delle diverse componenti della macchina teatrale.

Occorre infatti raggiungere la piena efficienza della macchina teatrale innalzando, o recuperando, i livelli prestazionali con un intervento conservativo che salva-



guardi preliminarmente l'identità storico costruttiva del teatro; per far questo è interpretato il funzionamento della macchina teatrale valutando le molteplici com-

ponenti che contribuiscono all'utilizzo per attività teatrali del monumento: ricezione degli spettatori, acustica, illuminazione, macchine sceniche, accessi e percorsi, sistemi di sicurezza, canalizzazioni e displuvi.

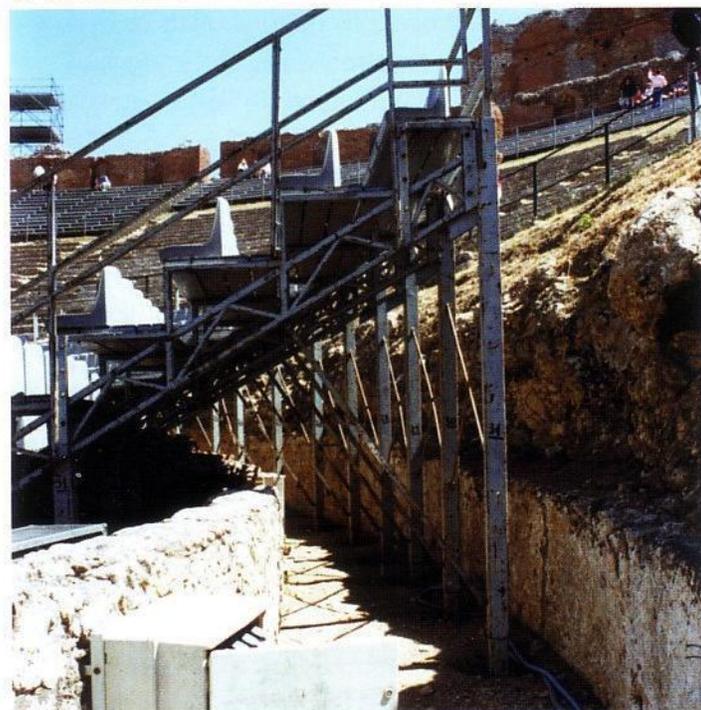
In collaborazione con istituzioni universitarie il progetto prevede la definizione di prototipi relativi ai dissuasori, transenne, ed elementi tecnologici finalizza-



ti alla migliore accessibilità da parte delle persone con ridotte capacità motorie o sensoriali.

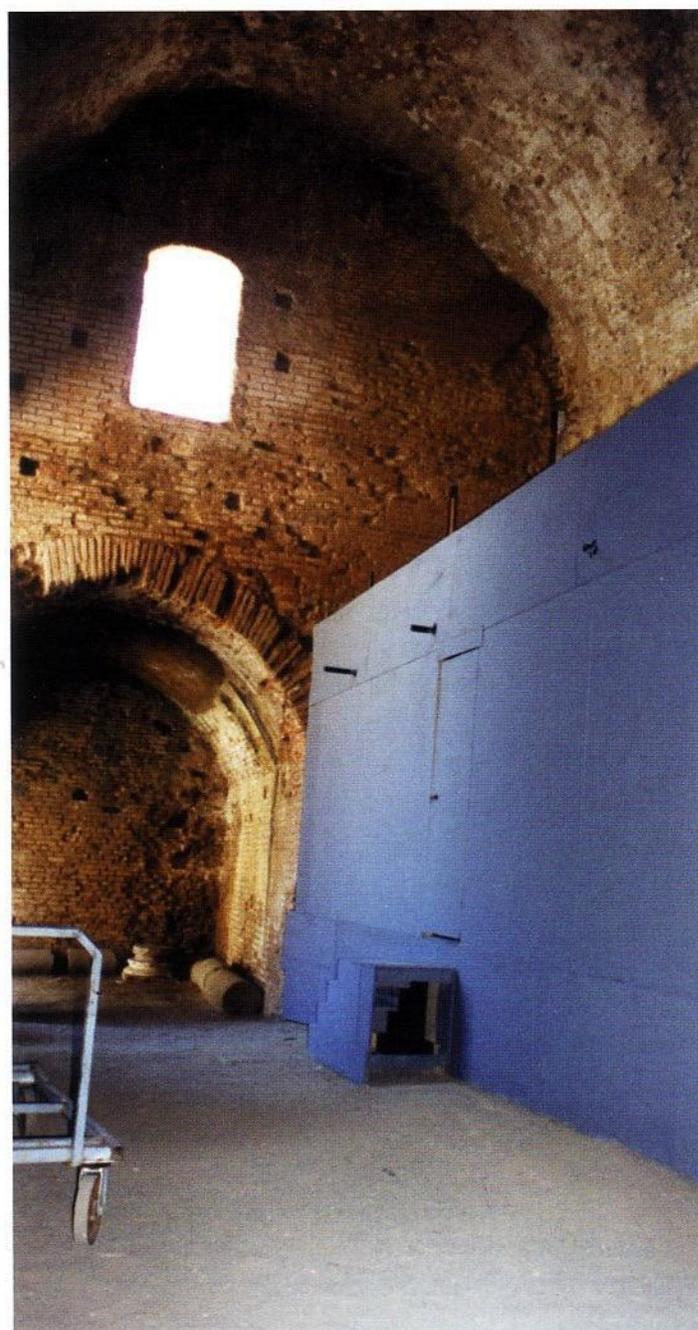
La prototipazione sarà rivolta anche alle integrazioni, da realizzare con struttura modulare, dei gradoni di seduta, delle scale, del palcoscenico, delle scenografie ad integrazione dell'apparato scenico; definendo i parametri di sostenibilità relativi ai carichi massimi sostenibili, al minimo impatto ed usura sulle murature storiche, alla necessità di contribuire con questi elementi reversibili al miglioramento della cassa acustica del teatro.

Un altro settore di studio rivolgerà l'attenzione sugli apparecchi illuminanti ed acustici e dei relativi sistemi di alimentazione e condotte di adduzione



Prevedendo l'estensione della fruizione dell'area in orari notturni, la definizione del prototipo sperimentale nella progettazione di illuminotecnica del sito dovrà accompagnare il visitatore nella lettura del contesto ambientale, nelle relazioni da questo intessute con l'edificio teatrale, nella sua articolazione e funzionamento. Un ruolo di servizio alla lettura che sottende a scelte tecniche ispirate all'efficienza tecnologica, rigore formale, minima invasività, corretta lettura di materiali costitutivi, spazialità architettoniche e parti scultoree. Un ruolo che, eccezionalmente e in aree puntuali e di particolare interesse dell'edificio come la scena, potrà divenire protagonista nel correggere l'attuale lettura ruderale di sue parti suggerendo l'integrazione virtuale delle lacune.

Un ultimo ambito di studio riguarderà l'offerta didattica divulgativa, individuando i criteri di duttilità alle esigenze dei diversi tipi di fruitori, minima invasi-





vità, durabilità, gradevolezza, efficienza tecnologica e agevole aggiornamento dei dati. Proponendo un'integrazione tra strumenti comunicativi tradizionali e scelte progettuali indirizzate verso soluzioni di ricostruzio-

ne virtuale delle originarie realtà, accompagnando i visitatori, con strumenti multimediali, nella lettura dell'edificio nelle sue trasformazioni e nei rapporti intessuti con il paesaggio.

*A cura di:*

Unità operativa Ricerca tecnico scientifica per i Beni Paesistici, Naturali, Naturalistici, Architettonici ed Urbanistici e della Carta del Rischio, del Centro Regionale Progettazione e Restauro

*Responsabile:* Roberto Garufi

# Ricerche bibliografiche ed archivistiche sui Teatri antichi di Sicilia

## Sintesi della ricerca

RITA DI NATALE

In occasione dell'anno 2004, proclamato dall'Assessorato BB.CC.AA. e P.I. anno dell'Archeologia, il Centro Restauro, nell'ambito dell'attività già da tempo avviata nel Progetto denominato "*Carta del Rischio del Patrimonio Culturale e Ambientale della Regione Siciliana*", ha intrapreso uno studio sulle strutture teatrali antiche di Sicilia, studio finalizzato alla stesura di protocolli di manutenzione programmata, mirati alla conservazione ed alla corretta fruizione dei teatri, sedi, se pur periodiche, di manifestazioni artistiche e culturali. Pertanto, a corredo degli studi effettuati, si è ritenuto opportuno integrare la ricerca con la compilazione di una bibliografia specialistica al fine di fornire agli studiosi del settore uno strumento di lavoro che possa rilevarsi utile per il funzionale reperimento degli scritti maggiormente rappresentativi e rilevanti sui teatri antichi di Sicilia.

Oggetto dell'indagine bibliografica sono stati i teatri di: Akrai (Palazzolo Acreide), Catania, Eloro, Eraclea Minoa, Monte Cavalli (Prizzi), Monte Iato, Morgantina, Segesta, Siracusa, Solunto, Taormina, Tindari.

Avendo delimitato il campo dell'indagine bibliografica soltanto agli studi aventi per oggetto i teatri greci o ispirati all'architettura greca in Sicilia, come criterio formale, per la scelta dei testi da segnalare, è stato scelto il livello analitico, per cui, oltre le opere monografiche sui teatri dell'Isola, la bibliografia comprende articoli desunti dallo spoglio di periodici specialistici, atti di convegni e di accademie, saggi contenuti nelle miscellanee, voci di enciclopedia, capitoli di opere generali, guide e diari. Anche la scelta delle Biblioteche da consultare è stata condizionata dalla disciplina trattata, pertanto, prioritariamente, sono state visionate le Biblioteche contenenti fondi archeologici, come quella del Museo Archeologico Regionale "*A. Salinas*" di Palermo, la Biblioteca di Archeologia della Facoltà di Lettere e Filosofia di Palermo, la Biblioteca della Fondazione Mormino del Banco di Sicilia di Palermo ed, in particolar modo, la Biblioteca dell'Istituto Archeologico Germanico di Roma, il cui patrimonio, costituito da circa 200.000 volumi e 1.895 riviste, riguardanti principalmente l'archeologia dei paesi mediterranei, ha permesso di incrementare notevolmente le informazioni bibliografiche.

Partendo dalle opere del Settecento e dell'Ottocento

di illustri archeologi siciliani, quali Ignazio Paternò Castello, principe di Biscari e Domenico Lo Faso Pietrasanta, duca di Serradifalco, la bibliografia retrospettiva ripercorre cronologicamente le tappe storiche degli studi sui teatri, includendo anche i testi relativi alle descrizioni degli edifici teatrali effettuate dai viaggiatori stranieri in Sicilia, quali lo scrittore ed incisore Dominique Vivant Denon, il pittore ed incisore Jean Houël, lo studioso Jacques Philippe d'Orville, le cui opere, corredate da numerose incisioni, hanno, sicuramente, contribuito alla diffusione della conoscenza all'estero dei monumenti antichi più significativi dell'Isola. Per quanto riguarda la bibliografia corrente, particolare attenzione è stata rivolta alle pubblicazioni più recenti di archeologi italiani e stranieri, quali Paola Ciancio Rossetto, Giuseppina Pisani Sartorio, Hans Peter Isler, Karina Mitens, Armin Wiegand, Roger John Anthony Wilson. Infine, estrema attenzione è stata rivolta alla lettura dei periodici specialistici, la cui analisi, per esplorazioni graduali ed espansive, ha consentito di esaminare l'evolversi delle indagini sistematiche effettuate sui teatri durante le campagne di scavo.

### IL TEATRO GRECO-ROMANO DI TAORMINA

Un particolare approfondimento è stato rivolto al Teatro di Taormina, in quanto ricadente nel territorio individuato per l'applicazione a scala locale del Progetto generale della Carta del Rischio, per cui, oltre la ricerca bibliografica, l'indagine è stata estesa alle fonti archivistiche conservate presso la Biblioteca Comunale di Palermo. Attraverso la lettura del catalogo dei manoscritti della Biblioteca, compilato per soggetto da Luigi Boglino, sono stati individuati alcuni manoscritti sull'argomento. Un primo documento riguarda la traduzione in italiano della descrizione del teatro (ms. del sec. XVIII, Qq H 272, XLI, cc. 1056-1070) eseguita dallo studioso Jacques Philippe d'Orville, la cui versione originale, in latino, era stata pubblicata dallo stesso autore, nel 1764, nell'opera "*Jacobi Philippi d'Orville sicula, quibus Siciliae veteris rudera, additis antiquitatum tabulis, illustrantur...*". Anche il secondo manoscritto, posseduto dalla Biblioteca sul teatro, riguarda un'ulteriore descrizione, ma successiva alla precedente,

(ms. del sec. XVIII, Qq H 272, XLII, cc. 1088-1118) del domenicano Giuseppe Allegranza, redatta dallo studioso in occasione di un viaggio compiuto in Sicilia intorno al 1750. Allegranza non pubblicò direttamente gli appunti di quel viaggio, ma li affidò allo studioso palermitano, Domenico Schiavo, che, in parte, li pubblicò nel "*Giornale de' Letterati d'Italia*", edito a Roma nel 1755. Le indicazioni fornite da questi due eruditi del Settecento risultano molto interessanti per la cono-

scenza dello stato di conservazione del teatro nella metà del XVIII secolo. Sempre tra i manoscritti della Biblioteca Comunale sono stati oggetto di studio le due "*Relazioni*" sullo stato del degrado delle antichità di Taormina, con relativo calcolo delle spese previste per il restauro, scritte nel 1814 dal maggiore Giacomo Custos, in esecuzione agli ordini impartiti dal Principe Ferdinando IV, Vicario Generale del Regno di Sicilia (ms. del sec. XIX, 4Qq D 42, cc. 204-209; 223-231).

*A cura di:*

Unità operativa Ricerca tecnico scientifica per i Beni Bibliografici ed Archivistici del Centro Regionale Progettazione e Restauro

*Responsabile:* Rita Di Natale

*Collaboratori:* Gabriella Cannata, Francesco Colletti, Iolanda Marescalco Lo Cascio, Francesco Scinia

# Contributo geologico e geotecnico alla Carta del Rischio

F. CAFISO, P. PRATINI, U. PIACENTINI, E. SCALONE

## SOMMARIO

Al fine di studiare le condizioni di rischio cui è soggetto il Teatro, è stato avviato uno studio di carattere geologico e geotecnico che si è sviluppato attraverso una complessa campagna di indagini, prove e rilievi in situ ed in laboratorio, oltre che una approfondita ricerca storica e bibliografica.

Preliminarmente si è inquadrato il promontorio di Taormina nel contesto geologico e tettonico regionale della Sicilia nord-orientale; è stato condotto, altresì, uno studio sulla sismicità attraverso una ricerca storica dei terremoti e la correlazione alle aree sismogenetiche.

Mediante le indagini in situ sono state individuate le caratteristiche litologiche dei terreni di fondazione del Teatro ed in affioramento sui costoni rocciosi su di esso incombenti, costituiti di calcari e calcari dolomitici del Lias inferiore, pertinenti all'Unità Taormina; con le prove ed i rilievi ne sono state definite le relative caratteristiche geomeccaniche.

È risultato che:

- dai costoni rocciosi incombenti sul Teatro, posti a nord-ovest del complesso monumentale, sono "cinematicamente" e "meccanicamente possibili" crolli di massi per fenomeni di "toppling" e di "sliding"; in caso di crollo, blocchi di volume anche superiore a qualche metro cubo potrebbero raggiungere il Teatro, con conseguenze distruttive;
- a seguito di intensi eventi meteorici possono verificarsi fenomeni di dilavamento sulla cavea e trasporto solido;
- l'area in cui ricade il Teatro è ad elevata pericolosità sismica.

## PREMESSA

L'I.C.R. ha recentemente elaborato una Carta del Rischio per l'intero territorio nazionale; essa necessita di adeguati approfondimenti locali, allo scopo di divenire operativa, individuando interventi di protezione e/o prevenzione per le aree a rischio. In tale ambito la Regione Sicilia si è attivata con un progetto finalizzato alla stesura di una Carta del Rischio del proprio Patrimonio Culturale ed Ambientale. Il progetto pilota

riguarda l'antico Teatro greco-romano di Taormina (ME).

Il complesso monumentale, sorto nel III secolo a.C. in un insenatura parzialmente scavata in un promontorio calcareo, è caratterizzato da una condizione di rischio elevato, sia per motivi antropici legati allo sfruttamento del bene (danni creati dai fruitori; dissesti provocati dalle onde sonore, etc.), sia per cause naturali, connesse al degrado delle antiche strutture ma, soprattutto, alla vulnerabilità nei confronti degli eventi sismici e del potenziale crollo di blocchi lapidei dai costoni rocciosi incombenti sul Teatro.

La vulnerabilità nei confronti di eventi sismici e franosi assume particolare rilevanza per gli effetti distruttivi che essi possono determinare; si cita a tale proposito il sisma verificatosi nel 365 D.C., che danneggiò gravemente il Teatro. Altrettanto distruttivi sarebbero gli effetti di crolli di elementi lapidei in equilibrio instabile, ubicati sul fronte carbonatico strapiombante sul lato nord-ovest del Teatro.

Al fine di studiare le condizioni di rischio del Teatro nei confronti dei fenomeni sismici e di instabilità nei costoni rocciosi su di esso incombenti, è stata sviluppata una complessa campagna di indagini, prove e rilievi in situ ed in laboratorio comprendenti:

- il rilievo di dettaglio del complesso monumentale e dei suoi rapporti con l'ammasso roccioso in cui esso è stato ricavato, utilizzando una sofisticata tecnica laser-scanner;
- il rilievo geostrutturale dell'ammasso roccioso in corrispondenza di 5 distinte stazioni, operando anche in cordata, con metodi alpinistici, sia in maniera "random" che lungo "scanlines" variamente orientate;
- sondaggi meccanici a carotaggio continuo con misura di RQD;
- prospezioni sismiche del tipo down hole, noise, profili a rifrazione;
- prove in laboratorio su campioni di roccia integra e interessata da discontinuità.

Nel contempo, è stata avviata una ricerca sui terremoti "storici", con effetti nell'area in cui ricade il complesso monumentale. I risultati ottenuti e le relative elaborazioni, mediante le quali è stato possibile effet-

tuare una valutazione del rischio “geologico” e del rischio “sismico” per il complesso teatrale, vengono riportanti nel presente lavoro.

## DESCRIZIONE DEL SITO

La cittadina di Taormina sorge nell’area costiera della Sicilia nord-orientale, lungo il tratto ionico compreso tra le città di Messina a nord e di Catania a sud, a circa 40 Km da quest’ultima (Fig. 1). Il paese si sviluppa sul promontorio compreso tra il Capo S. Andrea

a nord ed il Capo Taormina a sud, in un’area posta all’incirca tra le quote di 150 e 350 m s.l.m. (Fig. 2). Il versante su cui sorge il paese è dominato dai rilievi di Monte Crocifisso, Monte Piretta e Monte Tauro; il centro abitato si è sviluppato adattandosi alla originaria morfologia che caratterizza le pendici del Monte Tauro e dell’altura su cui si erge il Castello.

Il complesso monumentale del Teatro Greco-Romano, ubicato ai margini orientali dell’abitato, alla sommità della dorsale del M. Tauro (Fig. 3 e Foto 1 – Appendice A), è stato edificato in una insellatura naturale del promontorio a partire dalla metà del III secolo a.C.

Le dimensioni sono m 120 di lunghezza, m 50 di larghezza, m 20 d’altezza. Esso si divide in tre parti: la cavea, l’orchestra e la scena.

La cavea, ricavata nell’originaria concavità del versante, aveva nove cunei di gradinate ed un diametro di m 109. Un porticato a grandi pilastri circondava la summa cavea sul lato esterno ed uno meno imponente sul lato interno. I ruderi della scena conservano la parete di fondo con al centro una grossa fenditura che lascia intravedere un panorama di incomparabile bellezza. Dietro la scena ci sono resti di portici e, lateralmente, i “parascenia”. L’orchestra, posta al centro, divide la scena dalla cavea; essa ha un diametro di 35 metri.



Fig. 1 - Localizzazione geografica

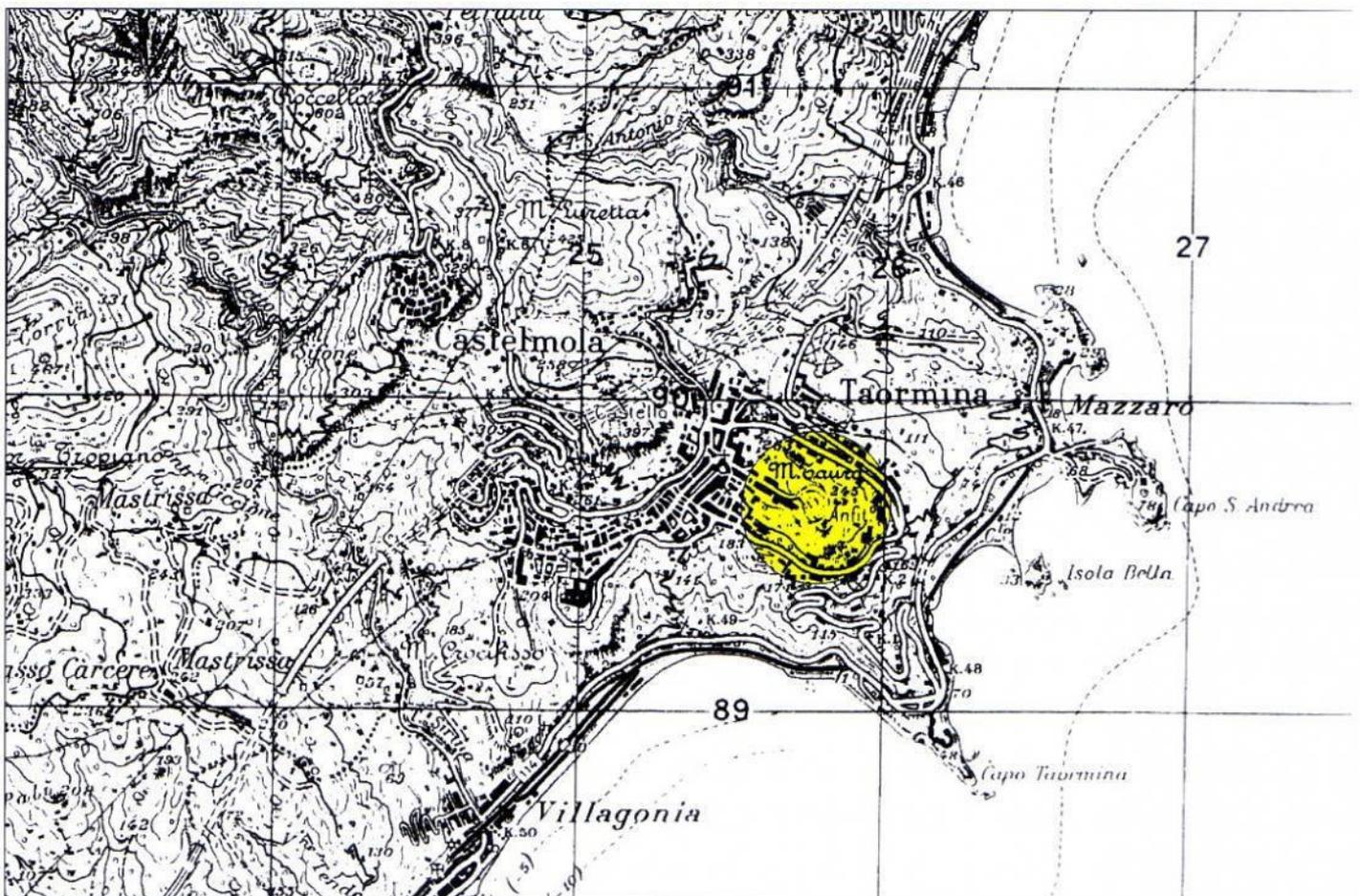


Fig. 2 – Corografia



Fig. 3 - Planimetria

In età romana il Teatro cessò di servire per rappresentazioni sceniche e venne ampliato e quasi interamente rifatto per essere adibito a spettacoli gladiatorii. L'orchestra originaria venne trasformata in un'arena circondata da un alto podio; intorno all'orchestra, come negli anfiteatri, correva un corridoio di servizio la cui volta, ora interamente crollata, reggeva l'inizio delle gradinate. Alla scena, conservata nell'elevato, ma privata del palcoscenico per ingrandire l'arena, rimaneva solo la funzione di prospetto decorativo. Il teatro divenne di fatto un anfiteatro.

Dopo una lunga fase di abbandono e degrado, seguita ai gravi danni provocati, presumibilmente nel 365 d.C., da un devastante evento sismico che interessò tutta l'area del Mediterraneo centro-orientale, a partire dalla metà del '700 ha avuto inizio una lunga e graduale serie di interventi di restauro, più o meno organici, con successive ricostruzioni e smantellamenti di varie parti del monumento; l'ultimo intervento di restauro, il più completo e razionale, è stato eseguito

negli anni '50, curato in massima parte dall'Arch. Italo Gismondi, dietro iniziativa di Luigi Bernabò Brea, allora Soprintendente alle Antichità della Sicilia Orientale.

Sul Teatro incombe un costone roccioso, denominato nel seguito "*parete nord-ovest*" con riferimento alla sua posizione, di altezza pari ad una trentina di metri (Foto 2, 3). Esso è interessato da varie famiglie di discontinuità che, interferendo tra loro, conferiscono una configurazione "*a blocchi*" all'ammasso roccioso (Foto 4): sono, cioè, presenti numerosi elementi lapidei disarticolati gli uni dagli altri e ciascuno dall'ammasso roccioso che, a seconda delle specifiche caratteristiche di orientazione delle discontinuità medesime, possono subire fenomeni di scorrimento ("*sliding*") e/o di ribaltamento ("*toppling*"). Si citano in particolare:

- il grosso elemento lapideo a forma di pinnacolo, visibile nelle Foto 5 e 6, che può ribaltare intorno allo spigolo di valle, oppure scorrere lungo la superficie di discontinuità, molto inclinata rispetto all'orizzontale,

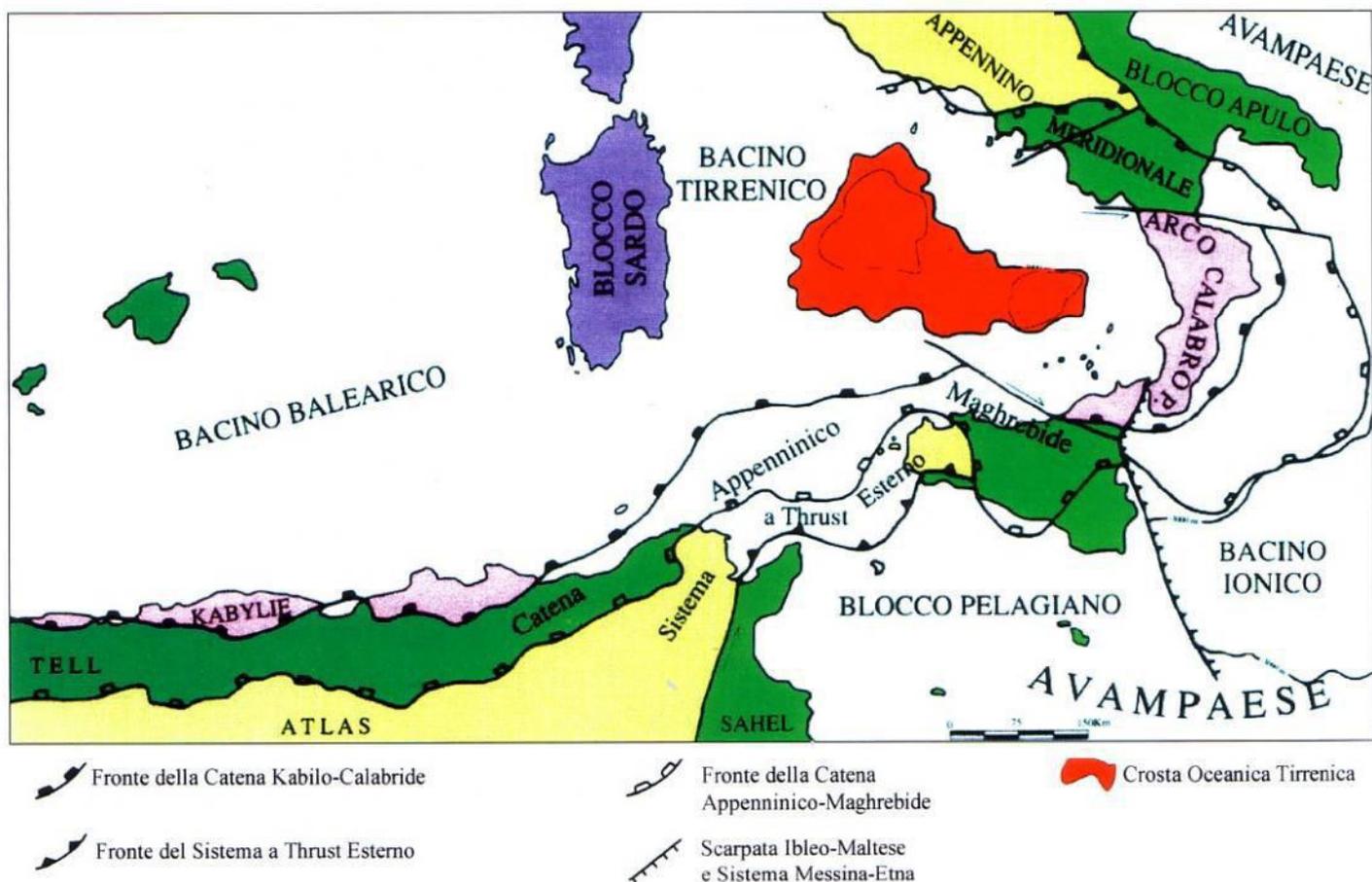


Fig. 4 – Schema tettonico del Mediterraneo Centrale (da Lentini et alii, 1995, modificato)

- che ne individua la base inferiore, oppure ancora crollare per la rottura del piede fratturato;
- il blocco carbonatico nella parte bassa della Foto 2 e al centro della Foto 6, che si trova in una configurazione “a sbalzo” a causa del crollo di massi o livelli di roccia sottostanti;
  - i massi “a sbalzo” visibili nella Foto 7.

Su tutto il fronte roccioso in argomento è stata applicata una rete di acciaio a doppia torsione, ben visibile nelle foto citate. Solamente la parete rocciosa di nord-ovest incombe sul complesso monumentale che, infatti, si erge alla sommità degli altri versanti, che degradano verso il paese: l'unica struttura del Teatro a rischio in caso di crollo di massi da tali versanti è la scala visibile nella Foto 8, ubicata al piede del costone roccioso posto a sud.

## INQUADRAMENTO GEOLOGICO

Numerosi sono gli studi geologici riportati in letteratura riguardanti l'area della Sicilia nord-orientale e di Taormina. Ai più recenti, redatti dall'Università di Catania, si fa riferimento nel presente studio per inquadrare gli aspetti geologici generali, sulla base dei quali sono stati impostati ed articolati lo studio di dettaglio sul Teatro e la campagna di indagini in sito.

Le aree montuose che caratterizzano la Sicilia sono il risultato del corrugamento di porzioni della crosta terrestre determinato dalla convergenza tra il continente africano e quello europeo, avvenuta durante il Terziario mediante la chiusura del bacino oceanico della Tetide, originariamente posto tra essi. La linea di sutura tra le due masse continentali è rappresentata dall'orogene (Catena Appenninico-Maghrebide) che caratterizza la dorsale appenninica fino alla Sicilia e alle coste del Maghreb (Fig. 4).

La collisione ha causato la sovrapposizione del margine continentale europeo sul margine continentale africano, mentre lungo la sutura sono rimaste intrappolate le successioni sedimentarie un tempo depostesi sul fondale oceanico tetideo, poi trascinate passivamente dal margine europeo avanzante. Queste successioni sedimentarie, che costituiscono oggi gran parte delle aree corrugate Appenninico-Maghrebidi, si sono accavallate le une sulle altre, andando a formare una serie di unità tettoniche che oggi si ritrovano accatastate, generando un complesso edificio tettonico a “thrust”.

Nell'odierno assetto dell'area corrugata possono distinguersi i terreni dell'originario margine europeo, formanti il Dominio Kabilo-Calabride, in sovrapposizione tettonica sui terreni tetidei costituenti il Dominio Appenninico-Maghrebide; l'insieme di queste succes-

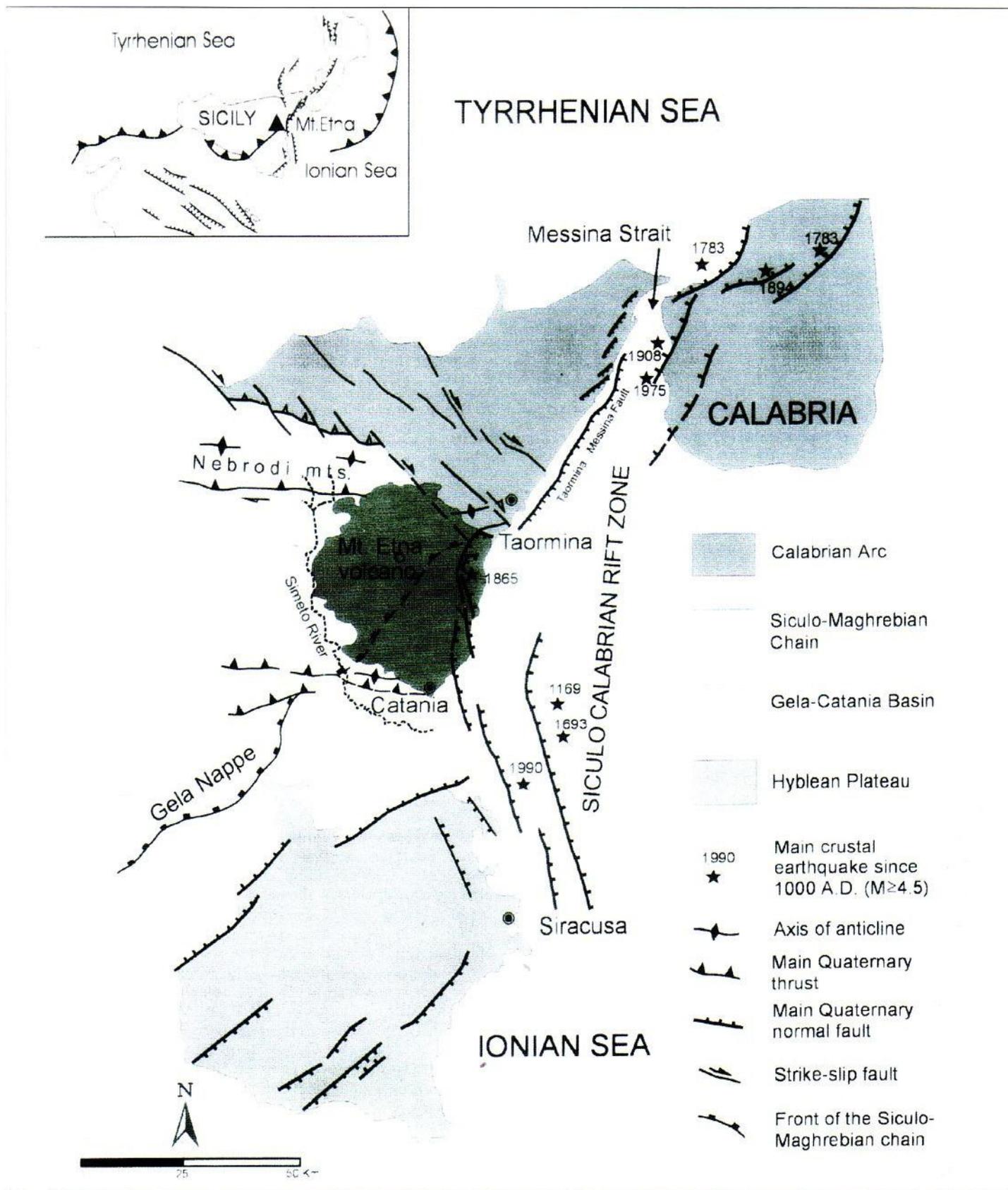


Fig. 5 – Schema strutturale della Sicilia Orientale (da Monaco et alii, 2002)

sioni deformate ricopre il margine africano indeformato, costituente l'Avampaese.

Nella Sicilia orientale, entro cui si colloca l'area di Taormina, si rinvencono tutti e tre i principali domini strutturali riscontrati nel settore del Mediterraneo Centrale (Fig. 5).

Le Unità derivanti dalla deformazione dell'originario margine europeo, note come *Unità Kabilo-Calabridi*, sono costituite da rocce cristalline di età ercinica con le relative coperture sedimentarie mesozoico-terziarie; esse affiorano in tutta la dorsale dei Monti Peloritani e si estendono verso sud fino all'allineamento S. Fratello-Giardini, orientato NW-SE,

lungo il quale è esposto il contatto tettonico di accavallamento sulle *Unità Appenninico-Maghrebidi*. Queste ultime formano la dorsale dei Monti Nebrodi e costituiscono il basamento sedimentario dell'edificio vulcanico etneo. Il settore indeformato del margine africano, costituente l'Avampese, è affiorante in Sicilia sud-orientale nell'Altopiano Ibleo e si estende verso nord al di sotto della Catena deformata.

L'area di Taormina si colloca nel contesto di questo complesso assetto tettonico-strutturale ed interessa, in particolare, i terreni del Dominio Kabilo-Calabride presenti nella dorsale peloritana, che costituisce la terminazione meridionale dell'Arco Calabro-Peloritano.

La struttura peloritana rappresenta, pertanto, un settore di orogene costituito di unità cristalline ercinee di derivazione europea con le relative coperture sedimentarie mesozoico-terziarie deformate in età paleogenica e suturate da livelli tardorogeni a partire dall'Oligocene (*Unità Kabilo-Calabridi*); tali Unità costituiscono un edificio a thrust, che si estende verso Sud fino all'allineamento S. Fratello-Giardini, orientato NW-SE, lungo il quale è esposto il contatto tettonico di accavallamento sulle *Unità Appenninico-Maghrebidi (Linea di Taormina)*. Complessivamente sono state distinte 5 unità sovrapposte; le tre più profonde presentano un basamento metamorfico analogo, di basso e bassissimo grado, e sono differenziabili sulla base della successione sedimentaria meso-cenozoica e sulla loro posizione strutturale. Dal basso verso l'alto si distinguono l'Unità di Capo S. Andrea, l'Unità di Taormina e l'Unità di S. Marco d'Alunzio. In tutte le Unità i basamenti metamorfici mostrano omogeneità litologiche, per cui sono stati indicati con Metamorfiti I, II, III; essi mostrano una leggera tendenza all'aumento del grado metamorfico dal basso verso l'alto. Le due unità strutturalmente più elevate, note come Unità di Mandanici e Unità dell'Aspromonte, sono costituite, rispettivamente, di terreni di basso e medio-alto grado metamorfico. Per quanto riguarda le coperture sedimentarie, alla prima unità sono riferibili alcuni lembi meso-cenozoici, indicati come Unità di Rocca Novara e Unità di Ali, mentre la seconda ne è del tutto priva.

L'edificio Kabilo-Calabride si è strutturato a partire dall'Oligocene inf. e la sua storia evolutiva è segnata dalla deposizione di successioni terrigene tardorogene in discordanza al tetto delle Unità metamorfiche, che vengono così a scandire i vari stadi della deformazione: tra queste successioni vi sono il Conglomerato Rosso - Formazione di Piedimonte dell'Oligocene inf., il Flysch di Capo d'Orlando dell'Oligocene sup.-Miocene inf., le Calcareniti di Floresta del Miocene inf.-medio. Queste ultime accompagnano la definitiva saldatura dell'edificio Kabilo-Calabride con l'edificio Appenninico-Maghrebide.

Nell'area del promontorio di Taormina sono presenti le tre unità Kabilo-Calabridi più basse dell'edificio strutturale peloritano, sovrapposte tettonicamente: l'Unità di Capo S. Andrea, l'Unità di Taormina e l'Unità di San Marco d'Alunzio (Fig. 6).

Tali unità sono costituite alla base da terreni di natura cristallina, rappresentati da metamorfiti paleozoiche, costituenti frammenti corticali della crosta continentale europea, su cui si sovrappongono successioni sedimentarie mesozoico-terziarie con diverso sviluppo

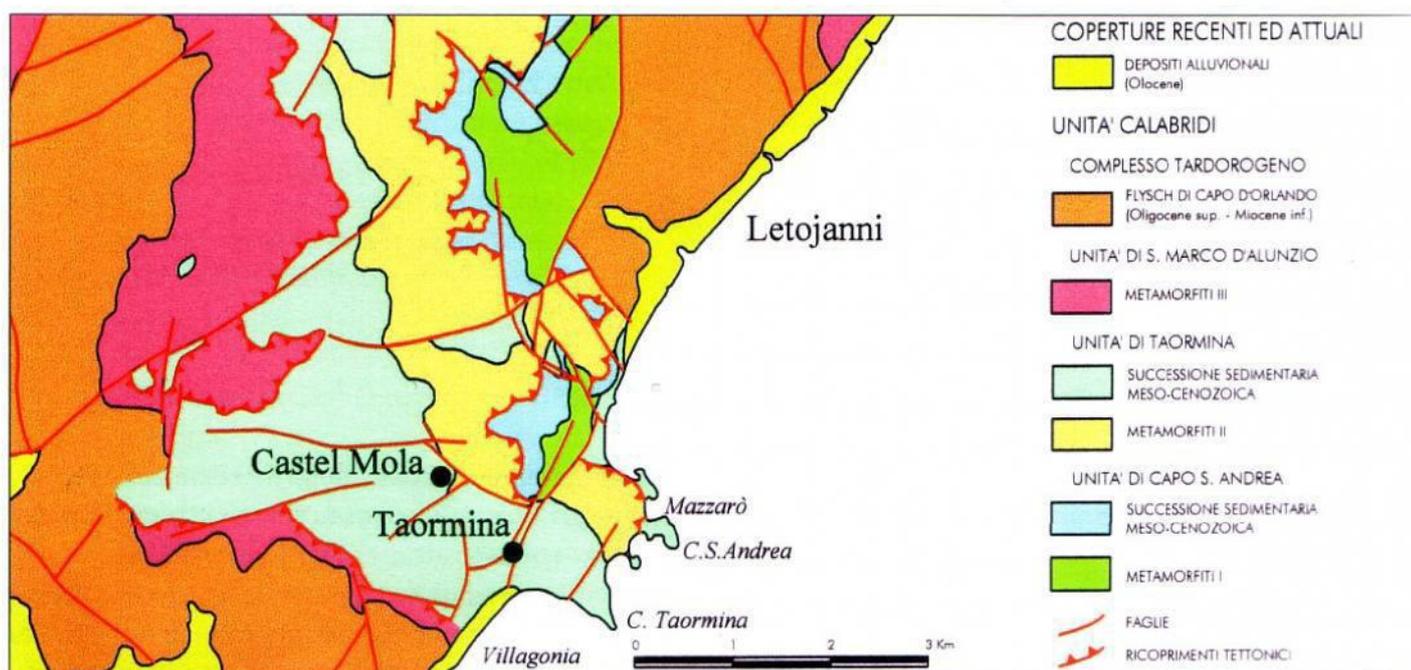


Fig. 6 – Schema geostrutturale dell'area di Taormina (da Lentini et alii, 2000, modificato)

verticale nelle varie unità. Su di esse giacciono i terreni tardorogeni del Flysch di Capo d'Orlando dell'Oligocene sup.-Miocene inf., che mostrano una giacitura in discordanza sul substrato deformato con una generale immersione verso i quadranti meridionali.

Infine, sui terreni sopradescritti sono depositi i terreni recenti ed attuali costituiti da:

- depositi dei terrazzi marini disposti a varie quote degradanti verso il mare, a testimonianza del graduale sollevamento del rilievo;
- depositi dei terrazzi fluviali disposti a mezzacosta lungo i versanti;
- coltri detritiche poste alla base delle pendici rocciose;
- depositi alluvionali di fondovalle;
- depositi di spiaggia.

Il rilievo geologico di superficie (Fig. 7) evidenzia che nell'area di Taormina sono affioranti le formazioni appresso descritte, secondo l'ordine di sovrapposizione strutturale e stratigrafica, (Fig. 8):

## Complesso Calabride

### *Unità di Capo S. Andrea*

Rappresenta l'unità strutturalmente più profonda. È costituita da un basamento metamorfico di basso grado e da coperture sedimentarie di spessore ridotto, in prevalenza carbonatiche, databili nell'intervallo compreso tra il Lias inf. ed il Cretaceo-Eocene. Più in particolare si riscontrano:

#### Basamento

**METAMORFITI I** – Rappresentano il basamento cristallino dell'Unità di Capo S. Andrea, costituito di semimetamorfiti, in prevalenza semiscisti cloritico-sericitici, derivanti da originarie rocce pelitico-arenacee. Si tratta di alternanze di metasiltiti, metapeliti, metareniti di colore da grigio-verdastro a grigio-nerastro a seconda del contenuto in clorite e in grafite. Presentano tessitura scistosa e grana da fina a piuttosto medio-grossolana. Frequentemente si rinvencono, all'interno della massa scistosa, amigdale di quarzo. Localmente si rinvencono metarkose a grana media e minuta e tessitura orientata a clasti millimetrici quarzoso-feldspatici in matrice finissima sericitico-cloritica. Nella successione si possono rinvenire, inoltre, estesi e potenti corpi di metavulcaniti basiche, a tessitura foliacea o porfiroclastica, e metacalcari rosati in banchi metrici. Sono presenti locali mineralizzazioni a solfuri, ossidi e idrossidi per processi di tipo idrotermale. Questi depositi affiorano immediatamente a Nord e

Nord-Est dell'abitato di Taormina, nella fascia compresa tra le propaggini più orientali del M. Puretta e il tratto di linea di costa a nord del promontorio di Mazzarò.

#### Copertura sedimentaria

La successione, compresa tra il Lias inf. ed il Cretaceo-Eocene, dal basso verso l'alto, è così costituita:

**CALCARI GRIGI A BRACHIOPODI** (Lias inf.-Dogger) – Costituiscono la porzione inferiore della copertura sedimentaria delle metamorfiti sopra descritte. Si tratta di calcari grigi massicci a Brachiopodi e Pettinidi, calcari grigi e rossi a Crinoidi, strati condensati a Crinoidi, Gasteropodi, Brachiopodi e Bositra Buchi. Tale successione, estremamente tettonizzata, unitamente ai sovrastanti termini mesozoico-paleogenici, è interamente affiorante in corrispondenza del promontorio di Capo S. Andrea e del promontorio a nord di Mazzarò.

**CALCARI ROSSI IN FACIES DI "ROSSO AMMONITICO" E MARNE IN FACIES DI "SCAGLIA"** (Giura sup.-Eocene inf.) – Costituiscono la porzione superiore della copertura sedimentaria meso-cenozoica delle metamorfiti I. Sono rappresentati da calcari rossi nodulari in facies di "Rosso Ammonitico", calcari micritici bianchi in facies di "Maiolica" e marne variegiate dal rosso al verde e giallastro in facies di "Scaglia". La serie della scaglia, alla base delle sovrastanti metamorfiti II, è ripetuta tettonicamente assumendo così uno spessore notevole. Lo spessore reale dell'intera unità è pari a circa 300 m, ma è comunque variabile a causa della forte tettonizzazione. La successione sedimentaria in oggetto affiora estesamente a nord di Taormina lungo i versanti attraversati dal Vallone S. Antonio, dove risulta ridotta ad un melange tettonico composto da una serie di scaglie embriate scollate dal substrato metamorfico.

### *Unità di Taormina*

I terreni appartenenti all'Unità di Taormina poggiano in ricoprimento tettonico sull'Unità di Capo S. Andrea e sono caratterizzati da un basamento metamorfico di basso grado e da coperture sedimentarie piuttosto estese, riferibili a formazioni di età compresa tra il Lias e l'Eocene. Nella zona di Taormina si rinvencono gli affioramenti più significativi di tale Unità, ubicati lungo tutta la dorsale compresa tra il Capo Taormina e l'abitato di Castelmola. Strutturalmente i terreni di tale unità giacciono secondo una monoclinale orientata NW-SE ed immergente verso SW, per cui gli orizzonti basali sono esposti in prevalenza sul versante settentrionale della dorsale Taormina-Castelmola, mentre i termini apicali affiorano sul lato meridionale della dorsale medesima.

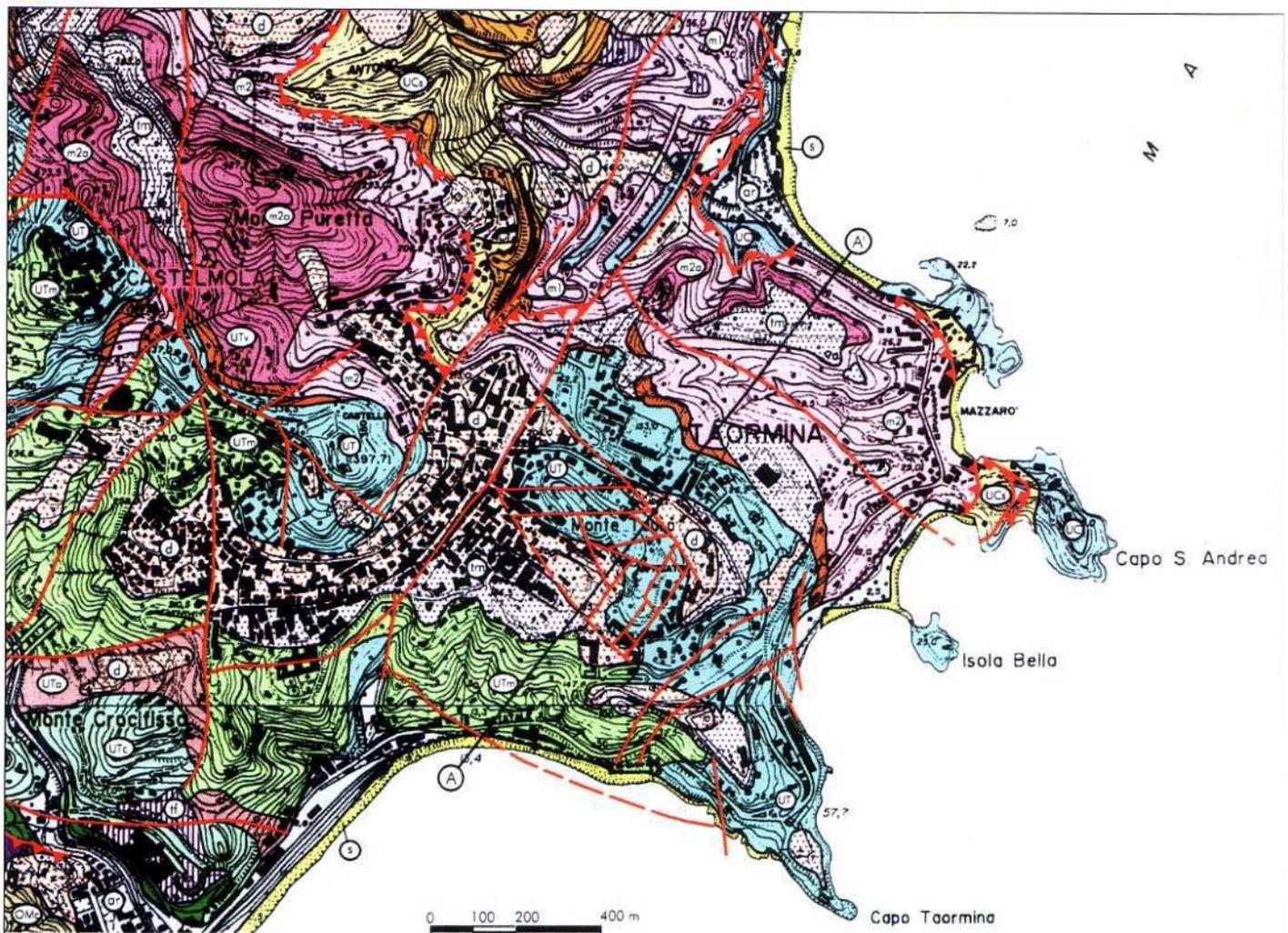


Fig. 7 - Carta geologica

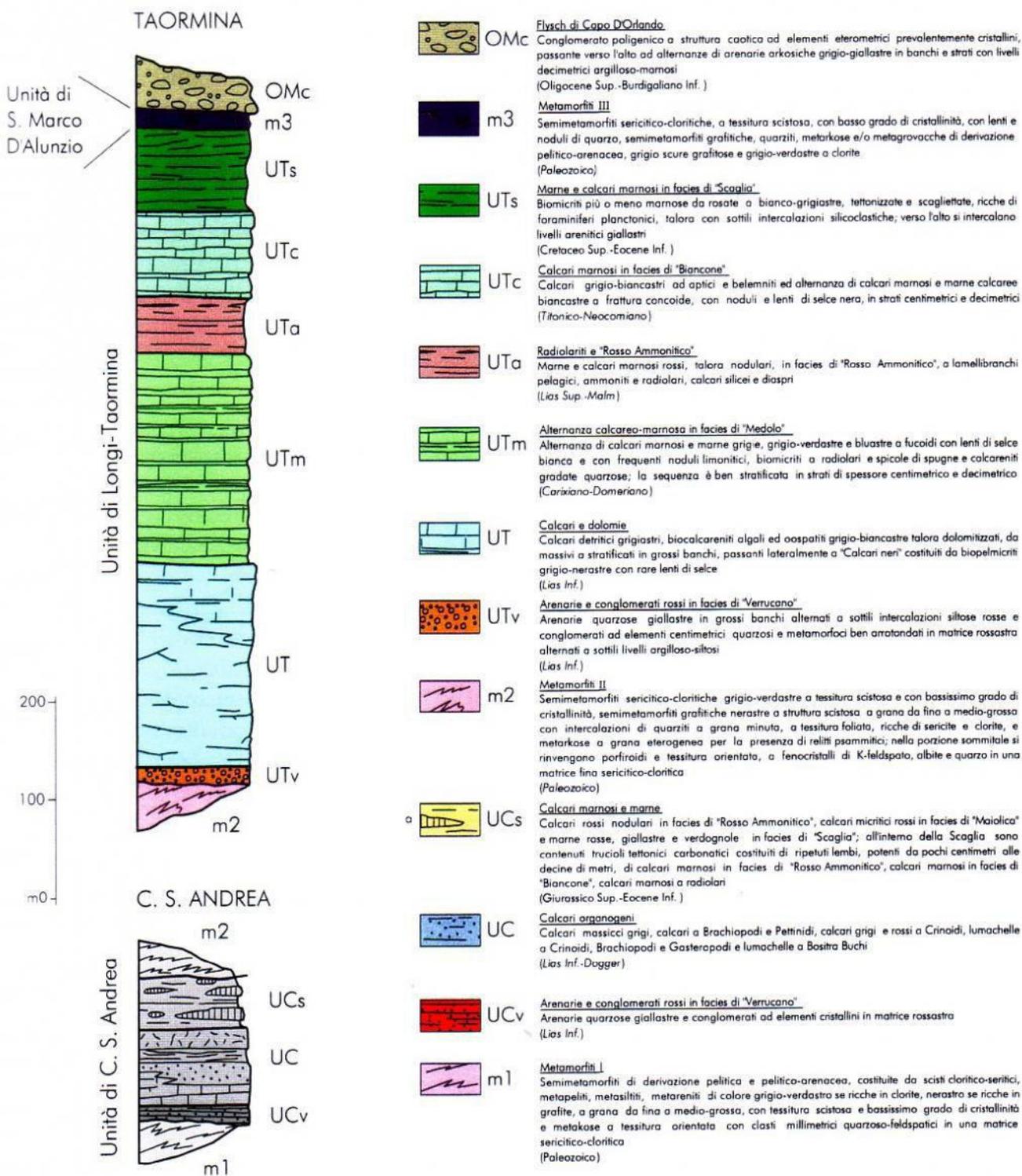


Fig. 8 – Serie stratigrafica tipo nell'area di Taormina (da Lentini et alii, 2000 modificato)

## Basamento

**METAMORFITI II** – Costituiscono l'antico basamento cristallino dell'Unità di Taormina e sono rappresentate da semiscisti cloritico-sericitici, costituiti di metasiltiti, metapeliti, metareniti e metabrecce, di colore da grigio-verdastro, per il contenuto in clorite, a nerastro per la presenza di grafite, a grana da fina a medio-grossa, con tessitura scistosa e bassissimo grado di cristallinità e con abbondanti amigdale di quarzo. All'interno della successione si rinvengono livelli di quarziti a grana fina a tessitura foliata, ricche in clorite e sericite,

e banchi di spessore decimetrico e metrico di metacalcari di colore grigio-rosato in banchi metrici. Nella porzione sommitale si rinvengono lenti di porfiroidi massivi giallastri a grana media e tessitura orientata con fenocristalli di K-feldspato, albite e quarzo, in una matrice fina sericitico-cloritica, nonché corpi, di spessore pari anche a diverse decine di metri, di metabasiti e metavulcaniti di colore violaceo. Sono presenti locali mineralizzazioni a solfuri, ossidi e idrossidi per processi idrotermali. Questi depositi affiorano estesamente ad Est del centro abitato di Taormina, caratterizzando l'al-

tura di Monte Purretta, a Nord-Ovest del paese.

#### Copertura sedimentaria

La successione dal basso verso l'alto è costituita di:

**CONGLOMERATI ROSSI ED ARENARIE IN FACIES DI "VERRUCANO"** (Lias inf.) – Si tratta di conglomerati e arenarie rosse in facies di "Verrucano", che indicano un ambiente di transizione dal continentale al marino. La successione è costituita essenzialmente di arenarie quarzose rosse in grossi banchi, alternati a sottili intercalazioni di argille selcifere rosse e giallastre e di conglomerati ad elementi quarzosi e cristallini di dimensioni centimetriche. Si rinvencono tracce di resti vegetali, frustoli carboniosi e rari lamellibranchi. I depositi in facies di Verrucano si rinvencono in maniera discontinua al tetto delle metamorfite II e sono presenti in affioramento nella zona di Castelmola e a nord di Monte Tauro.

**CALCARI E DOLOMIE** (Lias inf.) – Superiormente i terreni in facies di "Verrucano" passano ad un intervallo costituito di calcari detritici, oolitici e stromatolitici bianco-grigiastri massivi o in grossi banchi e di marne giallastre, passanti lateralmente e verso l'alto a dolomie saccaroidi giallastre massive o in grossi banchi; queste a loro volta presentano graduali passaggi laterali a calcari oolitici e calcari algali grigio-biancastri dolomitizzati. Chiudono verso l'alto calcari arenacei riccamente fossiliferi, di colore scuro. Localmente si riscontrano calcari nerastri o grigio-bluastri sottilmente stratificati con rare liste di selce nera, alternati a marne calcaree grigio giallastre. Si osserva in genere un discreto contenuto fossilifero rappresentato da alghe, foraminiferi, ostracodi, piccoli gasteropodi e lamellibranchi, brachiopodi e lumachelle. Tali depositi costituiscono in parte i rilievi su cui si sviluppa il paese di Taormina, caratterizzando, in particolare, la zona dove sorge l'area monumentale del Teatro.

**CALCARI MARNOSI E MARNE IN FACIES DI "MEDOLO"** (Lias inf.-medio) – Si tratta di una fitta alternanza di calcari marnosi e marne grigie, avana se alterate, con lenti di selce scura e frequenti noduli limonitici giallo-ocracei, a frattura concoide, in strati decimetrici, con contenuto fossilifero ad Ammoniti. Tali depositi affiorano lungo il tratto di costa compresa tra Capo Taormina e Giardini Naxos e ad Ovest di Taormina.

**CALCARI MARNOSI NODULARI IN FACIES DI "ROSSO AMMONITICO"** (Lias sup.-Malm) – Si tratta di marne rosse, grigie e verdastre, a frattura scheggiata o concoide, con intercalati livelli di calcari marnosi nodulari ad Ammoniti, passanti verso l'alto a radiolariti rosse e verdi fittamente stratificate e calcari marnosi selciferi. Tali depositi affiorano a sud del paese di Taormina,

lungo i versanti settentrionali ed orientali di M. Crocifisso.

**CALCARI MARNOSI CON SELCE IN FACIES DI "BIANCONE"** (Titonico-Neocomiano) – I depositi in oggetto sono costituiti di calcari grigio-biancastri non stratificati ad Aptici e Belemniti, passanti verso l'alto a calcari marnosi biancastri in strati sottili con liste e noduli di selce nera, alternati a sottili giunti marnosi nerastri, ad aptici, belemniti e rare ammoniti. Lo spessore massimo della sequenza è pari ad un centinaio di metri. Nella zona di Taormina questi depositi costituiscono per buona parte il rilievo di M. Crocifisso.

**CALCARI MARNOSI IN FACIES DI "SCAGLIA"** (Cretaceo sup.-Eocene) – Al di sopra del "Biancone" seguono marne e calcari marnosi di colore rosso, verde e giallastro in facies di "Scaglia", finemente stratificati e scagliettati, con piani di scistosità sia paralleli alla stratificazione, sia obliqui. La Scaglia affiora in settori limitati nei pressi dell'abitato di Villagonia, a Sud del Monte Crocifisso.

#### Unità di S. Marco d'Alunzio

Le successioni precedentemente descritte sono a loro volta ricoperte, per contatto tettonico, dai terreni appartenenti all'Unità di San Marco d'Alunzio, costituiti da un basamento cristallino di basso grado metamorfico e da coperture sedimentarie ridotte, condensate e lacunose. Nell'area in studio tale Unità è rappresentata solamente dal basamento metamorfico, privo delle coperture sedimentarie.

#### Basamento

**METAMORFITI III** – Nell'area di Taormina, l'Unità di S. Marco d'Alunzio è rappresentata dalle metamorfite III. Si tratta di terreni appartenenti al basamento cristallino, costituiti di rocce di basso o bassissimo grado metamorfico, rappresentate da semiscisti verdi sericitico-cloritici. I litotipi più comuni sono dati da metapeliti e metareniti con colorazioni scure grafitose e, subordinatamente, grigio-verdastre a clorite, a tessitura scistosa con basso grado di cristallinità. La colorazione è grigio-verdastro e scura, la tessitura è scistosa, e sono state individuate tracce di fossili di età devoniana. I depositi in oggetto affiorano a Sud-Ovest del Monte Crocifisso, in prossimità dell'abitato di Villagonia.

#### Complesso Tardorogeno

Il Complesso Tardorogeno comprende tutti quei terreni che si sono depositati contestualmente o successivamente alle principali fasi orogenetiche e di ricopri-

mento tettonico delle varie Unità descritte in precedenza. Si tratta di depositi discordanti sul substrato e in generale costituiti di successioni terrigene silico-clastiche o carbonatiche. Nell'area di Taormina si rinvencono i depositi tardorogeni appartenenti al Flysch di Capo d'Orlando, di seguito descritti.

**FLYSCH DI CAPO D'ORLANDO** (Oligocene sup.-Miocene inf.) – Si tratta di una formazione terrigena che poggia in discordanza e trasgressiva sulle precedenti Unità Kabilo-Calabridi suturandone i contatti tettonici. È costituita di depositi in facies torbidity conglomeratico-arenacei evolventi verso l'alto e lateralmente a facies arenacee o arenaceo-pelitiche, più raramente a facies francamente pelitiche. È costituito di conglomerati poligenici ad elementi di dimensioni variabili, da centimetriche a decimetriche e talora anche fino al metro, di natura metamorfica di vario grado, di granitoidi, di granuli di quarzo arrotondati e raramente di calcari, a struttura caotica, passanti ad arenarie in strati centimetrici e decimetrici alternate a livelli pelitici di colore bruno. I conglomerati presentano matrice arenacea di colore grigio-giallastro ben cementata e con scarsa frazione argillosa; le arenarie sono grossolane, gradate, di colore grigio-verdastro a taglio fresco e grigio-giallastro se alterate. Verso l'alto si passa ad una alternanza di argille brune ed arenarie arkosiche fini giallastre in strati centimetrico-decimetrici. Nell'area in studio le sequenze flyschioide affiorano nei pressi dell'abitato di Villagonia con la facies conglomeratica, passante verso l'alto ad alternanze di argille ed arenarie ben stratificate.

### Depositi continentali e marini recenti ed attuali

**TERRAZZI MARINI** (Pleistocene medio-sup.) – I terrazzi marini, a varie quote, sono diffusamente presenti nel settore nord-orientale della Sicilia ed evidenziano successivi e differenziati sollevamenti legati a fenomeni neotettonici, successivi alle fasi orogenetiche. Si tratta di superfici di abrasione, spianate dall'azione marina, sollevate dalla tettonica recente a quote variabili secondo più ordini di terrazzi, delle quali oggi si rinvencono porzioni e lembi isolati e discontinui. Nell'area di Taormina e nelle zone limitrofe sono riconoscibili terrazzi posti a quote 210-180 m s.l.m., 100-110 m s.l.m., 80-75 m s.l.m. Si rinvencono nelle aree sub-pianeggianti alla sommità dei rilievi che delimitano a monte l'abitato e sono caratterizzati dalla presenza di sabbia di colore giallo ocra e grigiastro con livelli lenticolari di ghiaia a spigoli arrotondati, di norma ben cementati.

**TERRAZZI FLUVIALI** (Pleistocene sup.) – Sono rap-

presentati da terrazzi di origine fluviale di vario ordine, sospesi lungo le valli, anch'essi derivanti dalla combinazione tra l'azione di erosione e deposizione da parte delle acque fluviali ed i fenomeni di sollevamento recenti, che hanno caratterizzato l'area in studio. Sono costituiti di sabbia e ghiaia di natura poligenica a spigoli arrotondati di colore bruno-grigiastro, ricoperti superficialmente da terra rossa. Nell'area in studio si osservano piccoli lembi di depositi fluviali terrazzati alla base delle pendici meridionali del Monte Crocifisso.

**DEPOSITI ALLUVIONALI E PIANE LITORALI** (Olocene) – Comprendono i depositi alluvionali attuali e recenti presenti nei fondovalle dei corsi d'acqua principali e lungo le pianure costiere retrostanti alle fasce litorali. Si tratta di terreni a granulometria variabile, costituiti di limo sabbioso, sabbia limosa e ghiaia, talora poco addensati, giacenti in livelli lenticolari embriciati.

**DEPOSITI LITORALI** (Olocene) – Si tratta dei depositi presenti lungo le spiagge nelle insenature costiere, costituiti di sabbia e ghiaia ad elementi eterometrici arrotondati e appiattiti.

### TETTONICA

In Sicilia orientale in poche decine di chilometri sono concentrati buona parte dei domini strutturali originatisi a seguito della tettonica compressivo-traslattiva, che dal Miocene in poi hanno caratterizzato la regione dell'attuale Mediterraneo Centrale:

- le *Unità Kabilo-Calabridi* di derivazione europea, affioranti lungo tutta la dorsale dei M. Peloritani, in contatto tettonico di accavallamento, lungo la linea di Taormina, con la Catena Appenninico-Maghrebide;
- le *Unità Appenninico-Maghrebidi* di derivazione tetidea, affioranti lungo la dorsale dei Monti Nebrodi e, verso W, delle Madonie, dei Monti di Palermo e di Trapani;
- il settore indeformato del margine africano affiorante nell'*Altopiano Ibleo*.

L'intero edificio orogenico è poi disseccato da sistemi di faglie a diversa orientazione originatisi nelle fasi orogenetiche. Tali elementi strutturali si sono evoluti fino ad epoche molto recenti ed in alcuni casi sono tuttora attivi, come dimostra l'elevata sismicità della regione.

I principali lineamenti strutturali comprendono (Fig. 9):

- il sistema Sud-Tirrenico di faglie a gradinata, orientate NW-SE, lungo le quali si sono registrati nel tempo movimenti trascorrenti destri e alle quali è

collegata la distensione connessa all'apertura del Bacino Tirrenico avvenuta a partire dal Serravaliano. Le faglie di questo sistema hanno accompagnato il sollevamento delle aree emerse con spostamento delle linee attive verso il mare; esse si sviluppano dal margine peritirrenico dell'Isola fino ai settori esterni della Catena. Queste strutture hanno controllato in gran parte l'evoluzione morfologica recente dell'area; esse, infatti, definiscono il bordo meridionale della dorsale nebrodica, che oggi costituisce la zona assiale del segmento orogenico della Sicilia orientale, e sono responsabili della culminazione delle Unità Numidiche profonde, oggi affioranti come ossatura della dorsale nebrodica. Secondo i dati raccolti su queste linee tettoniche, quelle affioranti a terra non mostrano segni di riattivazione recente in quanto risultano morfologicamente ben modellate, mentre quelle a mare appaiono responsabili del sollevamento in atto;

- il sistema di faglie trascorrenti destre orientato NW-SE associato alla zona di taglio crostale della "Linea Tindari-Giardini" o "Linea di Taormina", le quali smembrano il fronte di accavallamento delle Unità Calabridi su quelle Maghrebide.

Dall'interazione tra i vari sistemi di faglie deriva la lacerazione crostale che ha favorito la risalita dei magmi profondi da cui ha origine l'attività dell'Etna. Come dimostrato dalla intensa attività sismica e dalle manifestazioni vulcaniche, tutto il sistema è tuttora tet-

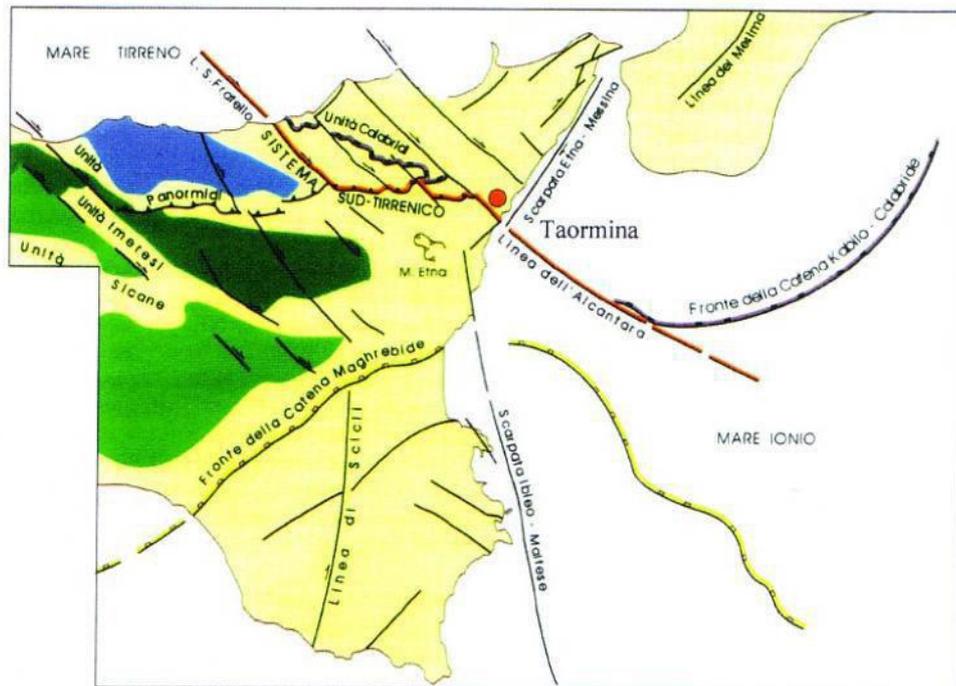


Fig. 9 – Schema dei principali lineamenti neotettonici della Sicilia Orientale (da Lentini et alii, 1994)

- il sistema di faglie localizzate lungo la costa ionica siciliana, che borda nel tratto meridionale tutto il settore ibleo e si prolunga verso nord fino al fianco orientale etneo; l'andamento della costa sembra controllato da faglie ad orientamento NNW-SSE che hanno originato la "Scarpata Ibleo-Maltese", la cui continua attività è responsabile dell'attività sismica che più volte ha interessato la Sicilia orientale; si tratta di un sistema di faglie normali con un rigetto verticale cumulativo di 3000 m, suddiviso in più segmenti;
- il sistema di faglie orientate NNE-SSW che bordano

tonicamente attivo e tra le manifestazioni di questa attività va segnalata anche la tendenza ad un generalizzato sollevamento dei rilievi, dell'ordine del millimetro/anno nell'area dei Peloritani.

Nel contesto di questo complesso assetto tettonico-strutturale della Sicilia orientale va inquadrata l'area di Taormina. I terreni che vi affiorano sono coinvolti in una struttura monoclinale ad orientazione E-W immergente verso Sud (Fig. 10). Questa rappresenterebbe il fianco meridionale di un'ampia anticlinale sviluppatasi nel Miocene inf.-medio, durante le ultime

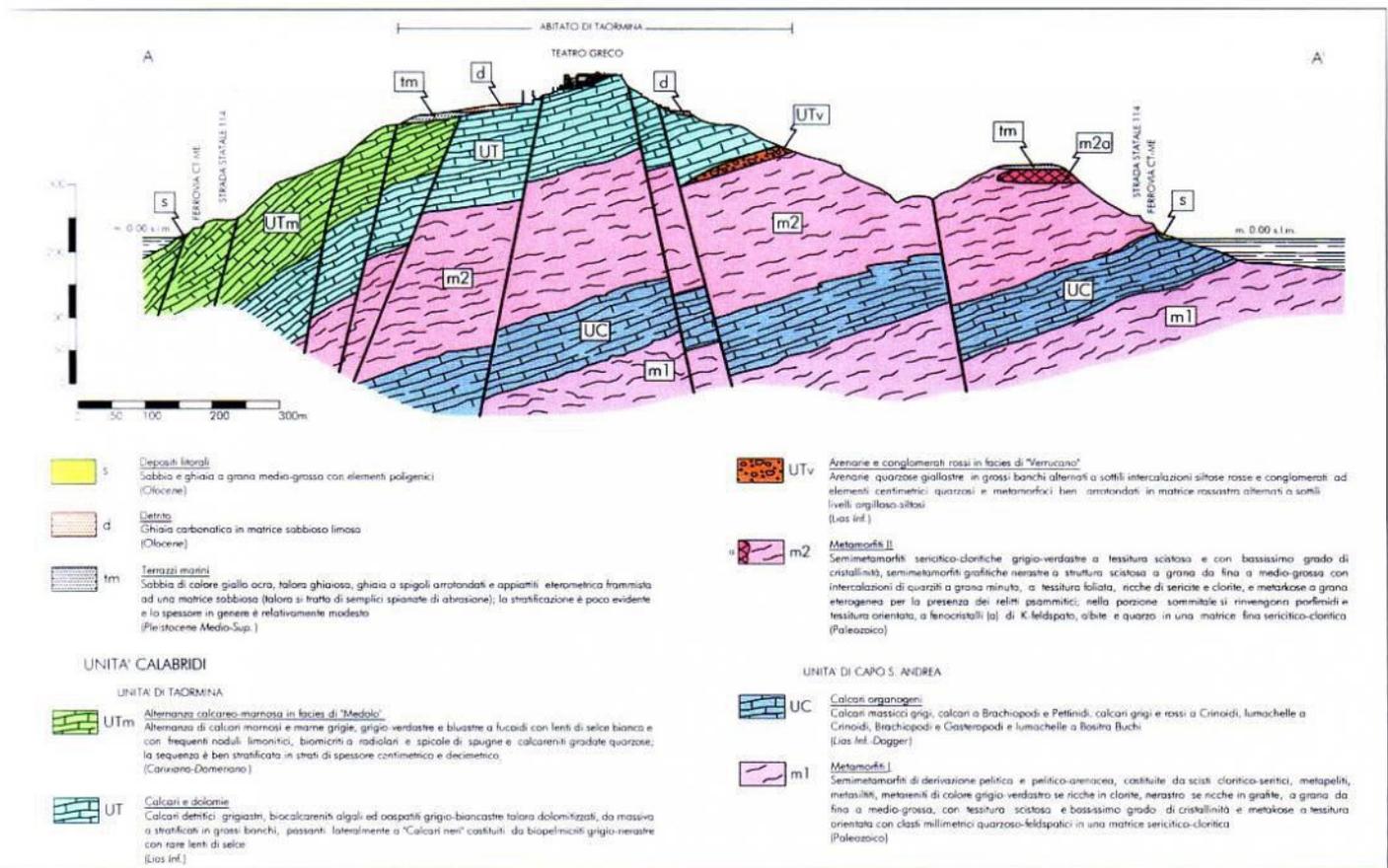


Fig. 10 – Sezione geologica del promontorio di Taormina

fasi di accavallamento delle Unità Kabilo-Calabridi sulle Unità Appenninico-Maghrebidi. In questa monoclinale sono coinvolti i contatti tettonici fra le diverse unità affioranti, che mostrano anch'esse una generale immersione verso Sud.

L'area è, poi, interessata da un complesso reticolo di faglie appartenenti ai diversi sistemi regionali prima descritti. Le strutture ad orientazione NW-SE e NNW-SSE, presenti nell'area, sono riferibili al Sistema Sud-Tirrenico. Una faglia con questa orientazione si estende da Castelmola alla zona del Castello e fino al promontorio di Capo Taormina. Lungo questa faglia è avvenuta una chiara dislocazione verticale dei termini ai due lati, con ribassamento del settore sud-occidentale. Le faglie del sistema Sud-Tirrenico nell'area di Taormina interagiscono con le faglie del Sistema Messina-Etna ad orientazione NNE-SSW. Queste strutture danno luogo alle coste alte che caratterizzano la zona. Il sistema è stato responsabile del progressivo collasso delle aree costiere ed ha guidato il sollevamento delle terre emerse, determinando il repentino approfondimento del fondo marino verso Est. Una faglia appartenente a questo sistema attraversa il paese di Taormina. Essa ha ribassato il settore su cui è edificato l'abitato rispetto al rilievo su cui è posto il Castello ed è sepolta sotto la coltre detritica su cui è fondato il paese. Ulteriori segmenti di faglia ad orientazione NNE-SSW e N-S si rilevano nell'area di Castelmola e Monte

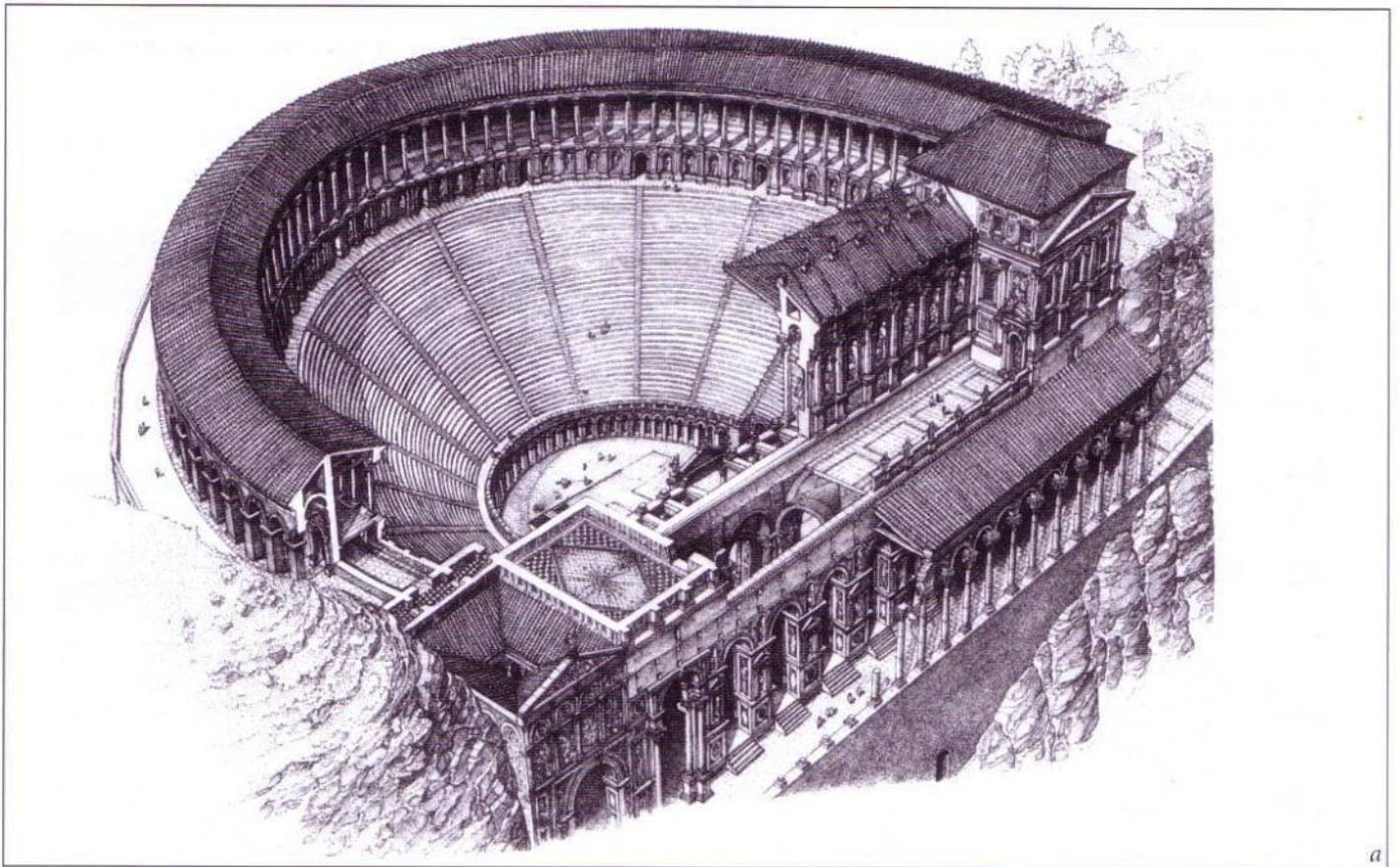
Crocifisso; queste strutture, precedenti ai sistemi sopracitati, sembrano siano collegate alle antiche fasi di corrugamento delle Unità Kalibo-Calabridi. Infine, un ulteriore sistema ad orientazione E-W si rileva all'estremità meridionale, nella zona di Villagonia. Di esso non è ancora chiaro il ruolo, se collegato all'antico piegamento inframiocenico o ai sistemi più recenti.

## SISMICITÀ

Nella normativa precedente all'attuale, il territorio comunale di Taormina risultava inserito nell'elenco delle località sismiche di II categoria, con grado di sismicità  $S=9$ , allegato alla legge n. 1684 del 25.11.62 e successive modifiche ed integrazioni. Ad oggi, con la nuova classificazione sismica della Regione Siciliana, Taormina risulta inserita nell'elenco dei Comuni classificati sismici in zona 2 di cui alla Delibera G.R. n. 408 del 19.12.2003.

Tra le prime notizie sulla sismicità del sito di Taormina le fonti storiche citano un terremoto di elevata intensità verificatosi nel 365 d.C. Questo evento ebbe effetti distruttivi sul Teatro Greco-Romano (Fig. 11). Bernabò Brea (2000) ne riporta una sintesi interessante:

*“Se esaminiamo le condizioni in cui il teatro di Taormina è giunto a noi, ci rendiamo facilmente conto che la distruzione di esso non può essere stata causata né*



a



b

Fig. 11 - a) Ricostruzione del Teatro Greco di Taormina (disegno di Francesco Corni)  
 b) Il Teatro Greco di Taormina nello stato attuale

da una lenta e progressiva degradazione, né, tanto meno, da una intenzionale demolizione.

Appare evidente invece che la distruzione del Teatro deve essere stata causata da un violentissimo terremoto, che ha fatto crollare, in un sol momento, i due portici interno ed esterno che circondano la summa cavea, gran

parte del muro di spina che li divide, ma anche l'ambulacro a volta, che era stato costruito intorno all'orchestra, sopprimendo i gradini inferiori della cavea, quando in età imperiale il teatro era stato adattato a funzioni di anfiteatro.

Nell'edificio scenico questo stesso terremoto deve aver

DATA E AREA SISMOGENETICA	INTENSITA' (SCALA M.S.K.-64)
Calabria e Peloritani	
05-02-1783	8°
16-11-1894 (h.17:25)	6°
16-11-1894 (h.22:35)	4°
08-09-1905	5°
23-10-1907	4°
28-12-1908	8°
22-09-1909	4°
30-08-1910	4°
07-03-1928	5,5°
13-04-1938	4°
Catena Costiera Siciliana	
05-03-1823	4°
22-04-1893 (h.1:15)	4,5°
22-04-1893 (h.3:20)	4°
23-04-1893	5°
20-02-1894	4°
10-12-1908	3,5°
08-10-1936	4°
31-10-1967	3°
15-04-1978	5,5°
Etna	
05-06-1886	4°
19-02-1908	3,5°
03-09-1912	3,5°
08-05-1914	3°
Iblei	
20-02-1818	5°
11-02-1897	5°
23-12-1959	4°

N.B. Le intensità si riferiscono agli effetti registrati in corrispondenza del territorio comunale di Taormina e non alle relative intensità epicentrali

DATA	INTENSITA' (SCALA M.S.K.-64)
122 a.C. (Mercalli)	?
365 d.C. (Bernabò Brea)	?

da Mercalli e B. Brea

DATA	INTENSITA' (SCALA M.S.K.-64)
04-12-1169	10°
10-12-1542 (Mercalli)	9°-10°
11-01-1693	9°
20-02-1818	5°

da CNR, 1985

Tab. I - Terremoti nel periodo 1783-1978 (Barbano et Alii, 1980)

Tab. II - Terremoti storici

determinato il crollo del piano superiore della scaenae frons e dell'intero porticus post scaenam.

È sorprendente, invece, che siano rimaste intatte, e che siano giunte fino a noi, le grandiose volte delle due amplissime aule che fiancheggiano l'edificio scenico su entrambi i lati. Ma vi è forse per questo fatto una comprensibile spiegazione.

Le scosse sismiche devono essersi prodotte in senso Sud-Nord (meno probabilmente Nord-Sud) e devono quindi aver causato il crollo pressoché totale di tutto ciò che si elevava frontalmente rispetto ad esse, mentre molto meglio hanno potuto resistere le strutture che si trovavano nella loro stessa direzione, come appunto erano i muri laterali su cui si appoggiavano le volte delle due grandi aule.

Tutto fa pensare che questo terremoto, che ha distrutto il Teatro di Taormina, sia quello del 365 d.C. avvenuto al tempo degli imperatori Valentiniano I e Valente, che concordemente le fonti storiche .....ci indicano come forse il più violento e distruttivo.....e.....territorialmente il più esteso, se ha colpito simultaneamente la

Sicilia, l'Africa Settentrionale, la Grecia e le sponde del Mediterraneo orientale, fino ad Alessandria e alla Palestina, come ci attestano Libonio e Ammonio Marcellino.”

Al fine di elaborare valutazioni sul livello di sismicità che caratterizza l'area di Taormina, è stata effettuata una ricerca storica sugli eventi sismici registrati nell'area. Si è preso in esame, pertanto, il Catalogo delle Mappe Isosismiche per i terremoti verificatisi in Sicilia ed in Calabria negli anni compresi tra il 1783 ed il 1978 (Barbano et. al. 1980). Dallo studio delle isosiste (linee di uguale intensità sismica) si sono individuate le aree epicentrali dei terremoti che maggiormente si sono risentiti nel territorio di Taormina. Gli eventi considerati sono quelli che hanno fatto registrare nell'area di Taormina effetti di intensità pari o superiore a 3 nella Scala Mercalli Modificata (M.S.K.) raggruppati in funzione delle relative aree sismogenetiche. Per i terremoti storici, inoltre, si è consultato il Catalogo dei Terremoti Italiani dall'Anno 1000 al 1980, redatto dal CNR nel-

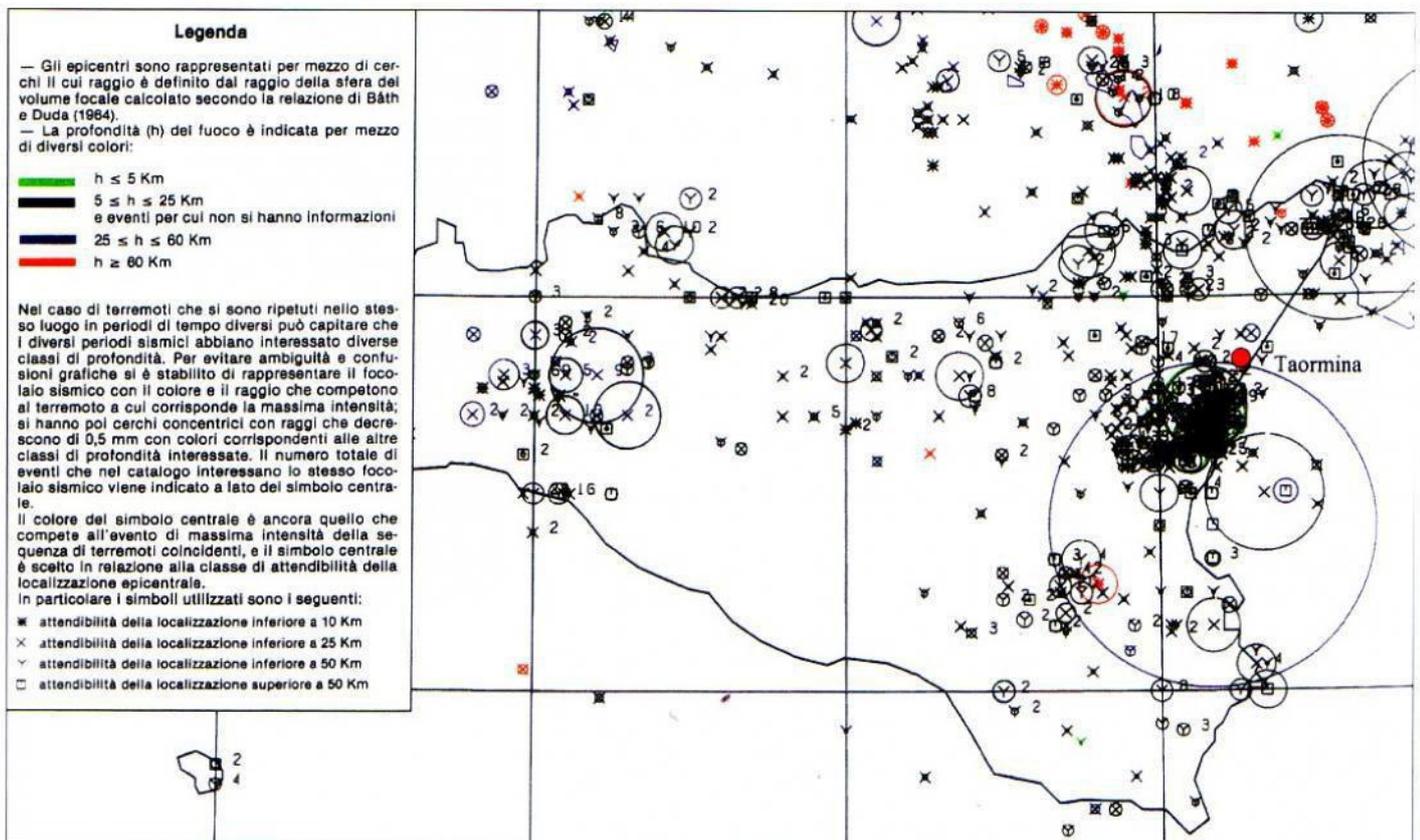


Fig. 12 – Carta degli epicentri (da C.N.R. – Progetto Finalizzato Geodinamica)

l'ambito del Progetto Finalizzato Geodinamica, e si citano anche due terremoti antecedenti all'anno 1000 di cui si ha notizia da fonti storiche (Mercalli).

Dalla ricerca storica (Tabb. I e II) emerge che la sismicità registrata nel territorio di Taormina rientra nel quadro sismico generale della Sicilia orientale, notoriamente più volte sconvolta da fenomeni catastrofici. La causa della intensa attività sismica registrata in Sicilia orientale è connessa alla particolare collocazione geologica della Sicilia nella zona di sutura orogonica tra Avampaese indeformato, Catena Appenninico-Maghrebide e Kabilo-Calabride, e margini in collasso del Bacino Sud-Tirrenico a Nord e del Bacino Ionico ad Est. I terremoti appaiono distribuiti principalmente lungo faglie regionali che hanno giocato un ruolo nella recente evoluzione geodinamica dell'area (Figg. 9 e 12). Le zone sismogenetiche possono, pertanto, riassumersi come appresso:

- la zona dello Stretto di Messina costituisce una delle aree a maggior potenziale sismogenetico della regione; in essa si è verificato il terremoto del 1908, per il quale è stata ipotizzata l'attivazione di sistemi complessi;
- alle faglie distensive a recente attività, che caratterizzano il settore più meridionale dell'Appennino fino alla Sicilia orientale, sono associabili i grandi terremoti che hanno devastato la regione calabro-peloritana (1783-1908);

- nella catena costiera peloritana la maggior parte dei terremoti sono localizzati sul versante tirrenico; questa sismicità è associabile alle strutture trascorrenti destre orientate NW-SE, che costituiscono l'espressione più settentrionale della zona di taglio crostale, rappresentata dalla Linea Tindari-Giardini (es. terremoto di Patti del 1978);
- altri terremoti minori potrebbero essere associati alle faglie normali NE-SW responsabili del sollevamento della Catena;
- altro ruolo viene giocato, inoltre, dalle strutture Sud-Tirreniche (orientate circa E-W) presenti in mare, che potrebbero aver generato terremoti anche di magnitudo elevata, come quello del 1823;
- in Sicilia sud-orientale, infine, la sismicità è distribuita lungo la Costa Ionica, lungo la Scarpata Ibleo-Maltese, per la quale si hanno evidenze di attività tardo-quadernaria, e che appare la sorgente più probabile per i grandi terremoti che hanno colpito la regione (1169-1693-1818); essa è costituita da un sistema di faglie prevalentemente normali, a direzione NNW-SSE, suddiviso in segmenti che verso nord si estendono fino all'area Etna; altri terremoti possono essere attribuiti poi a strutture sismogenetiche minori, tipo il graben di Scordia-Lentini, attivo sino al Pleistocene medio, e ad altri sistemi di faglie (1542,1959);
- per quanto riguarda le caratteristiche di sismicità

dell'area etnea sono state riconosciute delle strutture sismogenetiche individuali, tra cui quelle responsabili di eventi maggiormente distruttivi (es. faglia di S. Tecla per il terremoto del 1914); si tratta di faglie attive, anche di estensione limitata (1-5 Km), caratterizzate da un'elevata frequenza di accadimento di terremoti, spesso accompagnati da fagliazione superficiale cosismica.

## INDAGINI NEL SITO DEL TEATRO

Per la caratterizzazione geologica puntuale dei terreni presenti nel sito del Teatro sono stati eseguiti n° 6 sondaggi meccanici a carotaggio continuo spinti a pro-

fondità comprese tra m 15 e 40 dal p.c., la cui ubicazione è indicata nella planimetria di Fig. 13 ed i cui profili stratigrafici sono riportati in Appendice B, completi della valutazione del parametro RQD.

Per caratterizzare, sotto il profilo sismico, il sito del Teatro sono stati eseguiti n° 5 down-hole, n° 8 traverse sismiche a rifrazione (SS1..... SS8) e il rilievo delle caratteristiche spettrali del noise naturale in n° 3 siti significativi (Fig.13).

I risultati di tali indagini si sono integrati con quelli derivanti da fotointerpretazione e rilievi di dettaglio geologici e geomorfologici. Nella citata Fig.13 sono, altresì, indicate le zone dell'ammasso roccioso in cui sono stati eseguiti dettagliati rilievi geostrutturali, con misura delle

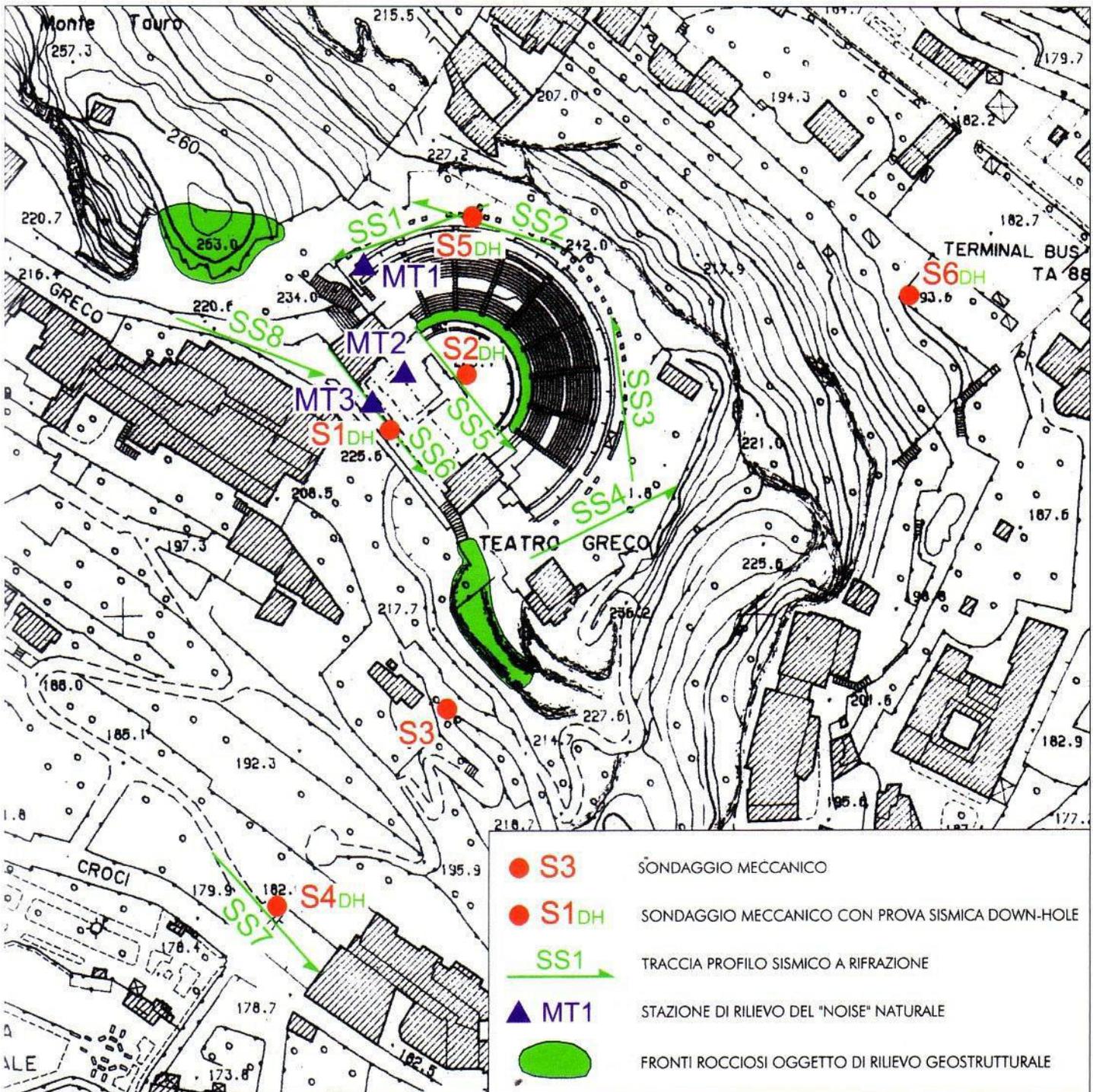


Fig. 13 – Ubicazione delle indagini

principali caratteristiche delle superfici di discontinuità in esso presenti. Per la caratterizzazione meccanica sono state eseguite prove di laboratorio su campioni di roccia integra ed interessata da discontinuità.

## ASSETTO GEOLOGICO-STRUTTURALE DEL SITO DEL TEATRO

Il sito del Teatro Greco-Romano si localizza all'estremità orientale dell'abitato di Taormina, lungo il versante sud-occidentale della dorsale di M. Tauro, che dalla sommità degrada con una morfologia piuttosto articolata verso valle, in direzione della Via Bagnoli Croci e della Villa Comunale. Esso si estende su una superficie di circa 1 Ha, a quote comprese tra 220 e 242 m s.l.m., incassato nelle pendici calcaree del rilievo.

Quest'ultimo ha la morfologia di una dorsale allungata in direzione NW-SE, dal margine orientale dell'abitato verso il Capo Taormina, che ne rappresenta le estreme propaggini a SE.

Sotto il profilo geologico-strutturale la dorsale di M. Tauro è costituita da una monoclinale avente direzione prevalentemente NW-SE, immergente a SW, costituita di calcari e calcari dolomitici del Lias inf., pertinenti all'Unità di Taormina (Fig. 14). Su tali terreni carbonatici si rinvengono coperture recenti, costituite di terreni detritici, accumulatisi ai piedi dei versanti calcareo-dolomitici, e di depositi sabbioso-ghiaiosi dei terrazzi marini presenti a diverse quote lungo entrambi i versanti.

Due differenti sistemi di faglie dissecano la dorsale, di cui uno orientato NW-SE, riconducibile all'ampio sistema Sud-Tirrenico, intersecato dal sistema orientato NE-SW riconducibile all'ampio sistema Messina-Etna. Il primo sistema ha dato origine al ribassamento progressivo dei fianchi della dorsale; il secondo ha determinato, invece, il ribassamento generale della dorsale verso mare e, nella zona del Teatro, probabilmente, un ribassamento a conca, sul quale è stata inserita la struttura monumentale.

Nel sito del Teatro è presente un substrato calcareo-dolomitico, su cui è stata realizzata la cavea, modellato a gradinata lungo il versante SW della dorsale per effetto dell'assetto strutturale. Nell'area dell'orchestra e della scena il substrato carbonatico è ricoperto di terreni di riporto aventi spessore dell'ordine dei 6-10 m, ivi depositi per la regolarizzazione morfologica del pendio (Fig. 15). I litotipi presenti nel sito del Teatro, individuati con il complesso delle indagini eseguite, sono appresso descritti:

## Terreni di copertura

**TERRENI DI RIPORTO (Tr)** – Si tratta di limo sabbioso, sabbia limosa e, talora, sabbia grossa, di colore dal bruno-giallastro ed ocra al biancastro, con più o meno rari frammenti lapidei eterogenei a spigoli vivi o subarrotondati, di dimensioni centimetriche, e laterizi.

I terreni in oggetto sono stati rinvenuti lungo la verticale dei sondaggi meccanici S1, S2, S3, S4 ed S6 a partire dal piano campagna e fino a profondità comprese fra m 0.40 e m 10.60.

I sondaggi meccanici S1 ed S2, eseguiti, rispettivamente, immediatamente alle spalle della "scena", lungo una stradina che si sviluppa costeggiando il teatro dal lato sud-ovest, e nella zona compresa tra la "cavea" e la "scena", hanno evidenziato spessori notevoli di terreni di riporto pari, rispettivamente, a m 10.60 ed a m 6.40. In tale area la presenza dei terreni di riporto è riconducibile ai riempimenti operati per la sistemazione ed il livellamento della zona della "scena" e della stradella retrostante. Con i sondaggi S3 ed S4, eseguiti a S e SW del sito del teatro, lungo la stradina che verso valle si ricollega alla Via Bagnoli Croci, si sono rinvenuti m 0.60 e m 0.80 di terreni di riporto, riconducibili al sottofondo della stradella stessa; infine, uno spessore di circa m 0.40 di terreno di riporto è stato riscontrato lungo la verticale del sondaggio S6, perforato a valle del teatro, sul lato NE.

**COLTRE DETRITICA (Dt)** – Il deposito è costituito di sabbia e sabbia limosa, di colore bruno, con inclusi frammenti e blocchi lapidei di natura prevalentemente carbonatica a spigoli vivi. Si tratta dei materiali accumulati alla base delle pendici rocciose di M. Tauro, derivanti dalla erosione e disgregazione chimico-fisica delle rocce lapidee di natura calcareo-dolomitica presenti a monte.

Il versante posto immediatamente a valle del Teatro, tra quest'ultimo e la Via Bagnoli Croce, è caratterizzato dalla presenza di una coltre detritica che ricopre i sottostanti terreni di base di natura calcareo-dolomitica. Essa è stata riscontrata con il sondaggio S3 ubicato a Sud del Teatro. Si tratta di limo sabbioso bruno con frammenti carbonatici, ricoperto da una sottile coltre di terreni di riporto, riscontrato fino a profondità di m 5.00 dal p.c.

## Terreni di base

**CALCARI E CALCARI DOLOMITICI (UT)** – I terreni in oggetto costituiscono la dorsale del Monte Tauro e rappresentano i terreni di base nel sito del complesso teatrale. Si tratta di calcari, calcari detritici, biocalcareni algali ed oospatiti, del Lias inf., di colore grigio e bian-

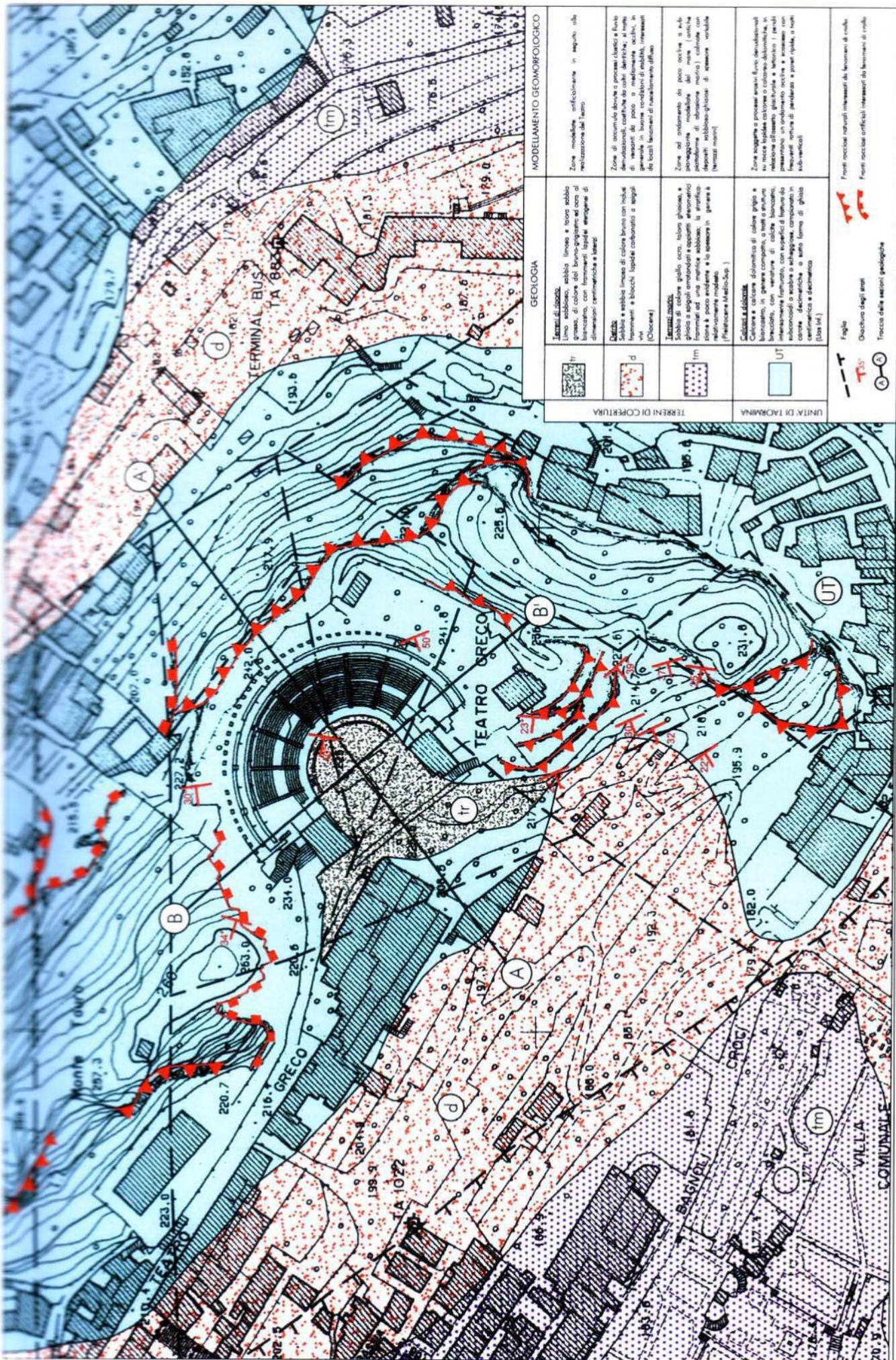


Fig. 14 – Carta geologica e geomorfologica

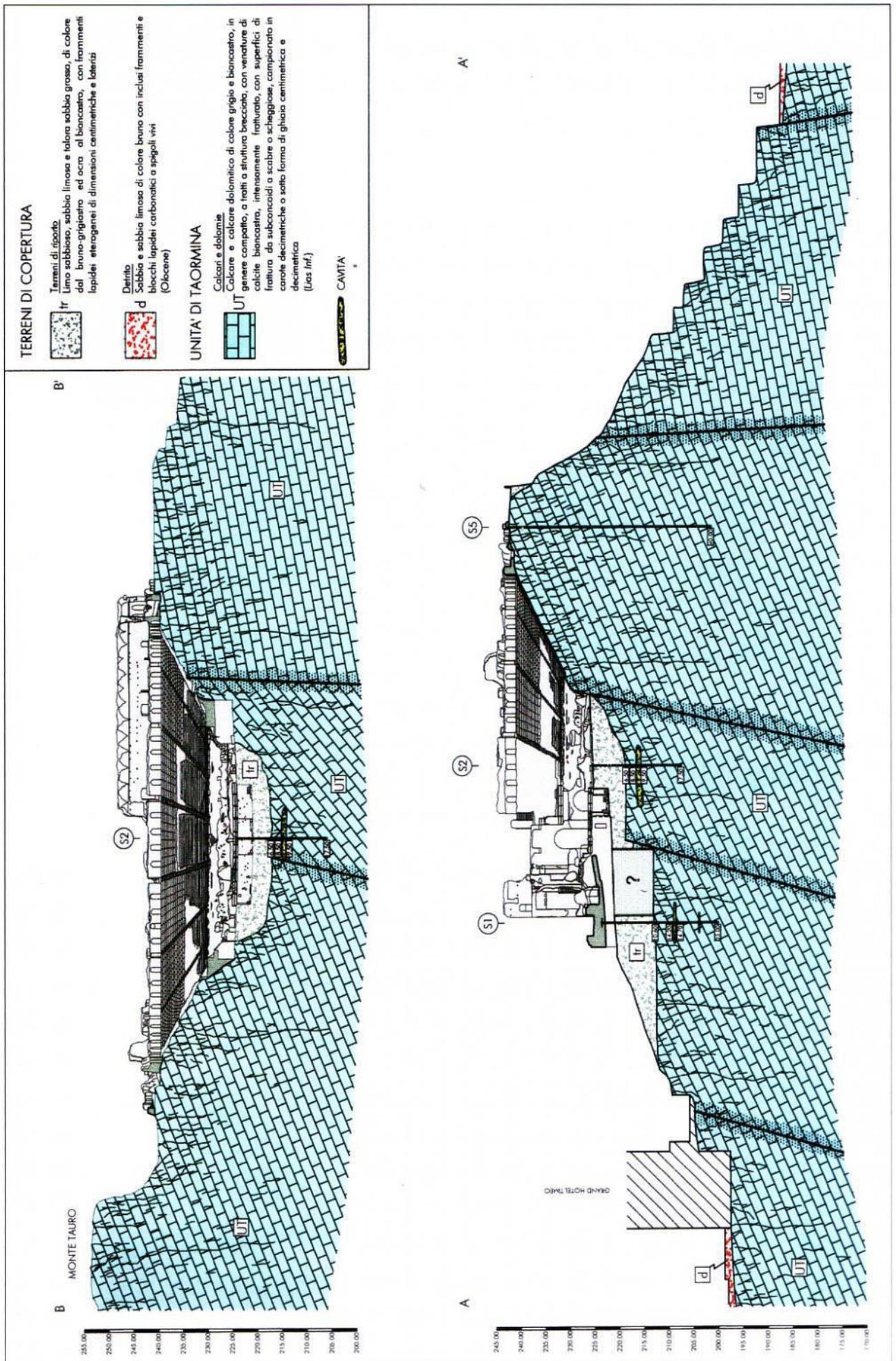


Fig. 15 – Sezioni geologiche

castro, talora dolomitizzati, da massivi a stratificati in banchi di spessore elevato, passanti lateralmente a biopelmicriti grigiastre con rare lenti di selce sottilmente stratificate in livelli di 10-30 cm (V. colonne stratigrafiche riportate in appendice).

Complessivamente l'ammasso roccioso si presenta litologicamente piuttosto omogeneo, ma eterogeneo con riferimento al grado di fratturazione, come risulta dai valori di RQD riportati nelle colonne stratigrafiche.

A varie altezze la roccia presenta microcavità da dissoluzione carsica, talvolta con incrostazioni o riempimenti di calcite secondaria. Lungo le verticali dei sondaggi S1 ed S2 sono state riscontrate cavità, di altezza dai 20 cm ad 1 m al massimo, riempite di limo sabbioso di colore biancastro, sabbia e sabbia grossa con elementi di ghiaia poligenica a spigoli arrotondati. Si tratta di cavità carsiche, in parte modellate dall'erosione marina nei periodi di stazionamento del mare a più alte quote e riempite con il deposito litorale.

Le prospezioni sismiche a rifrazione hanno evidenziato per i terreni calcareo-dolomitici di base velocità delle onde P sempre superiori a 3000 m/s evidenziando una buona generale compattezza della formazione. Valori minimi, al di sotto dei 3000 m/s, indicano un aumento dello stato di fratturazione o condizioni di alterazione e degradazione dell'ammasso roccioso. Più in particolare si sono riscontrati:

- valori di velocità delle onde P compresi fra 3145 e 3974 m/s e delle onde S compresi fra 1699 e 2217 m/s associabili ai calcari e calcari dolomitici compatti, seppure attraversati da discontinuità e campionati in carote decimetriche;
- valori di velocità delle onde P compresi fra 647 e 1114 m/s e delle onde S compresi fra 276 e 445 m/s per la fascia superficiale di calcari e calcari dolomitici alterati e degradati, intensamente fratturati, con patine di ossidazione o limose lungo i giunti;
- valori di velocità delle onde P compresi fra 1072 e 2685 m/s e delle onde S compresi fra 408 e 1435 m/s per i calcari dolomitici più o meno fessurati, caratterizzati dalla presenza di cavità di spessore decimetrico riempite di sabbia e ghiaia;
- valori di velocità delle onde P compresi fra 1153 e 2551 m/s e delle onde S compresi fra 554 e 1333 m/s per i calcari dolomitici intensamente fratturati o per i calcari contenenti intercalazioni calcareo-marnose.

In affioramento, l'ammasso roccioso si presenta in strati di spessore decimetrico o in banchi spessi anche oltre il metro (Foto 9 e 10); in talune zone può presentarsi anche massivo o mal stratificato. Gli strati o ban-

chi hanno giacitura a franapoggio sul versante SW dell'altura su cui è ubicato il Teatro, con direzione all'incirca da N-S a NW-SE, immersione verso W e SW e pendenze comprese tra 25 e 50° (Foto 8). Sono a "reggipoggio" lungo il fronte roccioso a NW del Teatro (Foto 3, ..., 6).

L'ammasso roccioso, inoltre, per l'intensa tettonizzazione strettamente connessa con la sua storia geologica, si presenta intensamente fessurato e fratturato. Esso è interessato da diversi sistemi di discontinuità, sui quali si riferisce nel seguito. Le fratture in superficie sono spesso impregnate di limo bruno-rossastro, derivante dai processi di soluzione dei carbonati (Foto 11) e le microfratture sono suturate da calcite secondaria.

## GEOMORFOLOGIA

L'abitato di Taormina sorge sul promontorio di Capo Taormina, su un ampio terrazzo morfologico che circonda le pendici del rilievo su cui è edificato il Castello e le pendici del Monte Tauro. Quest'ultimo è costituito da una dorsale orientata pressoché NW-SE e rappresenta la naturale prosecuzione verso l'entroterra della dorsale che a SE si protende verso mare, dando luogo al promontorio vero e proprio di Capo Taormina. Il Teatro Greco-Romano di Taormina è sito lungo il versante SW di M. Tauro (Foto 2).

Complessivamente l'assetto geomorfologico, rappresentato nella carta di Fig. 14, riflette l'assetto geologico dell'area. Esso si è modellato con un andamento evolutivo policiclico, inquadrabile nel contesto di una generale tendenza al sollevamento, che ha favorito l'approfondimento delle valli fluviali impostate nei terreni più facilmente erodibili, mettendo, altresì, in risalto le dorsali carbonatiche esumate dalla erosione selettiva.

La dorsale di Monte Tauro è costituita dai terreni calcareo-dolomitici della Unità di Taormina, che offrono una buona resistenza all'erosione in relazione alle loro caratteristiche meccaniche ed allo scarso sviluppo del drenaggio superficiale; essa viene messa in risalto dall'erosione selettiva ed è circondata da aree morfologicamente più depresse, in cui affiorano terreni più facilmente erodibili. Il paesaggio nei terreni carbonatici è, quindi, caratterizzato da versanti molto ripidi, scarsamente incisi, con scarpate di altezza notevole, spesso modellate su piani di faglia.

Nell'ambito della tendenza al sollevamento del rilievo si inquadrano anche i terrazzi marini distinguibili in più ordini, che caratterizzano l'area di Taormina. Essi corrispondono ai resti di antiche piattaforme di abrasione marina, che nel tempo sono state sollevate con la Neotettonica al di sopra del livello marino. La disposi-

zione dei terrazzi a gradinata in più ordini testimonia la tendenza al sollevamento dell'area in periodi successivi, con fasi di stasi in cui si sono modellate le singole piattaforme di abrasione. L'abitato di Taormina, per esempio, è edificato su un ampio terrazzo colmato con depositi sabbioso-ghiaiosi di età Pleistocene medio-sup. Il terrazzo di Taormina si pone a quote comprese fra 200 e 180 m s.l.m. Ulteriori terrazzi più recenti si rinvengono alla quota di circa 150 m s.l.m. in zona cimitero, tra le quote 107 e 90 m s.l.m. e tra 40 e 35 m s.l.m. in zona Capo Taormina.

Durante la fase di modellamento delle piattaforme di abrasione marina, nelle aree emerse più a monte, il paesaggio è stato soggetto, contestualmente, al modellamento fluvio-denudazionale, tuttora in atto. Quest'ultimo è dovuto, soprattutto, alle acque superficiali selvagge e incanalate. Nel sistema morfoclimatico attuale, alle nostre latitudini, il modellamento dei rilievi vede come agente dominante l'acqua, sia per quanto riguarda i processi legati all'azione del ruscellamento ad opera delle acque selvagge, che per i processi di erosione e sedimentazione operati dalle acque incanalate. L'azione dell'acqua differisce a seconda delle litologie interessate, in funzione del loro grado di alterabilità fisica e chimica e del loro grado di erodibilità. Il modellamento fluvio-denudazionale sulle rocce carbonatiche da luogo a versanti acclivi, a tratti ripidi e scoscesi; frequenti sono le rotture di pendenza dovute per lo più all'erosione selettiva o all'assetto giaciturale e strutturale (linee tettoniche) dell'ammasso roccioso. I fronti lapidei si presentano intensamente fratturati e interessati da fenomeni di degradazione meccanica e fenomeni di distacco di volumi rocciosi. Alle aree soggette ai processi erosivi fluvio-denudazionali fanno riscontro le aree di accumulo, rappresentate dalle coltri detritiche poste alla base delle pendici rocciose più ripide.

Nella zona di M. Tauro, sotto il modellamento fluvio-denudazionale, le linee preferenziali della erosione selettiva hanno interessato i piani di faglia ad alto angolo che morfologicamente si esprimono in scarpate subverticali, talora di notevole altezza. Tali scarpate si sono evolute arretrando parallelamente e lasciando al loro piede coltri di materiale detritico. I versanti NE e SW di M. Tauro sono delimitati alla base da ampi terrazzi marini suborizzontali, i quali si raccordano morfologicamente alle ripide pendici carbonatiche attraverso ampie falde detritiche.

Dalle analisi geologico-morfostrutturali effettuate lungo il versante su cui è edificato il teatro attraverso rilievi, fotointerpretazione e profili sismici è stata identificata una faglia ad alto angolo, passante per il centro del teatro e ad orientamento all'incirca ENE-WSW.

Tale discontinuità tettonica rappresenta una zona di debolezza dell'ammasso roccioso, nell'intorno della quale lo stesso ammasso può risultare particolarmente tettonizzato e fratturato; essa può aver dato luogo, per effetto del modellamento fluvio-denudazionale, sotto l'azione delle acque di deflusso superficiale, ad una sorta di depressione iniziale, poi probabilmente ampliata artificialmente per estrazione di materiali da cava. Il Teatro, pertanto, è stato realizzato adattandosi, seppure con parziali interventi di scavo, alla morfologia dei luoghi, che ben si prestava alla realizzazione della cavea, mentre per la realizzazione della zona orchestra e scena sono state necessarie parziali opere di rinterro per la regolarizzazione morfologica dei luoghi.

Il Teatro è circondato da pendici carbonatiche piuttosto ripide, con scarpate subverticali di cui buona parte sono naturali, attribuibili a scarpate di faglia esumate dalla erosione selettiva o scarpate determinate dall'affiorare delle testate dei banconi carbonatici a "franapoggio" messi in evidenza dalla erosione selettiva medesima. Sono frequenti, inoltre, le scarpate artificiali dovute ad attività di sbancamento operate a seguito della intensa antropizzazione circostante l'area del Teatro.

Nell'ambito del quadro geomorfologico sopraesposto emergono sostanzialmente due significative situazioni di criticità, che possono in qualche modo compromettere sia lo stato di conservazione e le condizioni di sicurezza strutturale del bene archeologico-monumentale, sia le condizioni di sicurezza del flusso turistico e della fruizione teatrale vera e propria. Esse riguardano:

- *La problematica del distacco di volumi lapidei dai fronti rocciosi esposti* (Foto 3, ..., 7)

Le pendici che contornano l'area del Teatro sono costituite da ammassi rocciosi calcarei e calcareo-dolomiti di colore da biancastro a grigio in strati e banchi o massivi. L'assetto geostrutturale di tali ammassi rocciosi è piuttosto articolato in relazione alla storia tettonica del complesso montuoso cui appartengono; essi sono stati interessati da diverse fasi deformative che hanno dato luogo a strutture duttili e fragili che attraversano la successione carbonatica spesso con carattere di pervasività.

Nel complesso la struttura di M. Tauro appare interessata da diversi sistemi di faglie dispersi su andamenti prevalenti NW-SE, NE-SW e E-W. A questi sistemi sono spesso associati fasci di giunti di secondo ordine, ad andamento parallelo alle discontinuità principali, che contribuiscono, in maniera differente, ad influenzare le condizioni generali di stabilità degli ammassi

rocciosi in relazione ai rapporti geometrici che assumono rispetto alla giacitura degli strati e dei fronti esposti, sia naturali che artificiali. La deformazione fragile interessa gli ammassi rocciosi fino alla mesoscala, conferendo ai medesimi le caratteristiche di un mezzo rigido discontinuo, in cui le varie superfici di discontinuità, intersecandosi, isolano volumi lapidei di forma e dimensioni variabili. Lungo i fronti rocciosi sono osservabili, pertanto, elementi lapidei disarticolati dall'ammasso roccioso retrostante, per effetto della intersezione reciproca delle superfici di discontinuità e di queste con i fronti stessi, in equilibrio instabile. Il volume degli elementi lapidei isolati è variabile in relazione alle caratteristiche di persistenza e di spazatura delle discontinuità. In qualche caso, queste ultime presentano aperture superiori a qualche centimetro e riempimenti di limo residuale misto a materiale detritico.

In tali condizioni sono "cinematicamente" possibili dissesti di entità variabile, che vanno dal semplice crollo di blocchi di modeste dimensioni al distacco di massi tetraedrici, cuneiformi o prismatici di grandi proporzioni.

Tali fenomeni sono da ricondurre:

- alla geometria delle discontinuità orientate sfavorevolmente rispetto ai fronti rocciosi;
- ai processi di degradazione dei fronti rocciosi dovuti agli agenti esogeni ed esaltati dalla fitta rete di giunti;
- alla presenza di incavamenti di origine marina o carsica, talora ulteriormente spinti per effetto dell'erosione selettiva, delimitati superiormente da elementi a sbalzo, a luoghi separati dall'ammasso roccioso da giunti subverticali;
- alle azioni operate dalle spinte idrostatiche prodotte dall'acqua circolante all'interno dei giunti: l'accumulo dell'acqua all'interno delle fratture, in occasione di elevate precipitazioni, può determinare la saturazione del materiale limoso-detritico di riempimento;
- alle vibrazioni prodotte da eventi sismici, anche di modesta magnitudo;
- all'effetto cuneo prodotto dalle radici della vegetazione rupestre;
- agli eventuali cedimenti di materiali limoso-argillosi all'interno di giunti suborizzontali o inclinati a "franapoggio".

Tali cause, spesso tra loro concomitanti, comportano l'innescarsi sui fronti di collassi localizzati che, con caratteristiche di irreversibilità, portano al conseguente distacco di volumi rocciosi.

- *La problematica del deflusso incontrollato delle acque superficiali* (Foto 12).

L'area del Teatro è soggetta ad un continuo degrado per effetto degli agenti atmosferici. Più in particolare, nell'area delle gradinate, in occasione di eventi meteorici intensi, le acque meteoriche, sia quelle che interessano direttamente le gradinate, che quelle che si raccolgono nella zona del portico presente a monte, ruscellano incontrollate verso l'arena. Tali aree sono caratterizzate da uno strato superficiale di terreni sabbiosi e sabbioso-limosi sciolti, per cui le acque, scorrendo lungo i viottoli ed i camminamenti o tra i vari settori delle gradinate, esercitano un'azione dilavante, asportando i materiali più fini e più facilmente erodibili, che vengono convogliati a valle, nell'arena, in quantità talora ingenti.

## CARATTERISTICHE GEOSTRUTTURALI DELL'AMMASSO ROCCIOSO

Al fine di acquisire i dati riguardanti le caratteristiche strutturali dell'ammasso calcareo, sono stati effettuati rilievi geostretturali in corrispondenza di diverse stazioni di misura ubicate in varie zone dei costoni lapidei che perimetrano il Teatro, indicate nella planimetria di Fig. 13, operando anche in cordata (Foto 13).

I rilievi sono stati effettuati sia lungo "scanlines", ossia lungo rette orientate sui fronti di rilievo, sia in maniera "random", rilevando le caratteristiche delle principali superfici di discontinuità presenti nel tratto di fronte di indagine.

Complessivamente sono state rilevate le grandezze caratteristiche (v. Appendice C) di 417 superfici di discontinuità, delle quali: 250 nella parete lapidea nord-ovest; 116 nella parete rocciosa sud; le rimanenti 51 all'interno del Teatro.

Di seguito vengono presentati i risultati ottenuti mediante le elaborazioni statistiche dei dati misurati in situ, effettuate con le modalità illustrate nell'Appendice citata.

### A) Orientazione

I risultati delle elaborazioni delle misure di orientazione relative a ciascun rilievo sono rappresentati nei diagrammi circolari di Schmidt di Fig. 16, contenenti ciascuno:

1. il complesso dei poli relativi alle superfici di discontinuità oggetto delle misure, distinguendo i piani di stratificazione (poli triangolari) dai giunti di natura tettonica (poli quadrati);
2. le curve isofrequenziali e le relative percentuali di frequenza di comparizione. Dall'esame di tali curve

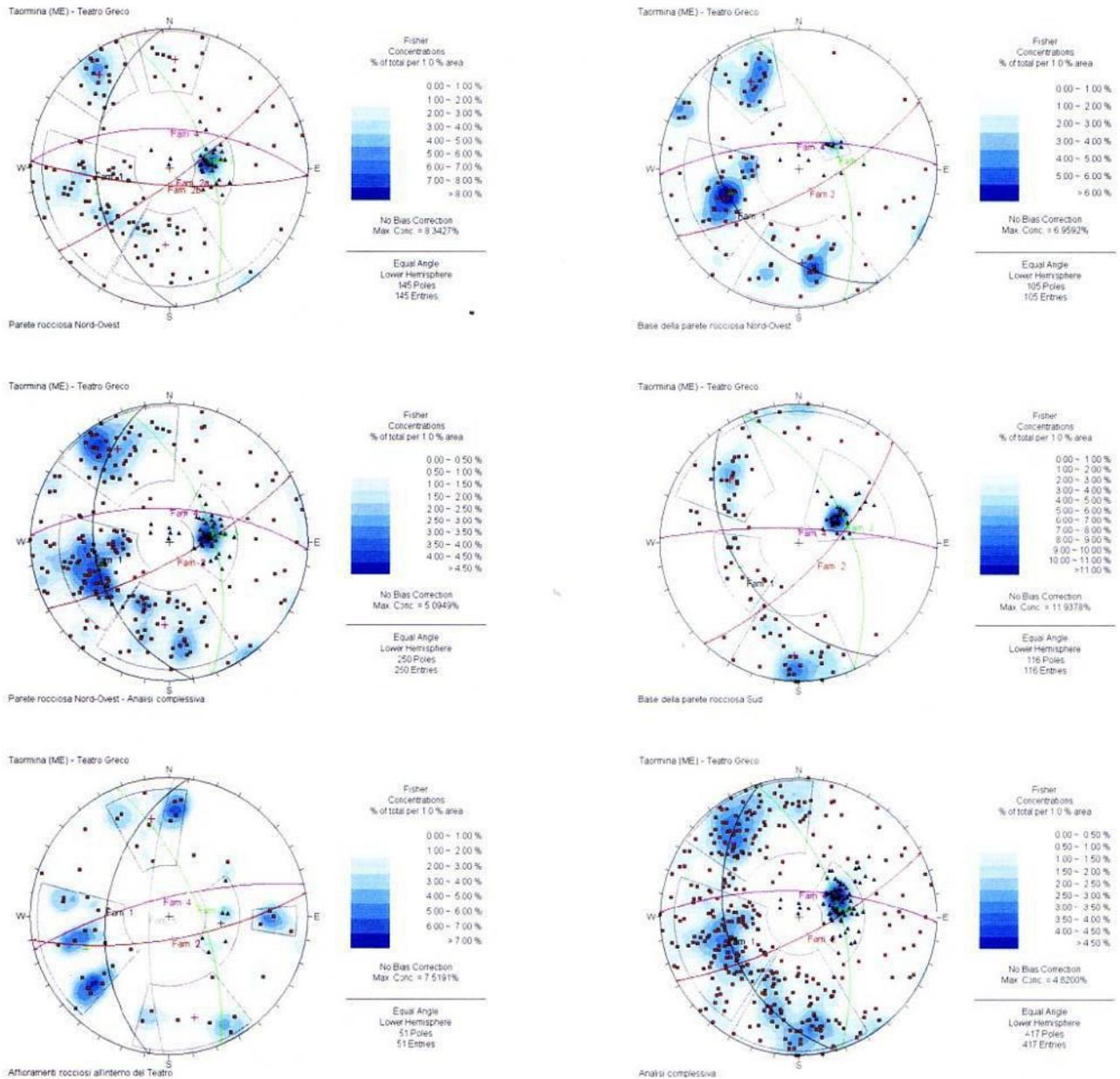


Fig. 16 – Elaborazione statistica delle misure di orientazione

si desumono il numero e le caratteristiche di orientazione delle famiglie di discontinuità presenti nell'ammasso roccioso;

3. i meridiani rappresentativi dei singoli raggruppamenti di discontinuità, che vengono individuati con le cifre 1,...,n.

Dall'esame delle figure citate risulta che nell'ammasso roccioso sono presenti 4 sistemi di discontinuità, ed in particolare (Foto 3,..., 6):

- la *famiglia 1* è costituita dai piani di stratificazione, mediamente inclinati di  $35^\circ$  circa sull'orizzontale, ben visibili sui fronti rocciosi dell'area in studio;
- il *sistema 2* raggruppa discontinuità subverticali, perpendicolari ai piani di stratificazione, subparallele al fronte roccioso della parete nord-ovest (incombente sul Teatro), che individuano le facce anteriore e posteriore degli elementi lapidei in equilibrio instabile su essa presenti.

- il *raggruppamento 3* comprende giunti, mediamente inclinati di circa  $60^\circ$ , ortogonali alle discontinuità del sistema 2 e, quindi, perpendicolari al fronte lapideo incombente sul Teatro, che individuano le facce laterali degli elementi lapidei indicati nelle foto citate;
- alla *famiglia 4* appartengono giunti subverticali, con azimuth che differisce di  $210^\circ$  circa rispetto a quello dei giunti della famiglia 2.

Nella Tab. III, sono riportati, in corrispondenza di ciascun rilievo, i valori degli angoli  $\alpha_m$  e  $\beta_m$  di massima densità, che si assumono come "medi statistici" di ciascun raggruppamento di discontinuità, la dispersione media da tali valori e la relativa frequenza di comparizione. Dall'esame della tabella è evidente che le caratteristiche di orientazione dell'ammasso roccioso non differiscono in maniera significativa con l'ubicazione della stazione di rilievo; di conseguenza, per le conside-

Famiglie principali	1				2				3				tipo di disc.
	tipo di disc.	$\alpha_m$ (°)	$\beta_m$ (°)	$\rho_{max}$ (%)	tipo di disc.	$\alpha_m$ (°)	$\beta_m$ (°)	$\rho_{max}$ (%)	tipo di disc.	$\alpha_m$ (°)	$\beta_m$ (°)	$\rho_{max}$ (%)	
Parete rocciosa Nord-Ovest	Strato	34 +/- 12	267 +/- 12	> 8	Giunto	a) 80 +/- 12 b) 76 +/- 13	a) 143 +/- 12 b) 183 +/- 13	a) 5-6 b) 2-3	Giunto	58 +/- 24	71 +/- 24	4-5	Giunto
Base della parete rocciosa Nord-Ovest		34 +/- 6	235 +/- 6	3-4		71 +/- 13	151 +/- 13	5-6		56 +/- 19	71 +/- 19	> 6	
Base della parete Sud		41 +/- 14	235 +/- 14	> 11		68 +/- 16	133 +/- 16	6-7		49 +/- 18	67 +/- 18	3-4	
Affioramenti rocciosi all'interno del Teatro		41 +/- 22	278 +/- 22	3-4		71 +/- 18	170 +/- 18	6-7		65 +/- 24	68 +/- 24	> 7	
Parete rocciosa Nord-Ovest - Analisi complessiva		33 +/- 16	260 +/- 16	> 4,5		75 +/- 17	151 +/- 17	4-4,5		55 +/- 20	72 +/- 20	4-4,5	
Analisi complessiva		34 +/- 15	254 +/- 15	> 4,5		74 +/- 19	152 +/- 19	3,5-4		57 +/- 23	72 +/- 23	2,5-3	

Tab. III - Riepilogo dei risultati della elaborazione statistica delle misure di orientazione

razioni relativa alla stabilità dei fronti rocciosi, si è fatto riferimento ai valori medi statistici degli angoli di inclinazione e dell'azimut delle quattro famiglie di discontinuità ricavate con l'analisi statistica relativa la complesso delle misure eseguite.

### B) "Fracture intercept"

Le elaborazioni relative al parametro "fracture intercept"  $\lambda$  sono raccolte nella Fig. 17: si tratta di istogrammi con il numero di discontinuità  $\lambda$  per metro di "scanline" al variare di x, ascissa della "scanline" medesima.

I valori di  $\lambda$  oscillano in un intervallo ampio, compreso tra 3 e circa 18 disc/m, per cui l'ammasso roccioso risulta da "poco" a "molto" fratturato. Si ha, quindi, conferma di quanto visibile direttamente sui luoghi e dei risultati delle misure di RQD effettuate in corrispondenza delle verticali esplorate con i sondaggi meccanici a carotaggio continuo, e cioè che il grado di fratturazione dell'ammasso roccioso è assai variabile anche con riferimento a zone di ampiezza limitata dei costoni lapidei. Ne segue che le dimensioni dei blocchi rocciosi in cui l'ammasso roccioso risulta suddiviso dalle superfici di discontinuità in esso presenti variano da "piccole" (volume inferiore al metro cubo), a "medie" e "grandi" (volume dell'ordine di diversi metri cubi o delle decine e anche centinaia di metri cubi).

### C) Apertura e persistenza

I risultati dell'elaborazione dei dati rilevati in situ sono presentati sotto forma di istogrammi, in cui vengono definite le frequenze percentuali di comparizione dei valori di apertura  $a$  e persistenza  $p$  che ricadono all'interno di specifici intervalli, indicati in letteratura.

Con riferimento all'apertura, sono stati ottenuti gli istogrammi di Fig. 18, ciascuno relativo alle discontinuità appartenenti ai singoli raggruppamenti presenti nell'ammasso roccioso.

In tutti i casi, la legge di distribuzione dei valori di apertura sembra "bimodale", con massimi in corrispon-

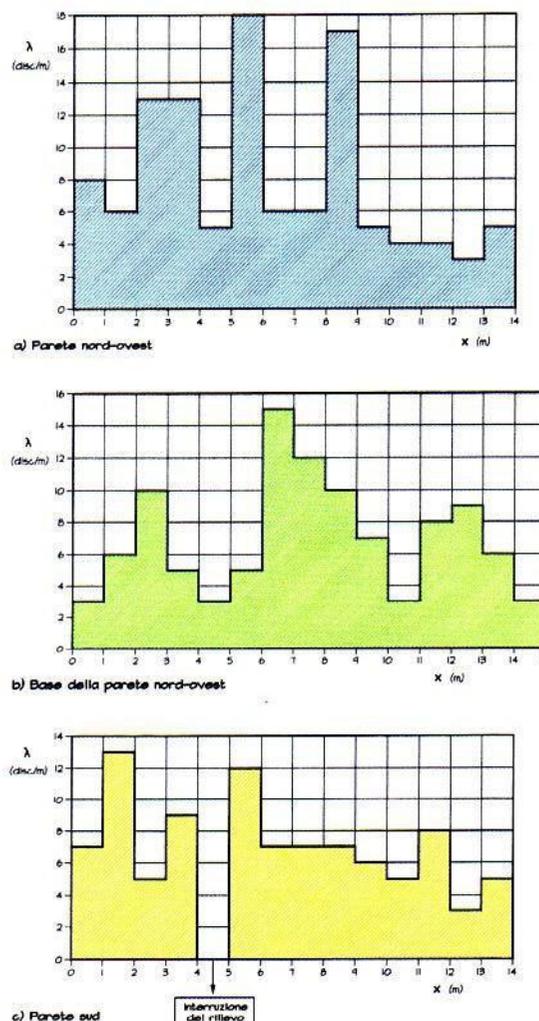


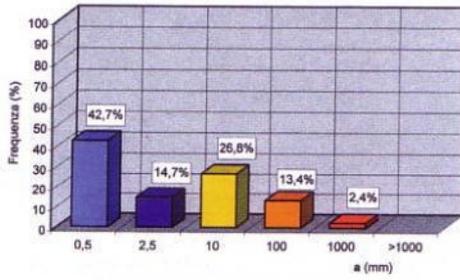
Fig. 17 - Istogrammi relativi ai valori della "fracture intercept"  $\lambda$  lungo le "scanlines"

denza degli intervalli  $a < 0.5$  mm e  $2.5$  mm  $\leq a < 10$  mm. Nel dettaglio:

- le discontinuità "chiuse", ossia caratterizzate da apertura inferiore a 0,5 mm, sono presenti con frequenza compresa tra 42.4% (famiglia 2) e 52.0% (famiglia 3);
- le discontinuità "aperte" ( $0.5$  mm  $\leq a < 2.5$  mm) sono caratterizzate da frequenze che oscillano tra 8.0% (famiglia 3) e 14.7% (famiglia 1);
- la frequenza delle discontinuità "molto aperte" ( $2.5$  mm  $< a \leq 10$  mm) varia tra 20.0% (famiglia 3) e 32.6%;

FAMIGLIA 1

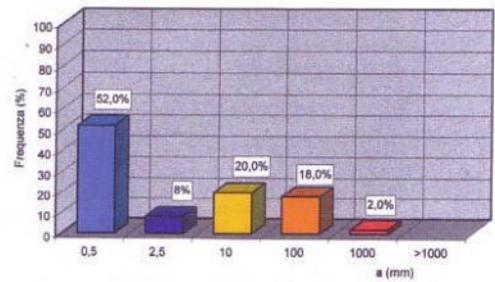
N = 82



Valori % per classi di apertura delle discontinuità

FAMIGLIA 3

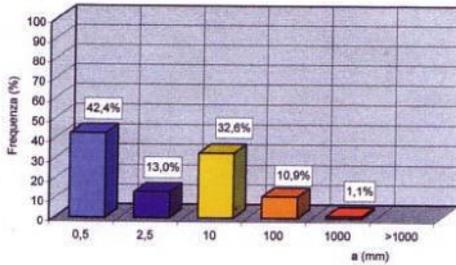
N = 100



Valori % per classi di apertura delle discontinuità

FAMIGLIA 2

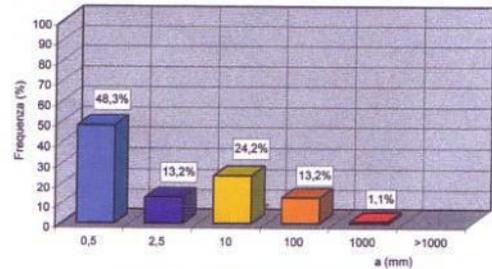
N = 92



Valori % per classi di apertura delle discontinuità

FAMIGLIA 4

N = 91



Valori % per classi di apertura delle discontinuità

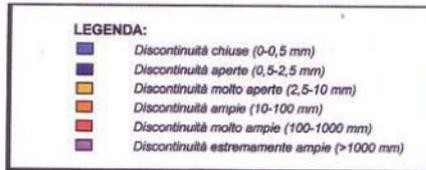
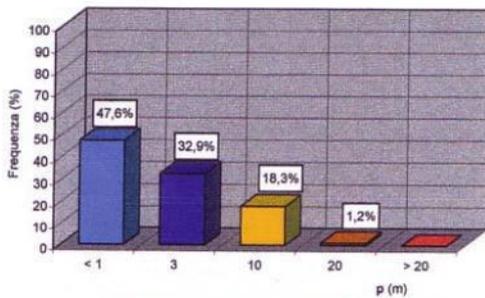


Fig. 18 - Elaborazione statistica dei valori di apertura

FAMIGLIA 1

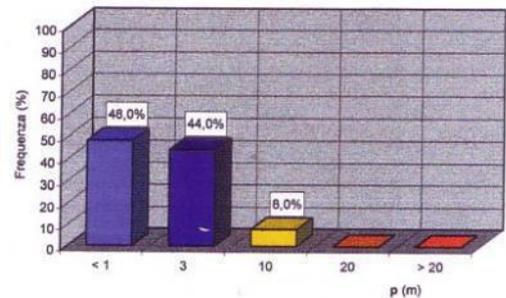
N = 82



Valori % per classi di persistenza delle discontinuità

FAMIGLIA 3

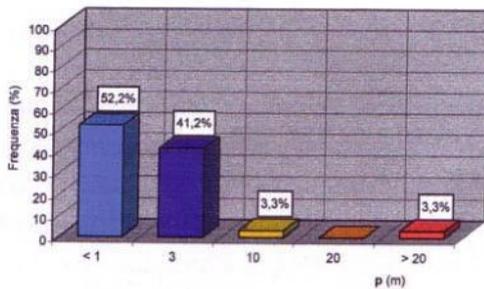
N = 100



Valori % per classi di persistenza delle discontinuità

FAMIGLIA 2

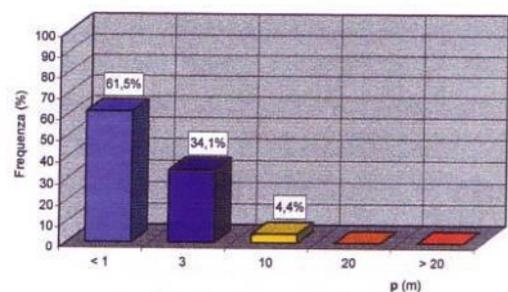
N = 92



Valori % per classi di persistenza delle discontinuità

FAMIGLIA 4

N = 91



Valori % per classi di persistenza delle discontinuità

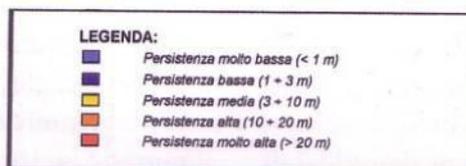


Fig. 19 - Elaborazione statistica dei valori di persistenza

- le discontinuità con aperture superiori al centimetro si presentano con frequenza in genere inferiore al 15%.

Le elaborazioni relative ai valori di persistenza sono illustrate nella Fig. 19: la legge di distribuzione dei valori di  $p$  nei vari intervalli indicati dall'ISRM è "unimodale" con massimo in corrispondenza di  $p < 1.0$  m (persistenza "molto bassa"); tuttavia, in tutti i casi, circa il 50% delle discontinuità rilevate (famiglie 1, 2 e 3) o poco meno del 40% (raggruppamento 4) presentano persistenza superiore ad 1 m. I valori maggiori sono stati ottenuti in corrispondenza dei piani di stratificazione, in quanto quasi il 20% presenta persistenze maggiori o uguali a 3.0 m, mentre per le altre famiglie la concentrazione relativa all'intervallo  $p \geq 3.0$  m è sempre inferiore al 10%.

In definitiva, dal complesso delle elaborazioni innanzi illustrate possono desumersi le seguenti conclusioni:

1. l'apertura delle discontinuità varia poco con la famiglia di appartenenza. In generale i giunti presentano aperture molto basse e, comunque, inferiori allo spessore delle asperità presenti nel profilo della superficie della discontinuità medesima. I valori maggiori, dell'ordine del decimetro e oltre, sono stati misurati soprattutto in corrispondenza di alcuni blocchi in equilibrio instabile, che hanno già subito spostamenti e/o rotazioni;
2. la persistenza delle superfici di discontinuità, pur essendo bassa, è tale che le superfici di discontinuità influenzano comunque in maniera significativa il

comportamento meccanico dell'ammasso roccioso, in quanto tale grandezza è frequentemente superiore o poco inferiore al metro.

#### D) Parametro JRC

Il profilo delle pareti della medesima discontinuità è stato caratterizzato tramite il coefficiente JRC ("Joint Roughness Coefficient" – indice della scabrezza delle superfici delle discontinuità).

Ai valori del coefficiente JRC, ottenuti per confronto dei profili di discontinuità rilevati in sito con il "profilometro" o "shape tracer" con quelli "standard" proposti da Barton e codificati dall'I.S.R.M. (vedi Appendice C), si riferisce la Fig. 20: si tratta di istogrammi con le frequenze di comparizione dei valori di JRC ottenuti in corrispondenza delle discontinuità appartenenti ai 4 raggruppamenti rinvenuti nell'ammasso roccioso. E' risultato che in tutti i casi:

- la maggiore frequenza di comparizione si verifica in corrispondenza dell'intervallo  $JRC=12 \div 14$ , con percentuali che oscillano dal 37% circa (famiglia 1) al 43% circa (famiglia 2);
- si ha  $JRC \geq 8$  con frequenze variabili tra 89% (famiglia 4) e 94% (famiglia 2).

In conclusione, i valori di JCR sono mediamente elevati; come valore medio statistico rappresentativo di tutti i sistemi di discontinuità si può assumere:

$$JRC_m = 13$$

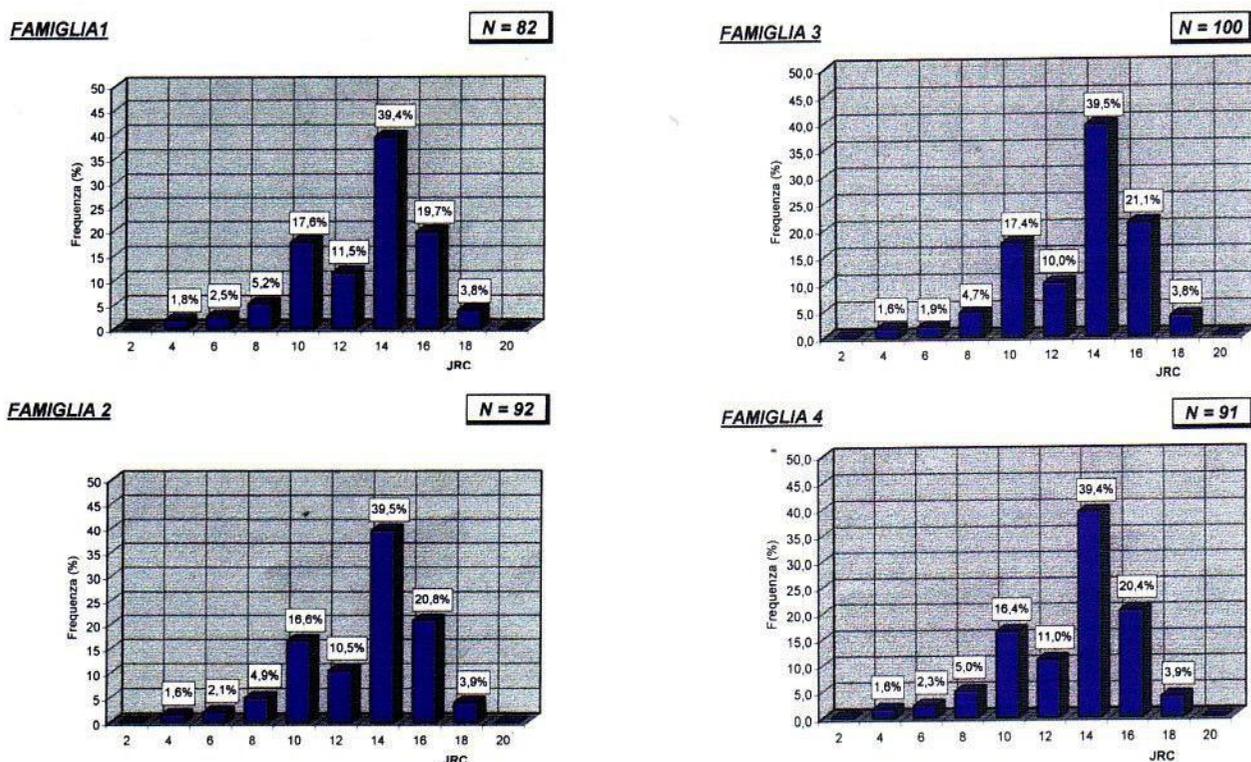


Fig. 20 - Elaborazione statistica dei valori del coefficiente JRC

## CARATTERISTICHE MECCANICHE DELL'AMMASSO ROCCIOSO

Su campioni cilindrici di roccia prelevati lungo i fori di sondaggio, previa regolarizzazione delle basi mediante sega diamantata, sono state effettuate prove di laboratorio di rottura per:

- compressione monoassiale;
- taglio diretto lungo giunti creati artificialmente;
- taglio in corrispondenza di giunti naturali presenti nella roccia.

Nella Tab. IV sono riportati i risultati delle prove di rottura per compressione monoassiale; in corrispondenza di ciascun provino di forma cilindrica, univocamente determinato con la sigla del sondaggio e la profondità di prelievo, sono indicati:

- le dimensioni  $h$  = altezza e  $d$  = diametro;
- il rapporto  $h/d$ ;
- il peso  $P$ ;
- il valore del peso dell'unità di volume  $\gamma$  della roccia;
- il fattore di correzione funzione del rapporto  $h/d$ ;
- la tensione di rottura  $\sigma_f^P$  ottenuta con la prova;
- la tensione di rottura normalizzata  $\sigma_f = f \times \sigma_f^P$ , rappresentativa della effettiva resistenza a compressione del materiale;
- la descrizione del provino.

- "media", se si prende in esame il valore di  $104.8 \text{ N/mm}^2$ .

Il peso dell'unità di volume  $\gamma$  della roccia oscilla tra  $25.0 \text{ kN/m}^3$  e  $27.4 \text{ kN/m}^3$ ; il valore medio è pari a  $26.6 \text{ kN/m}^3$ .

I parametri di resistenza al taglio lungo le discontinuità dipendono da vari fattori, quali:

- i valori di apertura delle discontinuità;
- lo spessore dell'eventuale materiale di riempimento e le relative caratteristiche meccaniche;
- la rugosità delle pareti dei giunti almeno, come ha dimostrato Goodman, nei casi in cui l'altezza delle asperità in esse presenti è superiore allo spessore del materiale di riempimento.

Nel caso specifico è stato osservato che, in generale, le discontinuità si presentano con valori di apertura molto bassi e, comunque, lo spessore dell'eventuale riempimento è inferiore all'altezza delle asperità. Tale constatazione, basata sull'esame diretto delle superfici di discontinuità rilevate, ha trovato conferma dall'analisi di laboratorio condotta sui campioni estratti lungo le verticali esplorate con i fori di sondaggio. Di conseguenza, la sperimentazione di laboratorio è stata sviluppata con l'obiettivo di risalire alle caratteristiche di

SONDAGGIO	CAMPIONE	PROFONDITA'	h	d	h/d	P	$\gamma$	f	$\sigma_f^P$	$\sigma_f$	DESCRIZIONE
		(m)	(mm)	(mm)		(g)	( $\text{kN/m}^3$ )		( $\text{N/mm}^2$ )	( $\text{N/mm}^2$ )	
S1	C2	17,00	165	79	2,09	2025,5	25,0	1,005	72,8	73,2	Roccia carbonatica di colore variabile dal grigio al giallastro, a grana molto fina, attraversata da vene di calcite che possono raggiungere uno spessore di 2 mm. Presenza di calcite cristallina e di qualche cavità di forma circolare del $d_{\text{max}} = 2 \text{ mm}$
S2	C2	11,80	185	79	2,34	2389,8	26,4	1,019	50,8	51,7	Calcere di colore grigio compatto e ben cementato, con numerose patine di ossidazione giallastre e pigmento, attraversato da numerose sottili vene di calcite cristallina
S3	C3	18,70	161	79	2,04	2121,5	26,9	1,002	129,3	129,6	Calcere di colore grigio compatto e ben cementato, attraversato da vene di calcite che possono raggiungere uno spessore di 2 mm. Presenza di calcite cristallina
S3	C4	19,20	163	79	2,06	2120,8	26,5	1,004	59,2	59,4	Calcere di colore grigio, compatto e ben cementato, a grana molto fina, attraversato da vene di calcite che possono raggiungere uno spessore di 2 mm
S4	C2	21,60	169	82	2,06	2395,6	26,8	1,004	146,0	146,5	Calcere di colore grigio, compatto e ben cementato, a grana molto fina, attraversato da vene di calcite che possono raggiungere uno spessore di 2 mm
S4	C3	1,50	164	79	2,08	2144,2	26,7	1,005	127,3	127,9	Calcere di colore grigio, compatto e ben cementato, a grana molto fina, attraversato da vene di calcite che possono raggiungere uno spessore di 2 mm. Presenza di calcite cristallina e di materiale marmoso
S5	C2	28,60	165	78	2,12	2159,8	27,4	1,007	128,1	129,0	Calcere di colore grigio, compatto e ben cementato, a grana molto fina, attraversato da vene di calcite che possono raggiungere uno spessore di 2 mm
S5	C3	33,00	157	78	2,01	2041,6	27,2	1,001	125,2	125,3	Calcere di colore grigio, compatto e ben cementato, a grana molto fina, attraversato da vene di calcite che possono raggiungere uno spessore di 2 mm

Tab. IV - Risultati delle prove di rottura per compressione monoassiale

I valori della tensione di rottura sono compresi tra  $50.8 \text{ N/mm}^2$  e  $146.0 \text{ N/mm}^2$  con un valore medio di  $104.8 \text{ N/mm}^2$ . In base alle classificazioni di Miller (1966) e ISRM (1979), la roccia risulta di resistenza:

- compresa tra "media" e "alta", con riferimento ai valori estremi dell'intervallo, innanzi citati;

resistenza la taglio della roccia lungo le discontinuità.

Nella Tab. V sono indicati:

- i provini sottoposti a prove di taglio, univocamente individuati tramite la sigla della verticale di prelievo e la profondità di estrazione;
- il tipo di prova, se lungo giunti artificiali, creati

mediante sega diamantata (TDA), o naturali (TDN);

- la tensione verticale  $\sigma$  mantenuta costante durante la prova;
- i valori della tensione tangenziale di picco  $\tau_p$  e finale  $\tau_f$  raggiunte nel corso della prova;
- l'angolo di dilatanza  $d_n$  determinato come illustrato nel seguito.

Per la determinazione della resistenza al taglio della roccia lungo le superfici di discontinuità si è fatto riferimento sia alla sperimentazione diretta con le citate prove di taglio lungo giunti naturali, sia al criterio di rottura teorizzato da Barton, che utilizza parametri valutati in laboratorio (l'angolo di attrito base su cui si è innanzi riferito) e in situ (coefficiente JRC).

a) sperimentazione diretta

SONDAGGIO	CAMPIONE	PROFONDITA' (m)	PROVA	$\sigma$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\tau_p$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\tau_f$ (N/mm <sup>2</sup> )	$d_n$ (°)
S1	C1	13,80	TDA	0,350	0,179	---	---
S2	C1	17,30	TDA	0,200	0,148	---	---
S4	C4	17,50	TDA	0,100	0,075	---	---
S5	C4	10,00	TDA	0,050	0,035	---	---
S3	C1	8,10	TDN	0,200	0,391	0,264	22,5
S3	C2	14,70	TDN	0,330	0,482	0,352	25,0
S4	C1	3,10	TDN	0,100	0,144	0,144	12,0
S5	C1	3,80	TDN	0,050	0,132	0,098	-9,0

Tab. V - Risultati delle prove di taglio lungo le superfici di discontinuità

Tramite le prove di taglio lungo giunti artificiali si ottengono informazioni sull'angolo di attrito base  $\phi'_b$ . I punti sperimentali sono riportati sul piano  $\tau, \sigma$  di Fig. 21: tre dei quattro punti si allineano lungo la retta di equazione:

$$\tau = \sigma \cdot \text{tg } 36^\circ$$

Il punto sperimentale ottenuto in corrispondenza della massima tensione verticale di prova ricade lungo la retta passante per l'origine caratterizzata da un coefficiente angolare pari alla tangente di  $27^\circ$ . Tenuto conto di quanto riportato in letteratura a proposito dei valori di  $\phi'_b$  per la roccia calcarea, compresi tra  $33^\circ$  e  $40^\circ$ , si ritiene rappresentativo il valore ricavato mediante l'interpolazione dei tre punti ottenuti con tensioni verticali comprese tra  $0.05 \text{ N/mm}^2$  e  $0.2 \text{ N/mm}^2$ . Si assume, cioè:

$$\phi'_b = 36^\circ$$

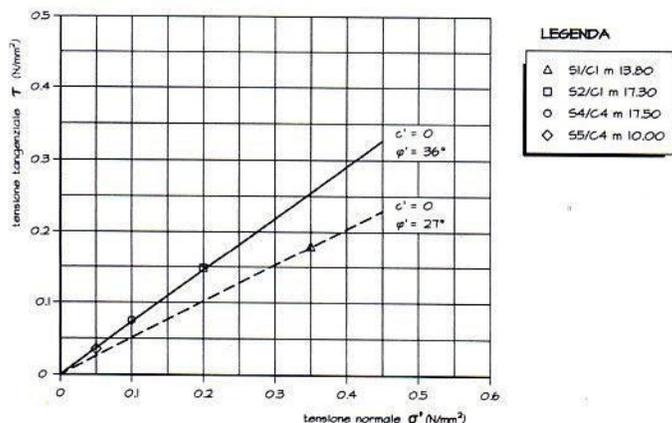


Fig. 21 - Risultati delle prove di taglio lungo giunti artificiali

Nella Fig. 22 sono riportati:

1. sul piano di Mohr (diagramma  $\tau, \sigma$ ), i punti sperimentali ottenuti con il complesso delle prove eseguite, rappresentativi della resistenza al taglio "di picco" e "finale" della roccia lungo le discontinuità naturali;

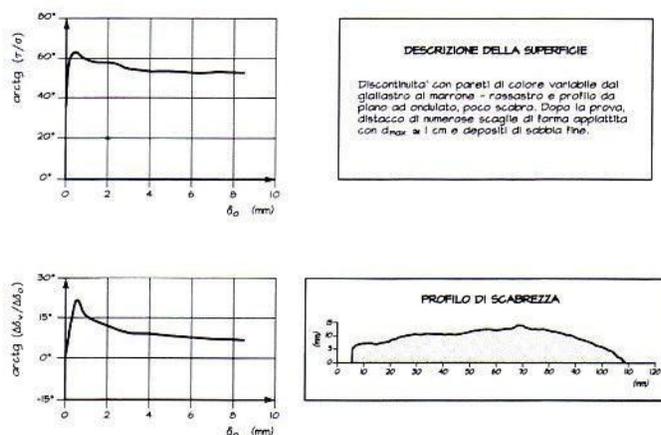
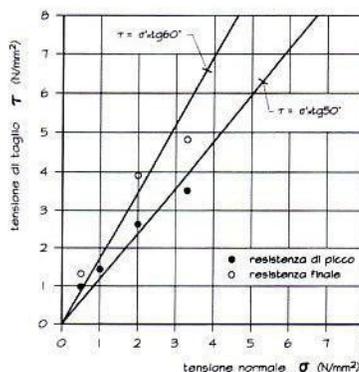


Fig. 22 - Risultati delle prove di taglio lungo giunti naturali

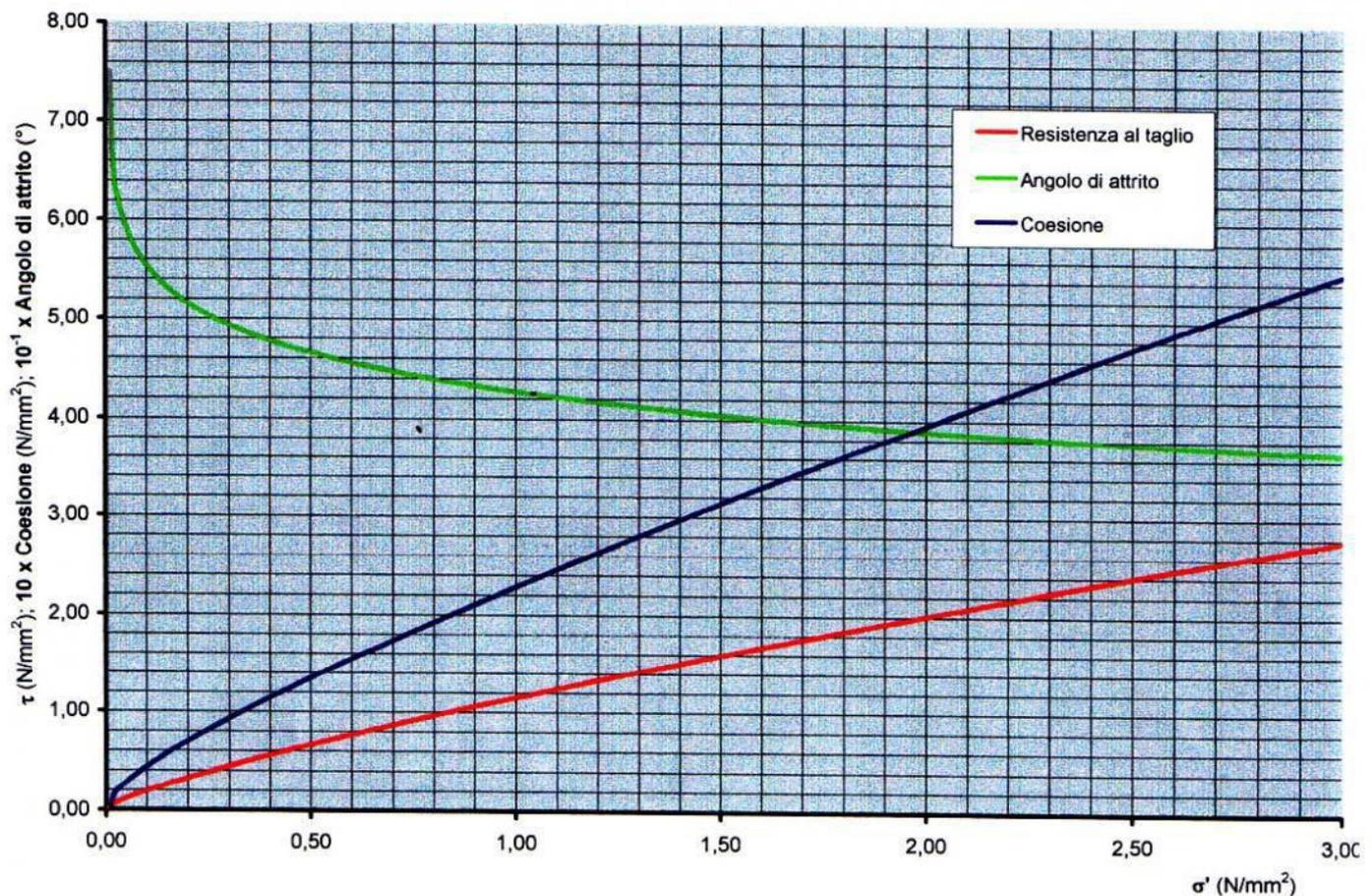


Fig. 23 – Resistenza al taglio della roccia lungo le discontinuità secondo il criterio di rottura di Barton

2. i risultati dell'elaborazione di una prova singola, comprendenti:

- il grafico  $\arctg(\tau/\sigma) = f(\delta_0)$ , essendo  $\delta_0$  lo spostamento orizzontale misurato nel corso della prova;
- il grafico  $\arctg(\Delta\delta_v/\Delta\delta_0) = f(\delta_0)$ , essendo  $\delta_v$  lo spostamento verticale misurato nel corso della prova;
- la descrizione della superficie di discontinuità lungo la quale si è provocato lo scorrimento;
- la rappresentazione grafica del profilo di scabrezza del giunto.

Mediante il primo dei due grafici si ottengono informazioni sull'angolo di attrito apparente sia di picco (massimo valore), sia finale, relativo, cioè, alle grandi deformazioni; tramite il secondo, sull'angolo di dilatanza, i cui valori sono stati riportati nella Tab. V. Dall'interpolazione dei punti sperimentali ottenuti con le singole prove, risulta:

- angolo di attrito apparente di picco  $\phi'_p \cong 60^\circ$ ;
- angolo di attrito apparente finale  $\phi'_f \cong 50^\circ$ .

Come valore medio della dilatanza può assumersi (Tab. V):

$$d_n = 17^\circ$$

b) criterio di rottura proposto da Barton

Secondo Barton, la relazione che lega le tensioni tangenziale e normale in condizioni di equilibrio limite è la seguente:

$$\tau = \sigma' \cdot \text{tg}(d_n + \phi'_b) \quad (1)$$

ove con  $d_n$  ed  $\phi'_b$  si sono indicati, rispettivamente, gli angoli di dilatanza e base.

Per l'angolo di dilatanza  $d_n$ , l'autore fornisce la seguente espressione:

$$d_n = \text{JRC} \cdot \text{Log}_{10}(\text{JCS}/\sigma') \quad (2)$$

Secondo Barton la dilatanza risulta, cioè, funzione di due parametri: il primo, denominato JRC ("joint roughness coefficient"), tiene conto della scabrezza delle pareti della discontinuità; il secondo è rappresentativo della resistenza a compressione del materiale che costituisce le pareti della discontinuità e viene indicato con la sigla JCS ("joint wall compressive strength"), per differenziare tale resistenza da quella del materiale lapideo intatto.

Sostituendo la (2) nella (1) si ottiene:

$$\tau = \sigma' \cdot \text{tg}[(\text{JRC} \cdot \text{Log}_{10}(\text{JCS}/\sigma') + \phi'_b)] \quad (3)$$

Nel caso specifico, ponendo nella (3):

- $\text{JRC} = 13$  (V. risultati dei rilievi geostrukturali);
- $\phi'_b = 36^\circ$  (V. risultati delle prove di taglio lungo i giunti artificiali),

ed assumendo, a favore di sicurezza:

$$\text{JCS} = 10 \text{ N/mm}^2$$

si ottiene:

$$\tau = \sigma' \cdot \text{tg}[36 + 13 \cdot \text{Log}(10/\sigma')]$$

Nella Fig. 23 è riportato l'involuppo relativo alla resistenza al taglio descritta dalla precedente equazione e i valori di coesione apparente  $c'$  e di angolo di attrito apparente  $\phi'$ , determinati con il metodo delle tangenti per diversi valori delle tensioni effettive  $\sigma'$  agenti sulla discontinuità.

Dall'esame del diagramma citato si desume che, nel campo di valori previsti per le tensioni normali agenti sulla superficie delle discontinuità, inferiori a 0.3 N/mm<sup>2</sup>, l'angolo di attrito apparente  $\phi'$  e la coesione  $c'$  assumono, rispettivamente, valori compresi tra 50° e 55° e tra 0.09 e 0.04 N/mm<sup>2</sup>.

Sulla base di quanto innanzi ottenuto con riferimento a due distinti criteri di valutazione della resistenza al taglio lungo le discontinuità, si ritengono rappresentativi i seguenti valori apparenti di  $c'$  e  $\phi'$ :

$$c' = 0 \quad \phi' = 50^\circ$$

Per una valutazione delle proprietà elastiche dell'ammasso carbonatico sono state utilizzate le informazioni acquisite mediante le prove sismiche in foro "down-hole", i cui risultati sono illustrati nella Tab. VI.

In essa sono indicati:

- la verticale di prova e la sigla del sondaggio meccanico a carotaggio continuo ove essa è stata eseguita;
- la profondità di prova dalla quota boccaforo;
- la qualità della roccia desunta sulla base dei valori di RQD ottenuti dall'esame delle carote estratte con i sondaggi meccanici;
- i valori delle proprietà del terreno ottenute dall'elaborazione delle prove sismiche in argomento:  $\gamma$  = peso dell'unità di volume;  $\nu$  = modulo di elasticità trasversale o di Poisson;  $G$  = modulo di taglio;  $E$  = modulo di elasticità longitudinale o di Young.

Risulta quanto appresso:

1. i valori del peso dell'unità di volume sono praticamente coincidenti con quelli ricavati mediante le prove di laboratorio;
2. i valori del modulo di Poisson sono molto prossimi a 0.3, valore medio indicato in letteratura;
3. i valori del modulo di Young variano da poco meno di 1000 N/mm<sup>2</sup> a oltre 30000 N/mm<sup>2</sup>. Si tratta di un intervallo molto vasto che, tuttavia, è senz'altro giustificabile con la variabilità del grado di fratturazione dell'ammasso roccioso: infatti, come risulta dalla tabella citata, in generale i valori più bassi di  $E$  sono stati ottenuti interpretando le prove effettuate in corrispondenza dei livelli di roccia di peggiore qualità ("molto scadente" oppure "scadente"); al contrario, i valori più elevati competono ai livelli di roccia "buona" o "eccellente".

PROVA	PROFONDITA' (m)	ROCCIA	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\nu$	$G$ (N/mm <sup>2</sup> )	$E$ (N/mm <sup>2</sup> )
DH1 (S1)	12,50	buona	26,50	0,297	11339	29413
	15,00	scadente	26,50	0,308	3216	8412
	18,00	eccellente	26,50	0,294	7798	20181
	21,50	eccellente	26,50	0,300	5564	14467
DH2 (S2)	9,50	scadente	19,00	0,415	323	915
	12,00	eccellente	26,50	0,304	8292	21625
	14,50	eccellente	26,50	0,338	1813	4853
	16,50	eccellente	26,50	0,289	10505	27083
DH3 (S6)	2,00	molto scadente	22,00	0,408	250	705
	4,00	buona	26,50	0,295	8156	21125
	6,00	media	26,50	0,325	1517	4019
	8,00	buona	26,50	0,332	1537	4093
	10,00	molto scadente	26,50	0,305	3642	9505
	12,00	buona	26,50	0,281	10683	27371
DH4 (S4)	4,00	media	22,00	0,389	171	474
	8,00	media	26,50	0,310	4347	11390
	12,00	eccellente	26,50	0,312	4805	12609
	16,00	eccellente	26,50	0,350	829	2237
	20,00	media	26,50	0,306	4688	12246
	25,00	molto scadente	26,50	0,331	963	2564
	30,00	molto scadente	26,50	0,298	4845	12578
DH5 (S5)	3,00	scadente	23,00	0,405	465	1306
	6,00	buona	26,50	0,291	8201	21174
	9,00	eccellente	26,5	0,273	13150	33480
	12,00	scadente	26,50	0,274	13282	33843
	16,00	eccellente	26,50	0,285	11705	30081
	20,00	eccellente	26,50	0,288	11625	29945
	23,00	eccellente	26,50	0,307	8336	21790

Tab. VI – Risultati delle prove sismiche "down-hole"

## CONDIZIONI DI STABILITÀ DEI COSTOSI ROCCIOSI

La presenza di superfici di discontinuità all'interno di un ammasso roccioso fessurato ne condiziona in maniera significativa il comportamento meccanico, che è ben rappresentato dal "modello rigido discontinuo": eventuali dissesti possono verificarsi per fenomeni di rottura lungo le discontinuità medesime. I possibili meccanismi dipendono dall'orientazione relativa tra i fronti di scavo, artificiali e/o naturali, e le superfici di discontinuità presenti, nonché dall'inclinazione di queste ultime.

Nelle Figg. 24 e 25 sono indicati i cinematismi possibili in un ammasso roccioso discontinuo in relazione ai diagrammi isofrequenziali ed ai meridiani rappresentativi delle superfici di discontinuità in esso presenti.

Nel caso specifico, sono stati distinti quattro fronti rocciosi, come indicato nella planimetria di Fig. 26, nella quale sono, altresì riportati diagrammi circolari con i meridiani rappresentativi delle famiglie di discontinuità presenti nell'ammasso roccioso e dei quattro fronti lapidei citati.

Dal mutua posizione tra i raggruppamenti di discontinuità e i fronti, nonché dall'inclinazione delle

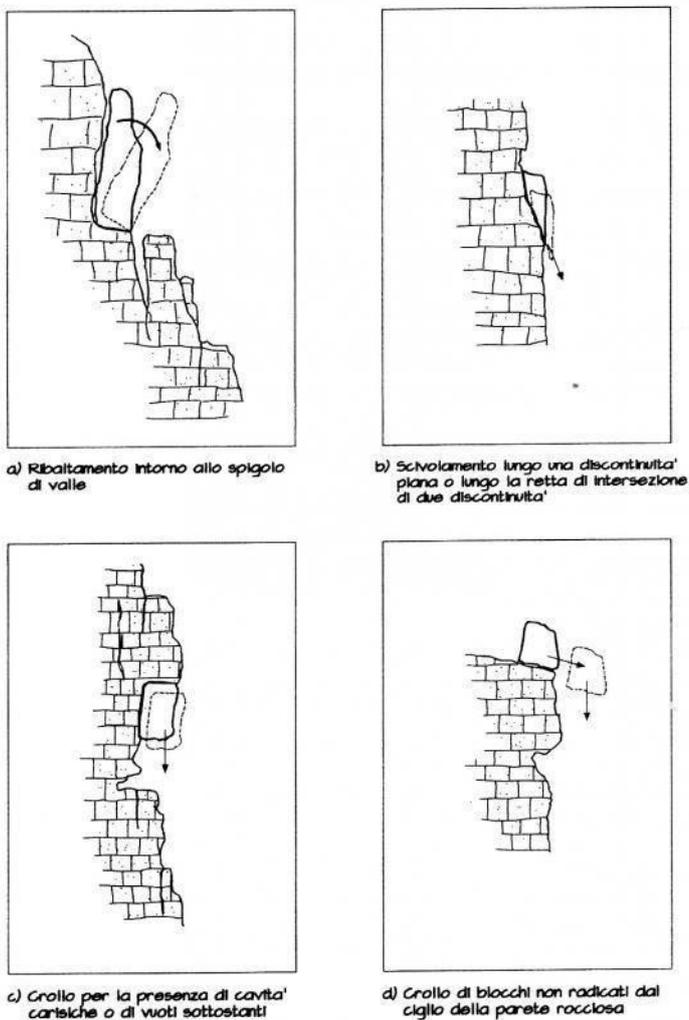


Fig. 24 - Possibili cinematismi di rottura in ammassi rocciosi fessurati

prime, si desumono i movimenti dei blocchi rocciosi "cinematicamente possibili" in corrispondenza di ciascuna parete carbonatica. Risulta quanto appresso:

- in corrispondenza del fronte 1 sono "cinematicamente possibili": lo scorrimento di blocchi rocciosi cuneiformi (Fig. 24b) lungo giunti delle famiglie 2 inclinati a "franapoggio" mediamente di  $74^\circ$ , delimitati lateralmente da discontinuità appartenenti al raggruppamento 3; il ribaltamento di elementi lapidei prismatici oppure a forma di lastra (Fig. 24a), le cui facce anteriore e posteriore sono individuate dai giunti subverticali e subparalleli al fronte delle famiglie 2 e/o 4, mentre quelle laterali sono delimitate da giunti, normali al fronte, del sistema 3;
- nel fronte 2 sono "cinematicamente possibili": lo scorrimento di elementi lapidei cuneiformi (Fig. 24b) lungo giunti del sistema 3, mediamente inclinati di  $57^\circ$  rispetto all'orizzontale, che ne individuano la base, delimitati lateralmente da discontinuità dei raggruppamenti 2 e/o 4; la traslazione di massi tetraedrici lungo la retta di intersezione di discontinuità appartenenti alle famiglie 3 e 4, mediamente

inclinata di  $56^\circ$ ;

- in corrispondenza del fronte 3 sono "cinematicamente possibili" lo scorrimento di elementi lapidei cuneiformi (Fig. 24b) lungo giunti dei gruppi 2 o 3, rispettivamente inclinati di  $74^\circ$  e  $57^\circ$  rispetto all'orizzontale, delimitati lateralmente da discontinuità del sistema 4; la traslazione di massi tetraedrici lungo la retta di intersezione di discontinuità appartenenti alle famiglie 2 e 3, mediamente inclinata di  $56^\circ$ ;
- nel fronte 4 sono "cinematicamente possibili": lo scorrimento di elementi lapidei cuneiformi (Fig. 24b) lungo i piani di stratificazione della famiglia 1, mediamente inclinati a "franapoggio" di  $34^\circ$  rispetto all'orizzontale, che ne individuano la base, delimitati sui lati da giunti dei sistemi 2 e/o 4; lo scivolamento di massi tetraedrici lungo la retta di intersezione di discontinuità appartenenti alle famiglie 1 e 2, mediamente inclinata di  $32^\circ$ ; il ribaltamento di elementi lapidei prismatici oppure a forma di lastra (Fig. 24a), separati dall'ammasso roccioso da giunti subparalleli al fronte del raggruppamento 3, con facce laterali individuate da discontinuità dei sistemi 2 e/o 4;
- in corrispondenza di tutti i fronti, laddove sono presenti cavità creatisi per il crollo dei livelli di roccia più sottili o di vuoti determinatisi per la caduta dei blocchi sottostanti, è "cinematicamente possibile" il crollo degli elementi "a sbalzo" (Fig. 24c).

Al fine di valutare se i cinematismi innanzi illustrati sono "meccanicamente possibili", ossia se realmente, in corrispondenza di eventuale condizioni al contorno, le forze che tendono a spostare il blocco possano superare quelle equilibranti (scorrimento - *sliding*) o i momenti delle prime, computati rispetto al centro istantaneo di rotazione, possano superare i momenti delle seconde rispetto al medesimo centro (ribaltamento - *toppling*), occorre valutare i coefficienti di sicurezza relativi ai singoli cinematismi.

A tale scopo si è fatto riferimento agli schemi di calcolo e alle espressioni riportati nella Fig. 27. I calcoli sono stati sviluppati in presenza di una forza sismica agente nel baricentro del blocco di intensità pari a  $K \cdot W$  con:

$K$  = coefficiente di intensità sismica, pari a 0.07 per zone sismiche di II categoria, quale Taormina;

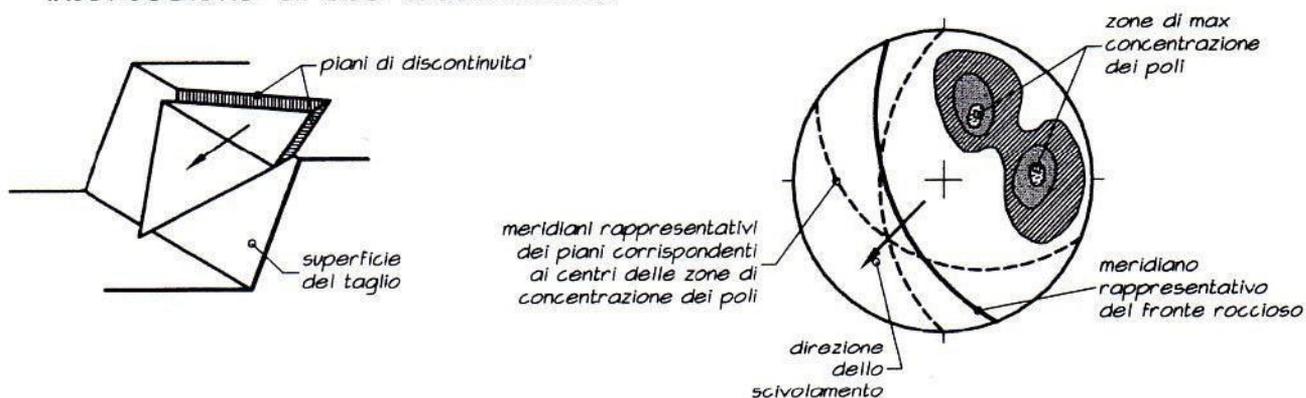
$W$  = peso proprio del blocco.

Come risulta dalle espressioni riportate nella figura citata, il coefficiente di sicurezza non dipende dal peso del blocco; inoltre, per i meccanismi di scorrimento sia lungo un piano che lungo una retta, esso non dipende

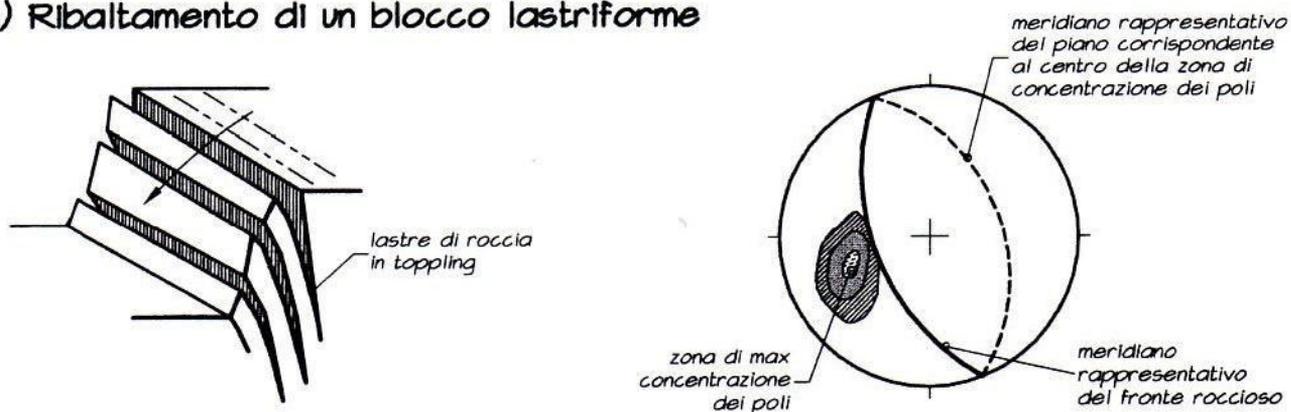
### a) Scivolamento di un blocco cuneiforme



### b) Scivolamento di un blocco tetraedrico lungo la retta di intersezione di due discontinuita'



### c) Ribaltamento di un blocco lastriforme



CASO	$\alpha_d$	$\beta_d$
a	$< \alpha_p$	$\beta_p \pm 20^\circ$
b	$< \alpha_p$	$\beta_p \pm 20^\circ$
c	$> 50^\circ$	$\beta_p \pm 20^\circ + 180^\circ$

$\alpha_d, \beta_d$  orientazione del piano di discontinuita'

$\alpha_p, \beta_p$  orientazione del fronte roccioso

Fig. 25 – Principali cinematismi in ammassi rocciosi fessurati in relazione alle caratteristiche di orientazione delle discontinuità in essi presenti

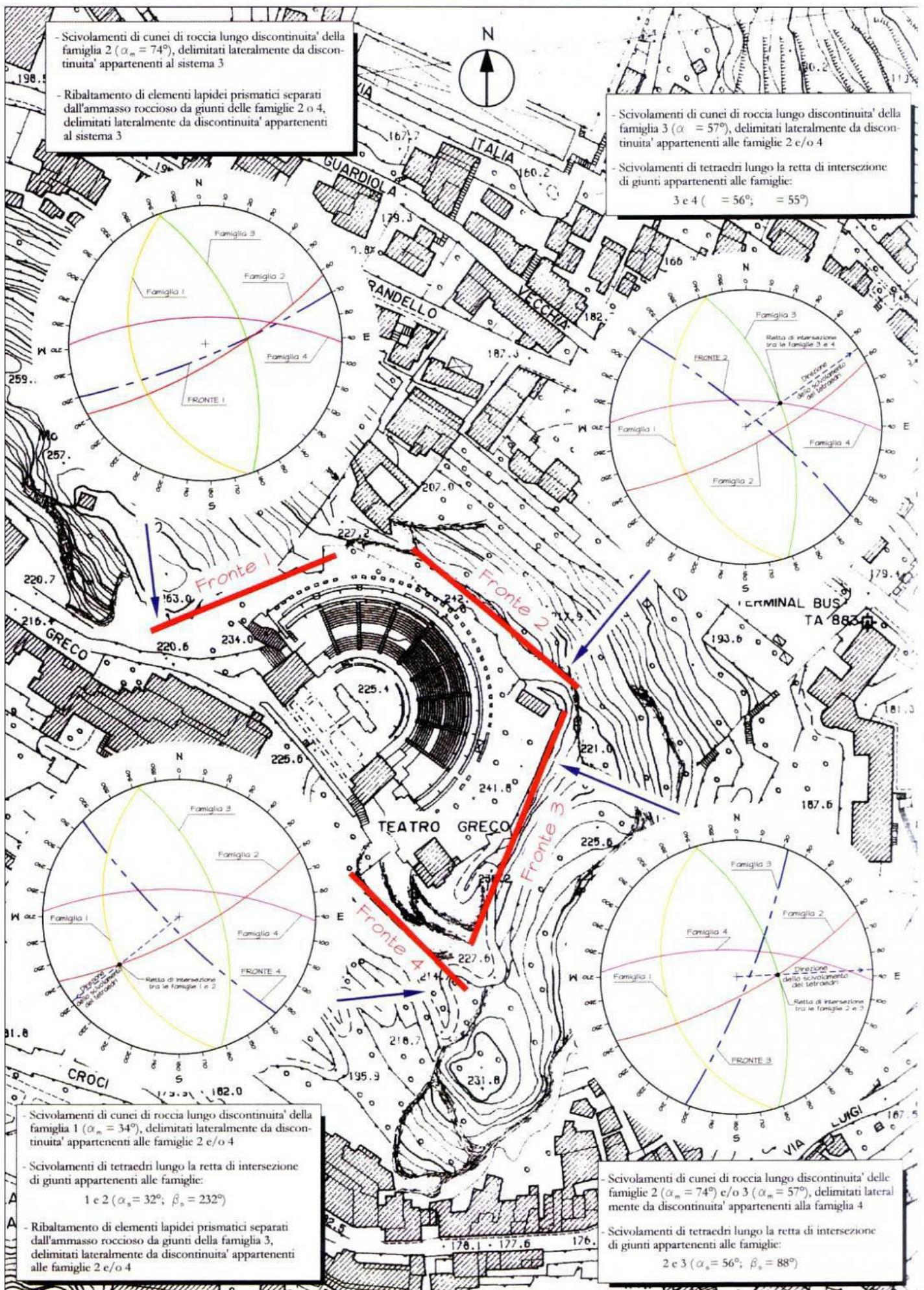
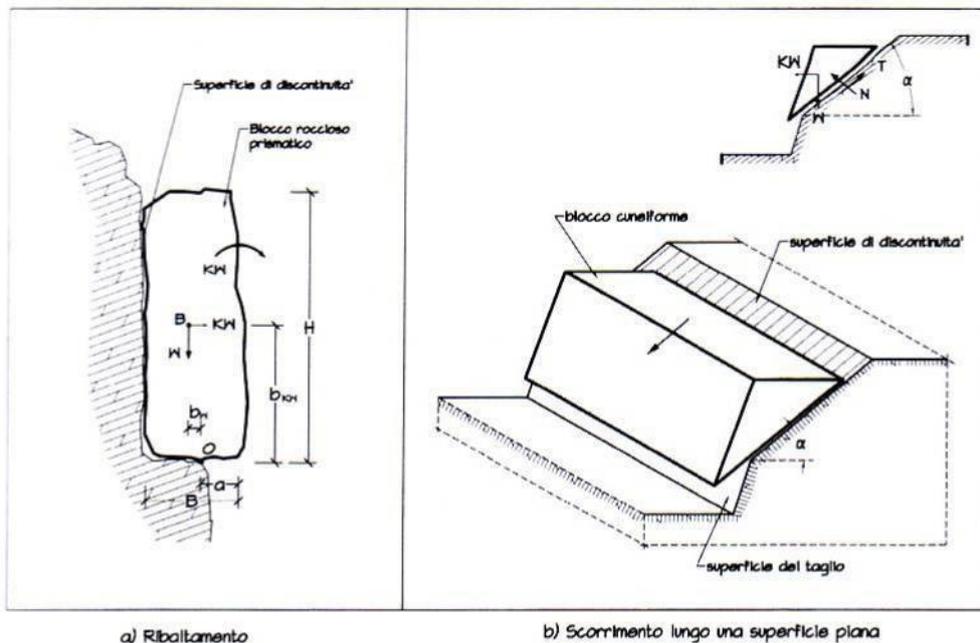


Fig. 26 - Cinematismi in corrispondenza dei vari fronti rocciosi che perimetrano il Teatro

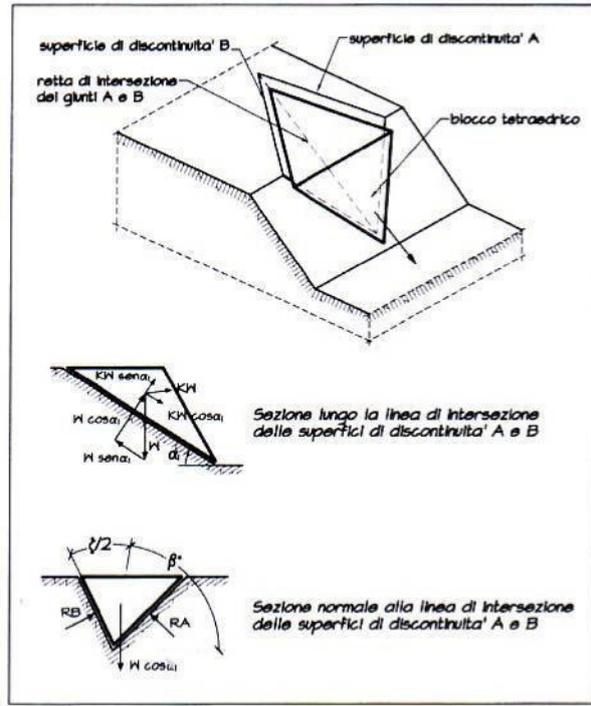


**SIGNIFICATO DEI SIMBOLI**

- B = baricentro del blocco roccioso
- O = centro di rotazione
- W = peso del blocco roccioso
- KW = azione sismica
- $b_n$  = Braccio della forza W rispetto all'asse di traccia O
- $b_{KW}$  = Braccio della forza KW rispetto all'asse di traccia O
- $M_s = W \cdot b_n$  = momento stabilizzante
- $M_r = KW \cdot b_{KW}$  = momento ribaltante
- N, T = reazione normale e reazione tangenziale sul piano di scorrimento ( $T = N \cdot \tan \varphi'$ )
- RA, RB = reazioni normali ai piani di scorrimento

**VERIFICHE**

- Al ribaltamento
 
$$\eta = \frac{M_s}{M_r} = \frac{b_n}{K \cdot b_{KW}}$$
- Allo scorrimento lungo una superficie piana
 
$$\eta = \frac{(\cos \alpha - K \cdot \sin \alpha) \cdot \tan \varphi'}{\sin \alpha + K \cdot \cos \alpha}$$
- Allo scorrimento lungo la retta di intersezione di due giunti
 
$$\eta = \frac{(\cos \alpha_1 - K \cdot \sin \alpha_1) \cdot \sin \beta' \cdot \tan \varphi'}{\sin \xi / 2 \cdot (\sin \alpha_1 + K \cdot \cos \alpha_1)}$$



c) Scorrimento lungo la retta di intersezione di due giunti

Fig. 27 – Schemi di calcolo e significato dei simboli per la determinazione dei meccanismi di rottura

...e dalla geometria del masso, ma dalle caratteristiche geostrukturali delle superfici di discontinuità che non è possibile il cinematisimo e dal valore del coef-

ficiente sismico. È, pertanto, possibile valutare il coefficiente di sicurezza  $\eta$  nei riguardi della traslazione in funzione dei dati geostrukturali noti o, comunque, ricac-

FRONTE (sigla)	Coefficiente di Intensità sismica K	Angolo di attrito apparente $\varphi'$ (°)	CINEMATISMO					
			Scivolamento di blocchi cuneiformi lungo una superficie piana		Scivolamento di blocchi tetraedrici lungo la retta di intersezione di due giunti			
			$\alpha$ (°)	$\eta$	$\alpha_1$ (°)	$\beta^*$ (°)	$\xi$ (°)	$\eta$
1	0,07	50	74	0,253	-	-	-	-
2			57	0,660	56	71,5	117	0,765
3			74	0,253	56	66,5	107	0,785
4			57	0,660				
			34	1,525	32	64	86	2,161

Tab. VII – Risultati delle verifiche di stabilità nei confronti dello scorrimento dei blocchi rocciosi

vabili mediante le proiezioni stereometriche. I risultati ottenuti, insieme ai valori delle grandezze che intervengono nelle espressioni di  $\eta$ , sono raccolti nella Tab. VII.

In tutti i casi è risultato  $\eta < 1$ , fatta eccezione per i due possibili cinematismi di traslazione relativi sul fronte 4 ( $\eta > 1.5$ ). Ne segue che i cinematismi di scorrimento sui fronti 1, 2 e 3 sono “meccanicamente possibili”, ossia in corrispondenza di tali fronti possono verificarsi scivolamenti di blocchi lapidei. Tale conclusione è di particolare importanza, ai fini del presente studio, per il fronte 1 (parete nord-ovest), aggettante sul Teatro Greco-Romano di Taormina. Al contrario, sul fronte 4 lo scivolamento di massi, “cinematicamente possibile”, non è “meccanicamente possibile”.

Nel caso del “toppling” (ribaltamento), nell’espressione del coefficiente di sicurezza intervengono i bracci delle forze agenti, comprendenti il peso proprio del masso e la forza di inerzia dovuta la sisma. Tali bracci dipendono dalle dimensioni geometriche del masso (altezza H e spessore B) ma anche dalla configurazione nell’intorno della base, ossia dalla lunghezza “a” dello sbalzo (Fig. 27). Ad esempio, nel caso di blocco parallelepipedo si ha:

$$b_w = B/2 - a \quad b_{kw} = H/2$$

Ne segue che il valore del coefficiente di sicurezza deve essere riferito ad un masso ben preciso: non è, cioè, possibile oggettivare i valori di  $\eta$  come fatto per i due fenomeni di traslazione. È, tuttavia, evidente che il valore di  $\eta$  si riduce all’aumentare di H e, per fissata B, all’aumentare di “a”; addirittura vale 0 per  $a = B/2$ . Pertanto il fenomeno di ribaltamento in linea generale è “meccanicamente possibile”; valutazioni di dettaglio vanno sviluppate per ciascun blocco per il quale è cinematicamente possibile il ribaltamento.

## PERICOLOSITÀ E RISCHIO GEOLOGICO

In termini generali, nel concetto di Rischio sono presenti diverse componenti: l’evento che si può verificare e la probabilità di accadimento dello stesso, il contesto ambientale in cui si sviluppa e il danno che ne può conseguire. A tali componenti si fa riferimento con una terminologia specifica e con una procedura scientificamente accreditata.

La terminologia e la procedura universalmente utilizzate attualmente sono quelle proposte dalla commissione tecnico-scientifica dell’UNESCO (Varnes & IAEG), che rappresenta il massimo organismo internazionale con compiti istituzionali di mitigazione dei danni provocati da eventi naturali estremi e di riduzione del rischio. Risulta:

$$R = P \times V \times E$$

essendo:

- R, il rischio, che esprime la probabilità che le conseguenze economiche e sociali connesse con un fenomeno di pericolosità superino una certa soglia;
- P, la pericolosità, che esprime la probabilità che un potenziale evento dannoso di una certa entità si verifichi in un certo intervallo di tempo ed in una certa area;
- V, la vulnerabilità, ossia la capacità di un “elemento a rischio” (popolazione, edifici, infrastrutture, patrimonio artistico, ecc.) di sopportare le sollecitazioni e gli effetti dell’evento naturale “atteso”;
- E, il valore esposto o elementi a rischio: si riferisce all’elemento che deve sopportare l’evento e può essere espresso dal numero di presenze umane, dal valore di beni costruttivi, di terreni o insediamenti produttivi, di beni artistico-monumentali.

Sulla base delle caratteristiche geostrutturali e geomorfologiche relative al sito in cui sorge, si evidenziano condizioni di pericolosità e rischio per il Teatro connesse con l’assetto idrogeologico e con le caratteristiche di sismicità.

## Pericolosità e rischio idrogeologico

Per la valutazione e quantificazione dei livelli di pericolosità e rischio, tenuto conto di quanto prescritto dal D.L. 180/98, che rappresenta la norma nazionale di riferimento in materia di rischio idrogeologico, la metodologia di lavoro applicata è basata sui criteri fissati dall’ “Atto di Indirizzo e Coordinamento” (D.P.C.M. 29/9/1998) e sulle indicazioni fornite dalle Linee Guida redatte dall’Assessorato Regionale Territorio e Ambiente allegate alla Circolare 1/2003; queste ultime definiscono una procedura standardizzata che, sulla base della valutazione di parametri significativi dei dissesti (tipologia del fenomeno, estensione del dissesto, stato di attività, elementi a rischio), attraverso la relativa combinazione matriciale, consente di pervenire all’individuazione dei livelli di pericolosità e delle classi di rischio, distinte in

- R1 - Rischio Moderato;
- R2 - Rischio Medio;
- R3 - Rischio Elevato;
- R4 - Rischio Molto Elevato.

Complessivamente, riguardo l’assetto idrogeologico nel sito del Teatro si sono individuate condizioni di pericolosità e rischio per fenomeni di crollo e per fenomeni di deflusso idrico superficiale (Fig. 28 e 29).

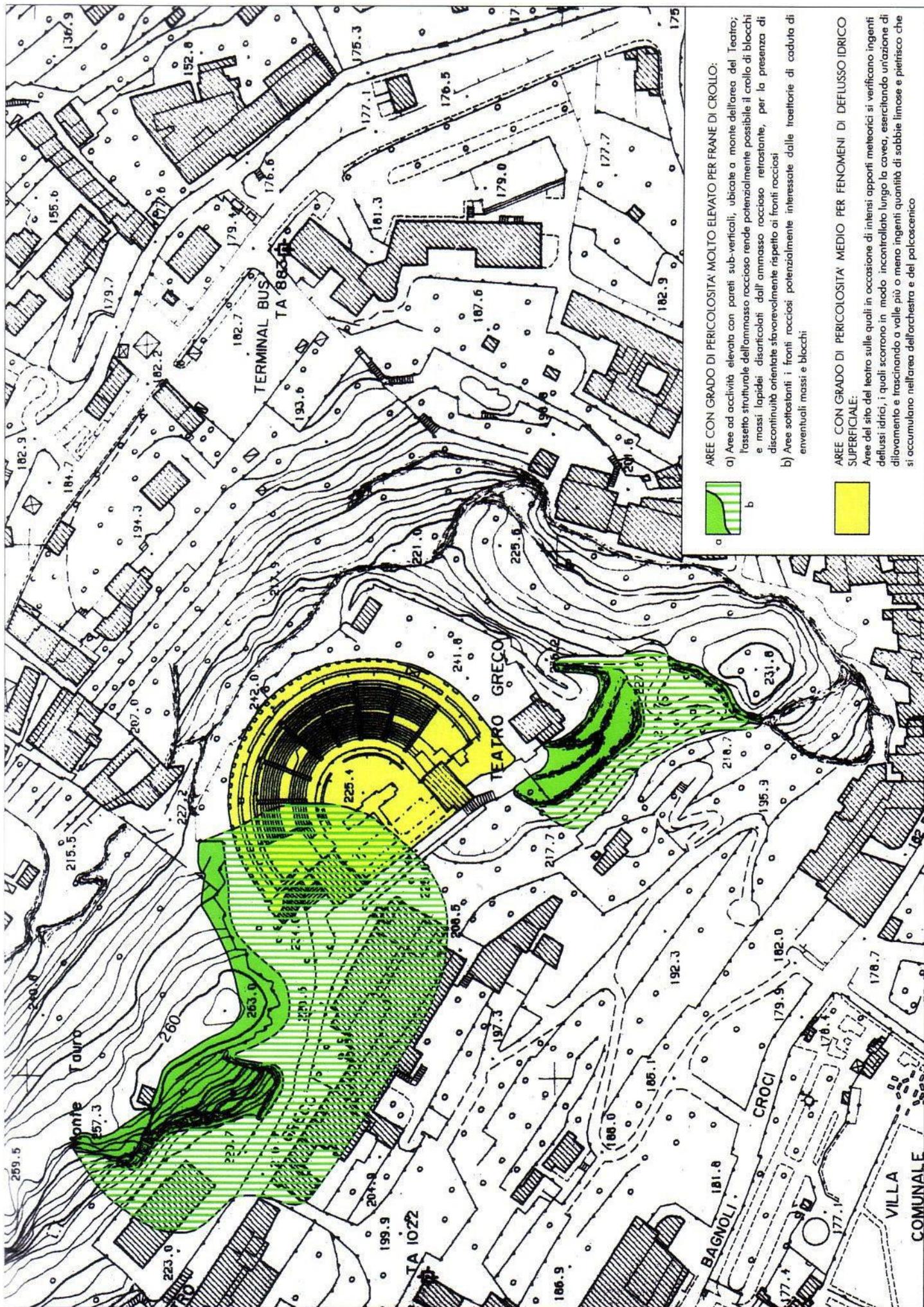


Fig. 28 - Pericolosità idrogeologiche



Fig. 29 - Rischio idrogeologico

## Pericolosità e rischio per frane di crollo di blocchi lapidei

Come illustrato in precedenza condizioni di pericolosità per fenomeni di crollo si verificano dai fronti rocciosi che marginano il sito del Teatro, ove sono cinematicamente e meccanicamente possibili fenomeni di rottura per scorrimento e ribaltamento. In particolare, sulla parete carbonatica nord-ovest (fronte 1 - Fig. 26), incombente sul teatro, sono riconoscibili numerosi elementi lapidei, anche di grandi dimensioni, in equilibrio instabile. Per la mutua posizione fra tale fronte roccioso ed i manufatti a valle e per l'altezza della stessa, il distacco di volumi lapidei mette in pericolo il settore NW del Teatro (Foto 15), oltre che la strada di accesso ed i manufatti ubicati lateralmente ad essa (Foto 5 e 15). Su tale fronte, inoltre, in passato è stato realizzato un intervento di protezione, comprendente una rete di acciaio a doppia torsione (Foto 4, ..., 7). Essa tuttavia, riesce ad evitare il distacco o, comunque, a guidare la caduta di massi piccoli, ma non riduce le condizioni di pericolo di caduta per i massi di grandi e medie dimensioni, presenti in gran numero sulla parete lapidea.

Per eventuali dissesti nei costoni posti a Sud (fronte 3 - Fig. 26), invece, viene messa in pericolo una stradella di servizio al Teatro.

La traiettoria di eventuali elementi lapidei provenienti dai costoni posti a NE e SE (rispettivamente, fronti 2 e 4 - Fig. 26) si svilupperebbe in direzione opposta al Teatro, mettendo in pericolo i manufatti posti lungo le pendici NE e SE di M. Tauro.

Per la valutazione del livello di pericolosità, va considerato che:

- dall'esame diretto dei fronti rocciosi, operando con metodi alpinistici, sono state verificate condizioni prossime all'equilibrio limite per numerosi blocchi lapidei, anche di notevoli dimensioni, con volume superiore a diversi metri cubi;
- il contributo alla stabilità fornito dalla rete esistente sul fronte incombente sul teatro è scarsamente significativo;
- eventuali crolli rappresentano fenomeni ad elevato pericolo per l'incolumità della popolazione, per la velocità del moto e la casualità delle relative traiettorie, che in genere preclude qualsiasi possibilità di fuga;
- si tratta di fenomeni improvvisi, per i quali è difficile fare valutazioni probabilistiche di ordine temporale, per cui sono da ritenere sempre attivi.

Pertanto, il livello di pericolosità è da ritenere "molto elevato" e viene indicato con P4.

La perimetrazione delle aree soggette a pericolosità per fenomeni di crollo comprende:

- il costone roccioso sub-verticale nord-ovest, dal quale possono verificarsi fenomeni di distacco di volumi lapidei;
- le aree poste a valle, che possono interferire con le traiettorie delle direzioni di caduta dei massi.

Incrociando il livello di pericolosità stimato P4 con l'elemento a rischio Teatro E3, di grande importanza turistico-monumentale (circa 23 secoli di storia) e di elevata vulnerabilità, certamente non in grado di resistere all'impatto di blocchi, si perviene alla determinazione della classe di rischio molto elevato R4 (Fig. 29).

## Pericolosità e rischio per fenomeni di deflusso idrico superficiale

Si tratta dell'area dove insiste la cavea e l'area sottostante. Le acque meteoriche che interessano direttamente le gradinate e che si raccolgono nella zona dei portici presenti a monte rusciano incontrollate lungo la cavea, nei viottoli e nei camminamenti o tra i vari settori delle gradinate. Tali acque esercitano un'azione dilavante sui terreni superficiali incoerenti di copertura del substrato lapideo, asportando i materiali più fini e più facilmente erodibili, con il duplice effetto di erodere e incidere le aree percorse e convogliare a valle, nell'area dell'arena, quantità, talora anche ingenti, di materiale sabbioso-limoso, che si accumula creando notevoli disagi alla fruizione del sito (Foto 12).

Di fatto, in occasione di eventi meteorici intensi va considerata una condizione di criticità per il Teatro, a cui possono essere connessi danni economici e la parziale compromissione della funzionalità nonché della fruibilità della struttura. In tali aree è, dunque, opportuno prevedere interventi di raccolta, regimazione e allontanamento delle acque superficiali, al fine di eliminare i fenomeni di degrado presenti attualmente nel sito del Teatro.

Il fenomeno erosivo si evolve nel tempo lentamente, seppure con progressività; pertanto, è stato classificato tra i fenomeni estremamente lenti T1.

Tenuto conto che:

- si tratta di un fenomeno con velocità di avanzamento molto lenta;
  - gli effetti sono limitati all'area della cavea e dell'arena;
  - il fenomeno è da considerare attivo, in quanto si verifica con cadenza almeno stagionale,
- è valutabile un livello di pericolosità moderata P1 che, incrociato con l'elemento a rischio Teatro E3, conduce ad un livello di rischio medio R2 (Fig. 29).

Il significato da attribuire a questo livello di rischio R2 va interpretato in termini di attenzione alla problematica, affinché il perdurare del fenomeno non aggravi ulteriormente lo stato di degrado in cui versa la struttura del Teatro.

### Pericolosità e rischio sismico

Dell'Antico Teatro di Taormina rimangono le parti che hanno resistito alle aggressioni dovute ai fenomeni naturali, ivi compresi i forti terremoti, al degrado delle strutture e all'abbandono negli ultimi due millenni.

Utilizzando un parallelismo con l'evoluzione biologica, il Teatro appare come uno di quei rari esempi di "fossile sismico" tanto caro a quegli studiosi che si occupano di sismologia del passato per tentare di fare luce su ciò che ci si potrebbe aspettare in futuro.

Infatti, gran parte delle attuali valutazioni di pericolosità sismica e la cosiddetta "previsione a lungo termine" dei terremoti si basano, sempre più frequentemente, sulla combinazione tra l'informazione storica da un lato e quella geologica e strutturale dall'altro.

Si cercano, cioè, le correlazioni possibili tra i resoconti storico-letterari dei grandi eventi naturali del passato e la lettura "stratigrafica" dei danni sull'edificio storico, cercando di individuare la possibile causa geologica che ha provocato il danno stesso.

In particolare, la Paleosismologia, disciplina che ha come obiettivo lo studio e la datazione delle tracce geologiche dei terremoti del passato, ha parzialmente risposto a questa necessità di informazioni, in quanto si è dimostrata in grado di legare i processi geologici fondamentali, che operano a scale dell'ordine del milione di anni, ai processi sismogenetici, che operano attraverso cicli dell'ordine del millennio.

Tuttavia, in molte aree, proprio i risultati paleosismologici hanno mostrato in modo certo che il tempo medio di ritorno di forti terremoti, generati da importanti strutture sismogenetiche italiane, è compreso tra 1000 e 3000 anni. Questo implica che la durata della registrazione storica dei terremoti, che nella maggior parte dei casi non supera il millennio, può essere largamente insufficiente a documentare il ricorrere di forti eventi generati dalla stessa struttura sismogenetica o, addirittura, a documentare anche un solo grande evento, portando quindi a sottostimare la propensione alla sismogenesi di una particolare zona, pur in presenza di indizi geodinamici favorevoli.

Alcuni studiosi sostengono, pertanto, che occorre estendere la durata della registrazione storica includendo anche evidenze di tipo archeologico, inglobando negli studi sismologici anche la cosiddetta "Archeologia

Sismica", che si sta in effetti diffondendo già da alcuni anni in area mediterranea con lo specifico obiettivo di migliorare le conoscenze sulle strutture sismogenetiche ad attività distruttiva ma poco frequente.

I metodi scientifici di studio, analisi e, conseguentemente, di protezione/prevenzione dai terremoti subscono, dunque, continue evoluzioni in funzione degli eventi che via via si verificano e si studiano strumentalmente, e dei dati che continuano ad accumularsi.

Viene, ad esempio, sempre più messa in discussione l'attendibilità delle mappe sismiche, soprattutto se spinta oltre certi limiti di dettaglio, ignorando i fattori locali, e dei dati "utili" per l'ingegneria sismica.

Nel dicembre 2003 due eventi quasi sincroni evidenziarono ulteriori difficoltà di interpretazione della fenomenologia sismica. Il terremoto della California centrale, registrato di magnitudo 7.5 (ossia energia effettivamente liberata durante il sisma), provocò solo due vittime e danni limitati agli edifici, con una intensità valutabile intorno al VI-VII grado della scala MCS (intensità macrosismica), mentre il terremoto che colpì poco dopo la regione di Bam in Iran, registrato di magnitudo 7.7, provocò oltre cinquantamila morti e la distruzione pressoché totale degli abitati, con una intensità valutabile intorno all'XI-XII grado MCS.

Appare, dunque, notevole la disparità di valori tra causa ed effetto, ossia tra quantità di energia liberata, registrata dai sismografi ("magnitudo"), e azione distruttiva al suolo ("intensità").

Le mappe del rischio sismico disponibili, in Italia ed all'estero, sono desunte in massima parte dalle informazioni che possediamo riguardo ai terremoti storici e si fondano su due presunzioni:

- che il terremoto appartenente ad una certa famiglia possa tornare a colpire con energia comparabile dove ha precedentemente colpito con certi tempi di ritorno (da ipotizzare su base statistica);
- che terremoti diversi appartenenti ad una stessa famiglia possano produrre analoghi effetti.

Tali presunzioni però non tengono conto di alcune semplici considerazioni:

- ogni terremoto è il risultato di una particolare combinazione di fattori che agiscono a scala regionale e locale e che, "panta rei", tali condizioni possono modificarsi nel tempo in funzione di una grandissima quantità di fattori;
- gli effetti al suolo di un terremoto, a pari valori di magnitudo, dipendono in misura determinante sia dalle condizioni locali dei terreni su cui l'opera è fondata che dalla vulnerabilità dell'edificio, la quale varia moltissimo nel tempo e nello spazio

quanto a caratteri costruttivi e stato di conservazione.

Come sostiene il Prof. Piero Pierotti: *“Vi fu un periodo, fra gli anni '70 e '90 del secolo scorso, durante il quale si riteneva che gli studi condotti dai sismologi potessero offrire un contributo determinante alla previsione e alla prevenzione del danno sismico, individuando le aree sismogenetiche e fornendo all'ingegneria sismica i relativi parametri di progetto. Appare oggi chiaro che si tratta di due questioni indipendenti. Sulla individuazione delle aree a rischio i sismologi sono in grado di offrire risposte sempre più precise, ma quanto al resto essi stessi mettono in guardia contro un uso rigidamente applicativo dei loro studi. Infatti le modalità con cui l'onda sismica si trasmette dall'ipocentro alla superficie non sono lineari. Entrano in giuoco molte variabili, alcune relativamente agevoli da determinare, come la profondità dell'ipocentro o le direzioni dell'onda, altre non esattamente valutabili, come le alterazioni spettrali dovute a riflessioni, rifrazioni, diffrazioni del mezzo attraversato dall'onda, altre, infine, di dettaglio estremo, come la risposta dei terreni di superficie e dell'edificato.”*

E' pertanto difficile, o addirittura impossibile, valutare adeguatamente, con i pochi dati disponibili, gli effetti locali di risonanza e di amplificazione dell'onda, fenomeni del tutto ordinari in questi casi e causa primaria dei danni agli edifici e ai manufatti in genere.

Ancora Pierotti: *“Nel terremoto del 31 ottobre 2003 (Molise e Puglia) le trenta vittime umane si concentrarono in un unico centro, San Giuliano di Puglia, e quasi tutte in un unico edificio (la scuola). Anche in quello stesso paese il fenomeno sismico non agì tuttavia in maniera omogenea. Il vecchio abitato rimase pressoché indenne mentre furono danneggiati seriamente tutti gli edifici più recenti costruiti intorno ad esso: fra questi appunto la scuola, che collassò con effetto sandwich. Nel raggio di poche centinaia di metri la risposta sismica dei terreni e dell'edificato risultò assai diversa. In termini di prevenzione dunque, quand'anche la previsione fosse stata esatta (il comune di San Giuliano di Puglia era fuori elenco), l'indice del rischio atteso sarebbe risultato errato per eccesso (centro storico) o per difetto (periferia).*

*Ecco perché in un contesto del genere sta trovando spazio una nuova integrazione metodologica. Essa, pur mettendo a profitto i dati forniti dai sismologi, sposta l'osservazione sulla vulnerabilità dell'edificato esistente. La “sismografia storica” - così è stata definita - studia ogni edificio come se fosse il sismogramma di se stesso, vi legge la sua storia sismica, lo confronta con altri esemplari omogenei e ne estrapola i comportamenti prevedibili in caso di nuovi eventi sismici. I dati previsionali così otte-*

*nuti possono essere proposti direttamente in scala progettuale, colmando il vuoto tra sismologia e ingegneria sismica. Fra tante verifiche possibili dell'utilità del metodo, una sola per esemplificare: dalla casistica esaminata risulta severamente sconsigliato sovrapporre alla muratura ordinaria armature in cemento armato, mentre le normative vigenti lo consentono e talora lo impongono. Ciò equivale a dire che un ulteriore disastro simile a quello della scuola di San Giuliano di Puglia, dovuto a una sopraelevazione di quel tipo, potrebbe ripetersi con il consenso della legge, mentre sarebbe evitato sulla base dei dati elaborati dalla sismografia storica.”*

Per quanto innanzi, si ritiene che studi interdisciplinari approfonditi sull'evoluzione del degrado sul Teatro Antico di Taormina, sito su un'area di grandissimo interesse sismologico, costituirebbero una preziosissima fonte di informazioni, sia per potere studiare meglio i fenomeni sismici del passato che per estrapolare i migliori metodi possibili di intervento per la protezione e la fruizione del bene stesso.

In assenza di tali studi, volendo comunque fornire un contributo per la definizione della carta del rischio anche per quanto attiene gli aspetti sismici, si è cercato di analizzare la tematica al meglio dei dati disponibili.

Per fare ciò occorre però precisare cosa si intende con il termine di rischio e di rischio sismico in particolare.

Come già ampiamente descritto, qualsiasi rischio connesso con il verificarsi di gravi sconvolgimenti naturali è dato dal contributo di due fattori fisici quali: la probabilità che si verifichi un evento di una certa intensità, in una certa regione e in un certo lasso di tempo (pericolosità), correlata con la capacità di un “elemento a rischio” di sopportare le sollecitazioni prodotte da quell'evento atteso (vulnerabilità).

Va da sé che in un'area quale quella della Sicilia orientale, sottoposta periodicamente a terremoti di forte intensità (alta pericolosità sismica) e dalle conseguenze spesso disastrose (alta vulnerabilità sismica), il rischio sismico risulti particolarmente elevato.

Poiché non esiste un metodo scientifico in grado di prevedere il verificarsi di un sisma (epicentro, ora ed intensità) e considerando che, in ogni caso, la previsione non impedirebbe i danni alle infrastrutture, l'unica alternativa possibile, al fine di minimizzare i danni medesimi, consiste nell'accurata analisi dei due fattori, in modo da approntare le opportune opere di prevenzione.

I dati a disposizione consentono al momento di fornire un contributo per quanto attiene la sola pericolosità sismica e non la vulnerabilità.

Le varie metodologie di analisi e valutazione della pericolosità sismica sviluppate negli ultimi decenni

nascevano però con l'intento di classificare il territorio in aree a maggiore o minore suscettibilità ai sismi, certamente utili a fini urbanistici ma poco utilizzabili se si tratta di contribuire alla tutela di un edificio storico, quindi già realizzato su uno specifico sito, indipendentemente dalle sue proprietà geologico-tecniche. Dunque, a maggior ragione la carta della pericolosità sismica fornisce un piccolo contributo che andrebbe assolutamente integrato con gli aspetti relativi alla vulnerabilità sismica del Teatro e, specificatamente, alle caratteristiche ed allo stato delle fondazioni, alla modalità costruttiva, allo stato di conservazione dei materiali e delle strutture, etc.

Per quanto riguarda la metodologia adottata per lo studio della pericolosità sismica del sito, si è fatto riferimento alla Circolare Assessoriale ARTA n° 2222/95 che, pur con i limiti di ogni metodo preconstituito applicato a casi molto diversi, ha comunque recepito buona parte dei concetti sviluppati in decenni di studi scientifici nel mondo e tentato di fornire un modo per concretizzarli in carte leggibili ed utilizzabili.

Si è elaborata, pertanto, secondo la Circolare citata, una classificazione della pericolosità sismica locale procedendo con la metodologia di seguito illustrata:

- in base ai dati geologici e geofisici acquisiti si è cercato di schematizzare la successione dei terreni dalla superficie sino al bedrock sismico, realizzando un modello geofisico semplificato;
- si è cercato di riconoscere tutti quegli elementi puntuali che contribuiscono ad aumentare il livello di pericolosità sismica del sito in termini di eventuali amplificazioni locali e/o modificazioni attese nello spettro di risposta sismica.

Dallo studio eseguito emerge che l'area del Teatro ha come bedrock sismico terreni a consistenza lapidea, di natura calcareo-dolomitica, ricoperti localmente da coperture detritiche o di terrazzi marini e, nel sito del Teatro vero e proprio, da terreni di riporto. Una fitta rete di discontinuità tettoniche (faglie) dislocano variamente l'ammasso roccioso generando, spesso, scarpate subverticali, di altezze anche notevoli. Sotto il profilo geomorfologico l'area è caratterizzata da pendii ripidi e scoscesi con fronti rocciosi subverticali, ai quali si contrappongono aree da mediamente a debolmente acclivi ricoperte da depositi detritici o subpiagneggianti modellate dall'abrasione marina. I fenomeni di dissesto in atto o potenziali sono dovuti essenzialmente a fenomeni di crollo di volumi lapidei dei fronti rocciosi.

Pertanto, circa le condizioni di pericolosità sismica in termini di amplificazioni locali, definite in base alle descritte caratteristiche geologiche e geomorfologiche,

l'area del Teatro Greco-Romano di Taormina appare interessata dai seguenti scenari di pericolosità sismica potenziale, individuati tra quelli relativi all'Allegato E della citata circolare A.R.T.A. (Fig. 30):

Gruppo I – Fig. 4: in tale scenario sono comprese le zone con acclività maggiore del 50% con ammassi rocciosi con giacitura sfavorevole degli strati e intensa fratturazione; esso comprende le pendici sud-occidentali del rilievo su cui insiste il Teatro; lungo tali pendici sono potenzialmente verificabili fenomeni di scivolamento o di distacco e rotolamento a valle di volumi rocciosi, data l'intensa fratturazione dell'ammasso roccioso e la giacitura a "franapoggio". Per tale scenario bisogna considerare il pericolo di una eventuale accentuazione dei fenomeni di instabilità in atto o potenziali dovuta agli effetti dinamici che possono verificarsi in occasione di eventi sismici.

Gruppo II – Fig. 5: in tale scenario sono comprese le zone di ciglio e gli orli di scarpata; vi rientrano pertanto i costoni rocciosi subverticali, artificiali e non, presenti lungo le pendici del Monte Tauro, di cui alcuni delimitano lateralmente l'area del Teatro o sovrastano in alcuni punti le vie di accesso al Teatro stesso. Per tale scenario di rischio bisogna considerare il pericolo di una eventuale amplificazione diffusa del moto del suolo, connessa con la focalizzazione delle onde sismiche.

Gruppo III – Fig. 8: in tale scenario sono comprese le zone pedemontane di falda di detrito; sono comprese in questo gruppo anche le coperture costituite dai terrazzi marini e dei terreni di riporto, data la particolare natura e giacitura dei terreni rispetto al bedrock. Per tale scenario di rischio bisogna considerare il pericolo di una eventuale amplificazione diffusa del moto del suolo, dovuta a differenza di risposta sismica tra substrato e copertura.

Per quanto riguarda, invece, la classificazione dei terreni in base alla risposta alle sollecitazioni indotte da onde di taglio  $V_s$ , come previsto nell'All.to F della più volte citata Circolare A.R.T.A., nell'area del Teatro Greco-Romano di Taormina sono individuabili (Fig. 30) terreni calcareo-dolomitici attribuibili alla classe S1, comma a, comprendenti: "Rocce lapidee, con eventuale strato superficiale di alterazione o copertura non superiore a 5-10 m, o altro materiale caratterizzato comunque da velocità  $V_s$  di propagazione delle onde sismiche trasversali superiore a 700 m/s".

Una ulteriore indicazione sulle condizioni di pericolosità sismica viene fornita, tramite il rilievo dei micro-tremori naturali ("noise").

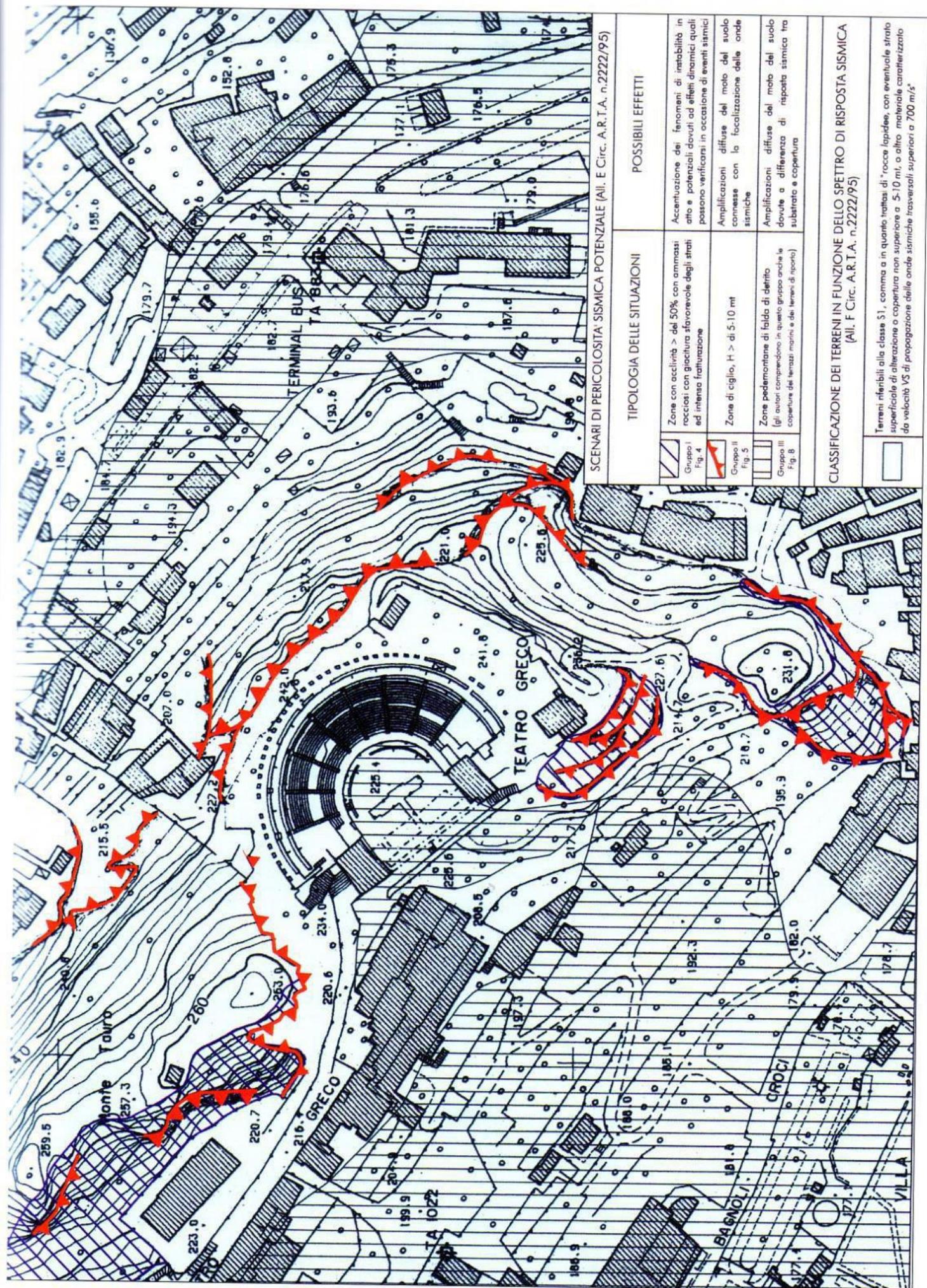


Fig. 30 - Pericolosità sismica locale

In un recente studio di F. Lentini et. al. (1996) vengono riportati i risultati di una campionatura dei microtremori per i quali alcuni dei siti di registrazione ricadono in zona Monte Tauro e zona Teatro. Da tali indagini gli Autori concludono che la risposta del sito sembra essere quasi esclusivamente influenzata dall'assetto morfostrutturale dell'area; i massimi ed i minimi di frequenza sono riscontrati in corrispondenza degli alti morfologici, rispettivamente lungo le scarpate ripide e nelle depressioni.

Anche nell'ambito del presente studio sono stati eseguiti campionamenti dei microtremori in n° 3 siti rappresentativi nell'area del Teatro.

Da tale indagine risulta che l'area presenta dei picchi significativi intorno ad 1Hz con discreti fattori di amplificazione. L'analisi dei fattori di amplificazione spettrale risulta abbastanza ben correlata con l'andamento litostratigrafico, esaltando esclusivamente i picchi a frequenza più elevata, laddove la roccia calcarea è subpianeggiante (MT1), mentre, dove è presente una potente copertura di terreni sciolti (MT2-MT3) sono evidenziati anche valori di picco a basse frequenze (0.8-1.2 Hz). Da tenere comunque in conto, per quanto riguarda le amplificazioni riscontrate nei diversi siti, sia l'effetto morfologico (MT1 ed MT3 – punti di registra-

zione prossimi ad importanti e brusche rotture di pendenza), sia il contributo in frequenza prodotto dall'oscillazione di strutture vicine (MT3), sia la sorgente di "noise" non rilevabile né quantificabile costituita dal passaggio dei veicoli nelle sottostanti gallerie autostradali.

Infine, in caso di sisma potrebbe esistere la possibilità di fenomeni di doppia risonanza qualora i periodi predominanti delle strutture monumentali dell'area risultino uguali o prossime a quelli del sottosuolo evidenziati dal rilievo eseguito.

### INDICAZIONI SUI POSSIBILI INTERVENTI FINALIZZATI A RIDURRE IL RISCHIO PER FRANE DI CROLLO

Nel presente capitolo si forniscono indicazioni su possibili interventi di consolidamento della parete rocciosa nord-ovest incombente sul Teatro che determina condizioni di rischio molto elevato per il manufatto e la sua fruizione, come illustrato in precedenza.

In generale i problemi di stabilità del fronte roccioso riguardano:

1. tratti estesi di roccia fratturata e/o con blocchi rocciosi in equilibrio instabile di volume massimo del-

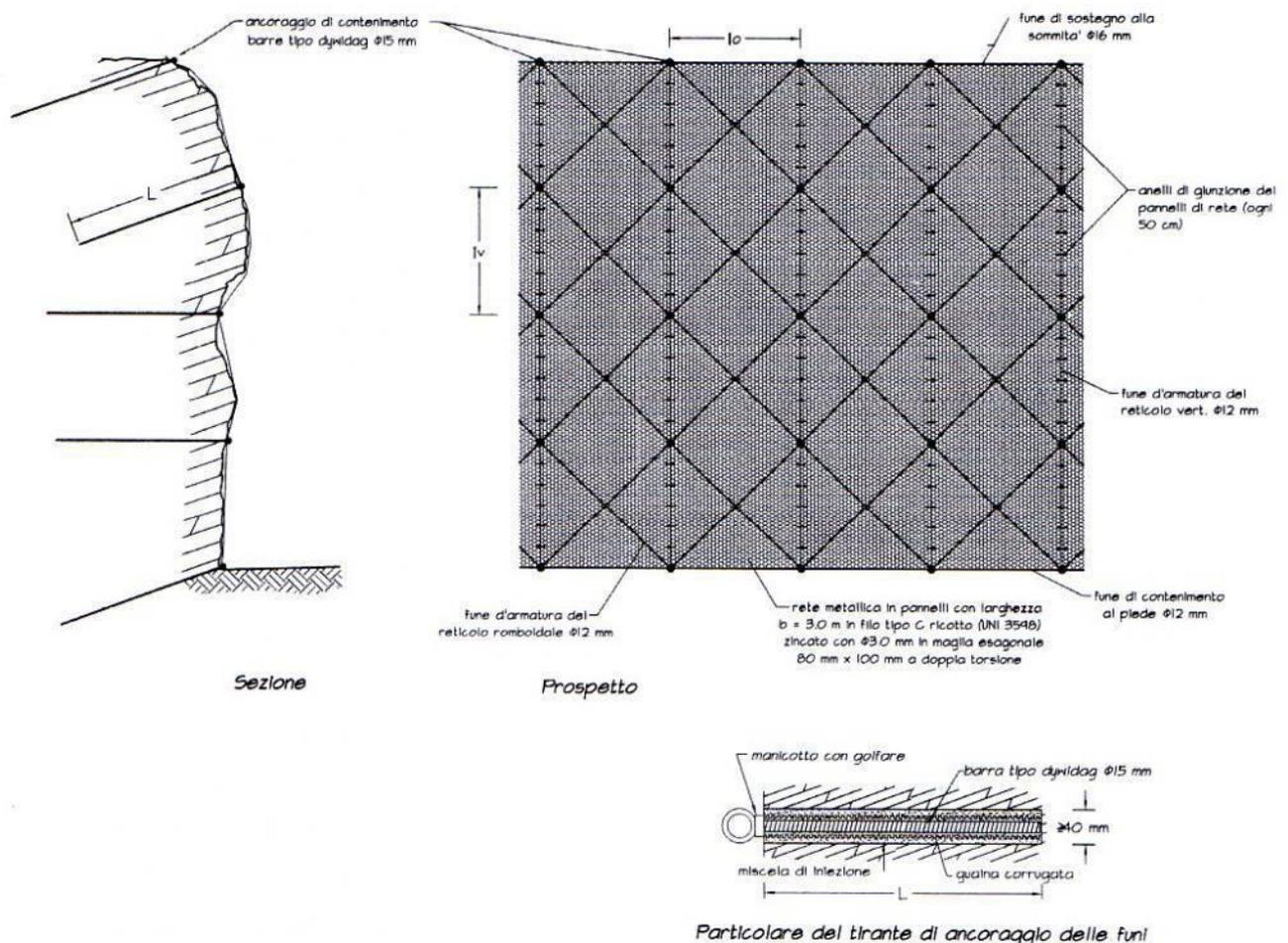


Fig. 31 – Intervento tipo di rafforzamento corticale



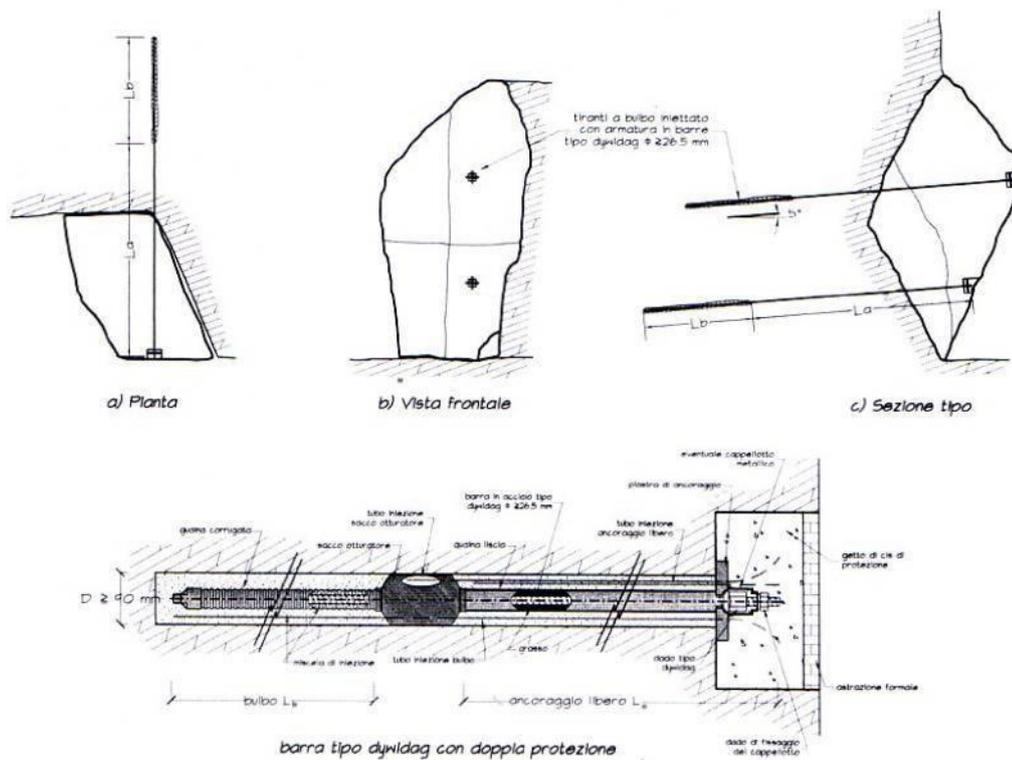
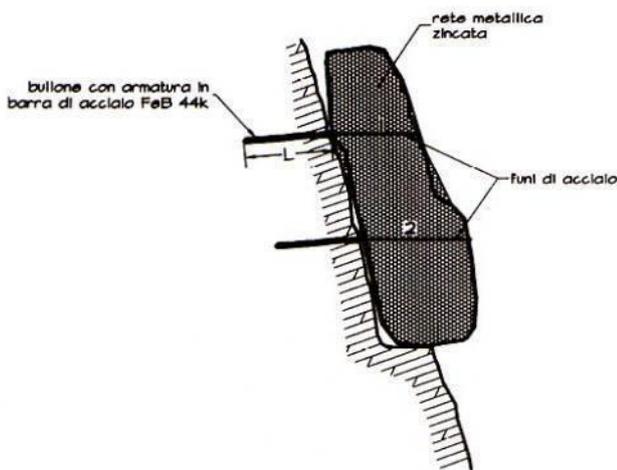
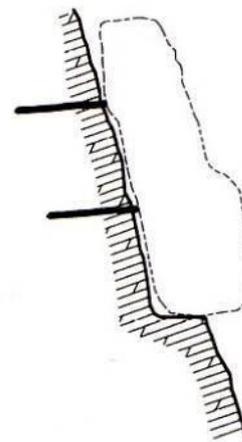


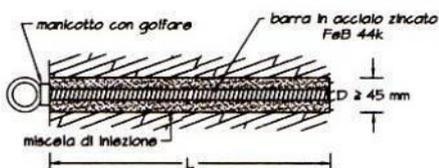
Fig. 33 – Intervento tipo di placcaggio diretto mediante tiranti



FASE 1 - Imbracatura preliminare



FASE 2 - Disgregazione mediante espansivi chimici ed asportazione dei frammenti



barra in acciaio FeB 44k di ancoraggio delle funi

Fig. 34 – Intervento tipo di frantumazione mediante espansivi chimici previa imbracatura preliminare

assicurare temporaneamente la stabilità dell'elemento lapideo durante la fase di perforazione e di sostenere i frammenti prodotti dalla disgregazione, che saranno, poi, allontanati da rocciatori (Fig. 34).

Per limitare l'impatto visivo in un contesto nel quale l'ambiente circostante al Teatro insieme al manufatto

costituisce un "Complesso Monumentale" di particolare pregio, le testate dei tiranti di placcaggio dovranno essere realizzate all'interno di nicchie trattate, sulla parete a vista, con l'astrazione formale. Inoltre gli interventi di consolidamento dovranno essere "reversibili", per cui non dovranno deteriorarsi determinando pro-

blemi di natura chimica nel loro intorno. Per tale aspetto, oltre che per garantirne la durabilità nel tempo, particolare cura dovrà essere posta per ostacolare i fenomeni di corrosione delle parti metalliche. In particolare:

- tutti gli elementi metallici esterni, quali le asole di passaggio delle funi di imbracatura e/o i manicotti con i golfari da applicare alle barre di ancoraggio delle funi di imbracatura, dovranno essere zincati e/o trattati con prodotti anticorrosione;
- le piastre di acciaio di testata delle barre di placcaggio diretto degli elementi lapidei in equilibrio instabile dovranno essere collocate all'interno di nicchie scavate nella roccia e annegate in un getto di calcestruzzo di protezione;
- le barre di armatura dei tiranti dovranno essere tipo "con doppia protezione nei riguardi della corrosione", provviste di guaina in materiale plastico, "liscia" in corrispondenza della zona di ancoraggio libero e "corrugata" in corrispondenza della fondazione o "bulbo".

Evidentemente gli interventi sono stati indicati in maniera schematica; per la relativa progettazione esecutiva occorre l'individuazione ed il rilievo geometrico e geostrutturale dei singoli elementi lapidei in equilibrio instabile.

## CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

E' stato condotto uno studio geologico e geotecnico sull'area del Teatro Greco-Romano di Taormina finalizzato alla valutazione delle condizioni di pericolosità idrogeologica che possono rappresentare elementi di rischio per il Teatro.

Il sito del Teatro Greco-Romano si localizza all'estremità orientale dell'abitato di Taormina, lungo il versante sud-occidentale della dorsale di M. Tauro, che dalla sommità degrada con una morfologia piuttosto articolata verso valle, in direzione della Via Bagnoli Croci e della Villa Comunale.

La dorsale di M. Tauro è caratterizzata da una monoclinale avente direzione prevalentemente NW-SE, immergente a SW, costituita di calcari e calcari dolomitici del Lias inf. Due differenti sistemi di faglie dissecano la dorsale: uno, orientato NW-SE, riconducibile all'ampio sistema Sud-Tirrenico, è responsabile del ribassamento progressivo dei fianchi della dorsale; il secondo, orientato NE-SW, riconducibile all'ampio sistema Messina-Etna, ha, invece, determinato il ribassamento generale della dorsale verso mare e, nella zona del Teatro, un ribassamento a conca, sul quale è stata, successivamente, modellata la struttura monumentale.

Il Teatro è stato realizzato adattandosi, seppure con parziali interventi di scavo, alla morfologia dei luoghi, che ben si prestava alla realizzazione della cavea, che infatti insiste su un substrato lapideo costituito di roccia calcarea. Per la realizzazione dell'orchestra e della scena sono state necessarie parziali opere di rinterro per la regolarizzazione morfologica dei luoghi: in tali zone il substrato carbonatico è ricoperto di terreni di riporto aventi spessore dell'ordine dei 6 ÷ 10 m.

Il complesso teatrale è circondato da pendici carbonatiche piuttosto ripide con scarpate subverticali, in buona parte naturali, attribuibili a scarpate di faglia, esumate dalla erosione selettiva, o scarpate determinate dall'affioramento delle testate dei banconi carbonatici, messi in evidenza dalla erosione selettiva medesima. Sono frequenti, inoltre, le scarpate artificiali dovute ad attività di sbancamento operate a seguito della intensa antropizzazione circostante l'area del Teatro.

Mediante dettagliati rilievi geostrutturali, condotti anche sui fronti rocciosi con metodi alpinistici, è risultato che nei costoni carbonatici che marginano l'area del Teatro sono presenti quattro famiglie di discontinuità comprendenti, oltre i piani di stratificazione, mediamente inclinati di circa 35° sull'orizzontale, giunti variamente orientati con inclinazioni comprese tra 60° circa e 90° circa. Tali discontinuità presentano aperture in genere molto basse, di ordine millimetrico fino a centimetrico, e persistenze dell'ordine del metro: esse influenzano in maniera determinante il comportamento dell'ammasso roccioso, caratterizzato da una configurazione "a blocchi", che possono subire fenomeni di "sliding" (ossia di scorrimento) e di "toppling" (ribaltamento). Dalle verifiche di stabilità è, infatti, risultato che tali fenomeni di rottura sono cinematicamente e meccanicamente possibili, soprattutto in seno alla parete rocciosa incombente a nord-ovest sul Teatro.

Dallo studio eseguito emergono sostanzialmente due situazioni di criticità che possono in qualche modo compromettere lo stato di conservazione del bene archeologico-monumentale e le condizioni di sicurezza del flusso turistico e della fruizione teatrale vera e propria:-

- *il distacco di volumi lapidei dai fronti rocciosi*, come innanzi indicato. Condizioni di pericolosità per il sito del Teatro si verificano dai costoni rocciosi posti a NW e a Sud. Per la mutua posizione fra i fronti ed i manufatti a valle e per l'altezza dei costoni, il distacco di volumi lapidei dalla parete carbonatica a NW mette in pericolo il settore nord-occidentale del Teatro, oltre che la strada di accesso al Teatro ed i manufatti ubicati lateralmente ad essa. Il crollo di

massi dalla parete sud determina condizioni di pericolo per una strada secondaria di accesso al Teatro. Il livello di pericolosità risulta molto elevato. Considerata la grande importanza turistico-monumentale e l'elevata vulnerabilità del Teatro, certamente non in grado di resistere all'impatto di blocchi, anche il livello di rischio risulta molto elevato, pari ad R4 nella scala delle classi di rischio idrogeologico fissate dalla normativa nazionale.

- *il deflusso incontrollato delle acque superficiali* che, in occasione di eventi meteorici intensi, interessa le aree della cavea, dove esplica un'azione dilavante e di erosione del materiale incoerente in affioramento a copertura del substrato lapideo, e dell'arena, ove si accumula il materiale asportato. La classe di rischio nei confronti di tale fenomeno è R2.

Per le problematiche innanzi illustrate, per la salvaguardia del Teatro e della sua funzionalità devono essere realizzati interventi di consolidamento dei costoni rocciosi su esso incombenti, di cui sono state indicate le possibili tipologie, nonché interventi di raccolta e regimazione delle acque superficiali.

Oltre al rischio idrogeologico nel sito del Teatro Greco-Romano di Taormina si configurano anche condizioni di *rischio sismico*. Da una ricerca storica emerge che la sismicità registrata nel territorio di Taormina rientra nel quadro sismico generale della Sicilia orientale, notoriamente più volte sconvolta da fenomeni catastrofici. I terremoti appaiono distribuiti principalmente lungo faglie regionali che hanno giocato un ruolo nella recente evoluzione geodinamica dell'area. Le zone sismogenetiche principali comprendono:

- l'area dello Stretto di Messina, dove sono stati ipotizzati sistemi complessi di faglie distensive a recente attività;
- la catena costiera peloritana, versante tirrenico, la cui sismicità è associabile a strutture trascorrenti destre, orientate NW-SE, di secondo ordine rispetto alla Linea Tindari-Giardini, e alle faglie normali NE-SW responsabili del sollevamento della Catena;
- le strutture Sud-Tirreniche orientate circa E-W presenti in mare, in Sicilia sud-orientale;
- la Scarpata Ibleo-Maltese, costituita da un sistema di faglie prevalentemente normali a direzione NNW-SSE, suddivisa in segmenti che, verso nord, si estendono fino all'area Etnea;
- l'area etnea, caratterizzata da faglie attive, anche di estensione limitata (15 Km).

Circa le condizioni di pericolosità sismica in termini di amplificazioni locali appare opportuno segnalare:

- le zone con acclività maggiore del 50% con ammassi rocciosi con giacitura sfavorevole degli strati e intensa fratturazione, per le quali bisogna considerare il pericolo di una eventuale accentuazione dei fenomeni di instabilità in atto o potenziali dovuta agli effetti dinamici che possono verificarsi in occasione di eventi sismici;
- le zone di ciglio e gli orli di scarpata, per i quali bisogna considerare il pericolo di una eventuale amplificazione diffusa del moto del suolo, connessa con la focalizzazione delle onde sismiche;
- le zone pedemontane di falda di detrito (comprendente anche le coperture di terrazzi marini e di terreni di riporto), connesse con potenziali amplificazioni diffuse del moto del suolo dovute a differenza di risposta sismica tra substrato e copertura.

Con riferimento alla classificazione dei terreni in base alla risposta alle sollecitazioni indotte da onde di taglio  $V_s$ , sono presenti terreni calcareo-dolomitici attribuibili alla classe S1, comma a, della Circolare A.R.T.A.n. 2222/95, comprendenti: "*Rocce lapidee, con eventuale strato superficiale di alterazione o copertura non superiore a 5-10 m, o altro materiale caratterizzato comunque da velocità  $V_s$  di propagazione delle onde sismiche trasversali superiore a 700 m/s*".

Per quanto riguarda, infine, i microtremiti naturali, si hanno picchi a frequenza più elevata laddove la roccia calcarea è subpianeggiante, mentre dove è presente una potente copertura di terreni sciolti sono stati misurati anche valori di picco a basse frequenze. In caso di sisma, potrebbero verificarsi fenomeni di risonanza qualora i periodi predominanti della struttura monumentale risultino uguali o prossimi a quelli del sottosuolo.

Nell'ambito del presente studio si è evidenziato che, sulla base dei dati disponibili, è possibile effettuare una valutazione di massima sulla pericolosità sismica, da approfondire con studi di paleo e archeo-sismologia.

Per valutare gli aspetti relativi al rischio sismico nel suo complesso vanno ancora svolte tutte quelle ricerche ed analisi relative alla vulnerabilità dell'opera e alla storia dei danni subiti in passato dal complesso monumentale correlati con i terremoti storici. Tali studi sono indispensabili al fine di fornire migliori metodi possibili di intervento per la protezione e la fruizione del bene stesso.

È questo il settore di ricerca in fase di sviluppo.

## BIBLIOGRAFIA

- AMODIO MORELLI L., BONARDI G., COLONNA V., DIETRICH D., GIUNTA G., IPPOLITO F., LIGUORI V., LORENZONI S., PAGLIONICO A., PERRONE V., PICCARRETA G., RUSSO M., SCANDONE P., ZANETTIN LORENZONI E. & ZUPPETTA A. (1976), *L'arco calabro-peloritano nell'orogene appenninico-maghrebide*, Mem. Soc. Geol. It., 17, 1-60, 5 ff., 5 tabb., 1 carta geol.
- ATZORI P., GHISETTI F., PEZZINO A. & VEZZANI L. (1978), *Strutture ed evoluzione geodinamica recente dell'area peloritana (Sicilia nord-orientale)*, Boll. Soc. Geol. It., 97, 31-56.
- BARBANO M.S., COSENTINO M., LOMBARDO G. & PATANÈ G. (1980), *Isoseismal maps of Calabria and Sicily earthquakes (Southern Italy)*, C.N.R. - P.F. Geodinamica, Gruppo "Catalogo dei terremoti", Pubbl. N. 341, 116 pp.
- BARBANO M.S., CARROZZO M.T., CHIRENTI A., COSENTINO M., LOMBARDO G. & RIUSCETTI M. (1981), *Sismicità di Calabria e di Sicilia*, Rend. Soc. Geol. It., 4, 529-535.
- BARBANO M.S., CARROZZO M.T., CHIRENTI A., COSENTINO M., LOMBARDO G. & RIUSCETTI M. (1984), *Seismic zoning of Calabria and Sicily (South. Italy)*, Boll. Geof. Teor. Appl., 2, 101-102, 39-58.
- BARTON N.R. (1971), *A model study of the behaviour of excavated slopes*, Ph. D. Thesis, University of London, Imperial College of Science and Technology, pag. 520;
- BARTON N.R. (1971), *A relationship between joint roughness and joint shear strength*, Proc. International Symposium on Rock Fracture, Nancy, France, pagg. 1+8.
- BARTON N.R. (1973), *Review of a new shear strength criterion for rock joints*, Engineering Geology, Elsevier, Vol. 7, pagg. 287+332.
- BARTON N.R. (1977), *Estimating the shear strength of complex discontinuities*, Discussion, A.G.I. Associazione Geotecnica Italiana. The Geotechnics of Structurally Complex Formation, Int. Symp. Vol. II, pagg. 226[232].
- BARTON N.R., CHOUBEY V. (1977), *The shear strength of rock joints in theory and practice*, Rock Mechanics, Springer Verlag, Vol. X, pag. 154.
- BERNABÒ BREA L. (2000), *Restauri del Teatro Antico di Taormina*, Quaderni di Archeologia, Università di Messina. Rubbettino.
- BIANCA M., MONACO C., TORTORICI L. & CERNOBORI L. (1999), *Quaternary normal faulting in southeastern Sicily (Italy): a seismic source for the 1693 large earthquake*, Geophys. J. Int., 139, 370-394.
- BONARDI G., GIUNTA G., LIGUORI V., PERRONE V., RUSSO M. & ZUPPETTA A. (1976), *Schema geologico dei Monti Peloritani*, Boll. Soc. Geol. It., 95, 1-26.
- BOSCHI E., FERRARI G., GASPERINI P., GUIDOBONI E., SMIRIGLIO G. & VALENSISE G. (1995), *Catalogo dei forti terremoti in Italia dal 461 a.C. al 1980*, Istituto Nazionale di Geofisica, S.G.A., Roma.
- CAIRE A., DUEE G. & TRUILLET R. (1965), *La chaîne calcaire des monts Peloritans (Sicile)*, Bull. Soc. Geol. France, 7, 881-888.
- CARBONE S., CATALANO S., LENTINI F. & VINCI G. (1994), *Carta geologica dei Monti di Taormina (M. Peloritani - Sicilia nord-orientale) - Scala 1:25.000*, S.E.L.C.A., Firenze.
- CARMISCIANO R. & PUGLISI D. (1979), *Caratteri petrografici delle arenarie del Flysch di capo d'Orlando (Monti Peloritani, Sicilia nord-orientale)*, Rend. Soc. It. Min. Petr., 34 (1978), f. 2, 403-424, 10 ff., 5 tabb.
- CATALANO S. & CINQUE A. (1995), *L'evoluzione neotettonica dei Peloritani settentrionali (Sicilia nord-orientale): il contributo di una analisi geomorfologica preliminare*, Studi Geologici Camerti, Vol. Spec.
- CATALANO S. & DI STEFANO A. (1996), *Nuovi dati geologici e stratigrafici sul Flysch di Capo d'Orlando nei Peloritani Orientali (Sicilia Nord-Orientale)*, Mem. Soc. Geol. It. (77° Congresso Nazionale SGI - Bari, 1994), 51, 16 pp.
- C.N.R. (1985), *Progetto Finalizzato Geodinamica - Atlas of Isoseismal maps of Italian earthquakes*, Bologna;
- DEERE D.U., MILLER R.P. (1966), *Engineering classification and index properties for intact rock*, Technical Report No. AFNL-TR-65-116 Air Force Weapons Laboratory, New Mexico.
- DI GERONIMO I., GHISETTI F., LENTINI F. & VEZZANI L. (1978), *Lineamenti neotettonici della Sicilia orientale*, Mem. Soc. Geol. It., 19, 543-549.
- D.N.E.L. (1977), *Catalogo dei terremoti avvenuti in Italia dall'anno 1000 al 1975*, Geotecnico S.p.A., S. Lorenzo in Campo.
- FINETTI I., LENTINI F., CARBONE S., CATALANO S. & DEL BEN A. (1996), *Il sistema Appennino Meridionale-Arco calabro-Sicilia nel Mediterraneo centrale: studio geologico-geofisico*, Boll. Soc. Geol. It., 115.
- GHISETTI F., PEZZINO A., ATZORI P. & VEZZANI L. (1991), *Un approccio strutturale per la definizione della linea di Taormina: risultati preliminari*, Mem. Soc. Geol. It., 47, 273-289, 9 ff.
- GRASSO M. & REUTHER C.D. (1988), *The western margin of the Hyblean plateau: a neotectonic transform system on the SE Sicilian foreland*, Ann. Tect., 2, 107-120.
- HOEK E., BRAY J. (1977), *Rock Slope Engineering*, The Institution of Mining and Metallurgy, London.
- PATTON F.D. (1966), *Multiple modes of shear failure in rock*, Proc. Ist. International Congress of Rock Mechanics, Lisbon, Vol. 1, pagg. 509+513.
- INTERNATIONAL SOCIETY FOR ROCK MECHANICS (1978), *Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses*, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 15, pagg. 319+368.
- INTERNATIONAL SOCIETY FOR ROCK MECHANICS (1981), *Rock Characterization, Testing and Monitoring - ISRM Suggested Methods*, E.T. Brown (editor), Pergamon, Oxford, pag. 211.
- INTERNATIONAL SOCIETY FOR ROCK MECHANICS (1981), *Basic Geotechnical Description of Rock Masses*, Int. J. Rock Mech. & Min. Sci., Vol. 18 n.1, pagg. 85+100.
- LENTINI F., CARBONE S., & CATALANO S. (1994), *Main structural domains of the central mediterranean region and their tectonic evolution*, Boll. Geof. Teor. e Appl., 36 (n° 141-144), 103-125.
- LENTINI F., CARBONE S., CATALANO S., VINCI G. & DI STEFANO A. (1998), *Schema geologico-strutturale della Sicilia nord-orientale*, S.E.L.C.A., Firenze.
- LENTINI F., CARBONE S., CATALANO S., DI STEFANO A., ROMEO M., STRAZZULLA S. & VINCI G. (1995a), *Sedimentary evolution of basins in mobile belts: examples from tertiary terrigenous sequences of the Peloritani Mts (NE Sicily)*, Terra Nova, 7, 2, 161-170.
- LENTINI F., CARBONE S., CATALANO S. & GRASSO M. (1995b), *Principali lineamenti strutturali della Sicilia nord-orientale*, Vol. Spec. Studi Geol. Camerti (1995/2) 319-329.
- LENTINI F., CARBONE S., CATALANO S. & GRASSO M. (1996a), *Elementi per la ricostruzione del quadro strutturale della Sicilia Orientale*, Mem. Soc. Geol. It., 51, 179-195.
- LENTINI F., CARBONE S., CATALANO S. & MONACO C. (1990), *Tettonica a thrust neogenica nella Catena Appenninico-maghrebide: esempi dalla Lucania e dalla Sicilia*, Studi Geol. Camerti, volume speciale (1990), 19-26.
- LENTINI F., CATALANO S., CARBONE S. & PATANÈ G. (1996c), *Studio geologico-morfologico-geofisico dell'area di Taormina*, S.E.L.C.A., Firenze.
- LENTINI F., CATALANO S. & CARBONE S. (2000), *Carta geologica della Provincia di Messina*, S.E.L.C.A., Firenze.
- LENTINI F., GRASSO M. & CARBONE S. (1987), *Introduzione alla geologia della Sicilia e guida all'escursione*, Conv. Soc. geol. It. su Sistemi Avanfossa-Avampae lungo la Catena Appenninico-Maghrebide, Naxos-Pergusa 22-25 aprile 1987.
- LENTINI F. & VEZZANI L. (1975), *Le unità meso-cenozoiche della copertura sedimentaria del basamento cristallino peloritano (Sicilia nord-orientale)*, Boll. Soc. Geol. It., 94, f. 3, 537-554.
- LENTINI F. & VEZZANI L. (1978), *Tentativo di elaborazione di uno schema strutturale della Sicilia orientale*, Mem. Soc. Geol. It., 19, 495-500.
- LOMBARDO G. (1980a), *Stratigrafia dei depositi pleistocenici della Sicilia nord-orientale*, Atti Acc. Gioenia Sc. Nat. Catania, 12, 84-113.
- MONACO C. & TORTORICI L. (1995), *Tettonica estensionale quaternaria nell'Arco Calabro e in Sicilia orientale*, Studi Geologici Camerti, Volume Speciale N. 2, 351-362.
- MONACO C. & TORTORICI L. (2000), *Active faulting in the Calabrian Arc and eastern Sicily*, J. of Geodynamics, 29, 407-424.
- MONACO C., BIANCA M., CATALANO S., DE GUIDI G. & TORTORICI L. (2002), *Sudden change in the Late Quaternary tectonic regime in eastern Sicily: evidences from geomorphological features*, Boll. Soc. Geol. It., Vol. Spec., 901-913.
- MONACO C., CATALANO S., DE GUIDI G., GRESTA S., LANGER H. & TORTORICI L. (2000), *The geological map of the urban area of Catania (eastern Sicily): morphotectonic and seismotectonic implications*, Mem. Soc. Geol. It., 55, 425-438.
- OGNIBEN L. (1960), *Nota illustrativa dello Schema geologico della Sicilia nord-orientale*, Riv. Min. Sic., 64-65, 183-212.
- PIEROTTI P. (2004), *Manuale di sismografia storica*, Edizioni Plus, Pisa.
- RIUSCETTI M. & SCHICK R. (1975), *Earthquakes ad tectonics in Southern Italy*, Boll. Geof. Teor. Appl., 17, 65, 59-78.
- STEWART I., CUNDY A., KERSHAW S. & FIRTH C. (1997), *Holocene coastal uplift in the Taormina area, northeastern Sicily: implications for the aouthern prolongation of the Calabrian seismogenic belt*, J. Geodynamics, 24, 37-50.
- TORTORICI L., MONACO C., TANSI C. & COCINA O. (1995), *Recent and active tectonics in the Calabrian arc (Southern Italy)*, Tectonophysics 243, 37-55.
- TRUILLET R. (1968), *Etude geologique des Peloritains orientaux (Sicile)*, These Fac. Sci., 2 voll., 547 pp., Paris.
- VARNES D.J. & IAEG COMMISSION ON LANDSLIDES (1984), *Landslide Hazard Zonation - A review of principles and practice*. UNESCO Paris. 63 pp.

## A cura di:

Unità operativa di Analisi Geologica Territoriale finalizzata al riequilibrio ambientale, del Centro Regionale Progettazione e Restauro

responsabile: Elena Scalone

PRO-GEO: Fabio Cafiso

GEOLITER: Palma Pratini, Ugo Piacentini

La stesura del presente lavoro hanno collaborato: i Dott.ri Alessandro Madonia e Carlo Saggio per i rilievi geologici e l'elaborazione dei dati (Geo.I.Ter.); gli Ingg. Angelo Brucchiari Marco Bonamini per i rilievi geostruturali (Pro-Geo.); la Dott.ssa Rosalba Spotorno per la valutazione sulla pericolosità sismica; l'Arch. Maria Tornatore per la ricerca storico-architettonica; l'Arch. Gaetano Napoli e Alessandra Saura (Geo.I.Ter.) per la grafica; Fabiola Saitta e Maria Settineri per la fotografia (Centro Regionale per la Progettazione e il Restauro). Le indagini geognostiche sono state eseguite dalla Ditta I.Co.S.E.M. Srl, le indagini sismiche dalla Ditta Geo Multiservice Snc.

## APPENDICE A

### *Documentazione fotografica*



Foto 1 - Panoramica sul promontorio di Taormina; in primo piano si osserva il Teatro.



Foto 2 - Vista generale della parete rocciosa nord-ovest con il Teatro sottostante



Foto 3 - Vista dal basso della parete rocciosa nord-ovest caratterizzata da una configurazione "a blocchi"



Foto 4 - Particolare della fascia superiore della parete nord-ovest



Foto 5 - Vista della parete rocciosa nord-ovest incombente sulla strada di accesso al Teatro. Si riconosce un grosso blocco a forma di pinnacolo in equilibrio instabile



Foto 6 - Altra vista della parete rocciosa nord-ovest con numerosi blocchi in equilibrio instabile

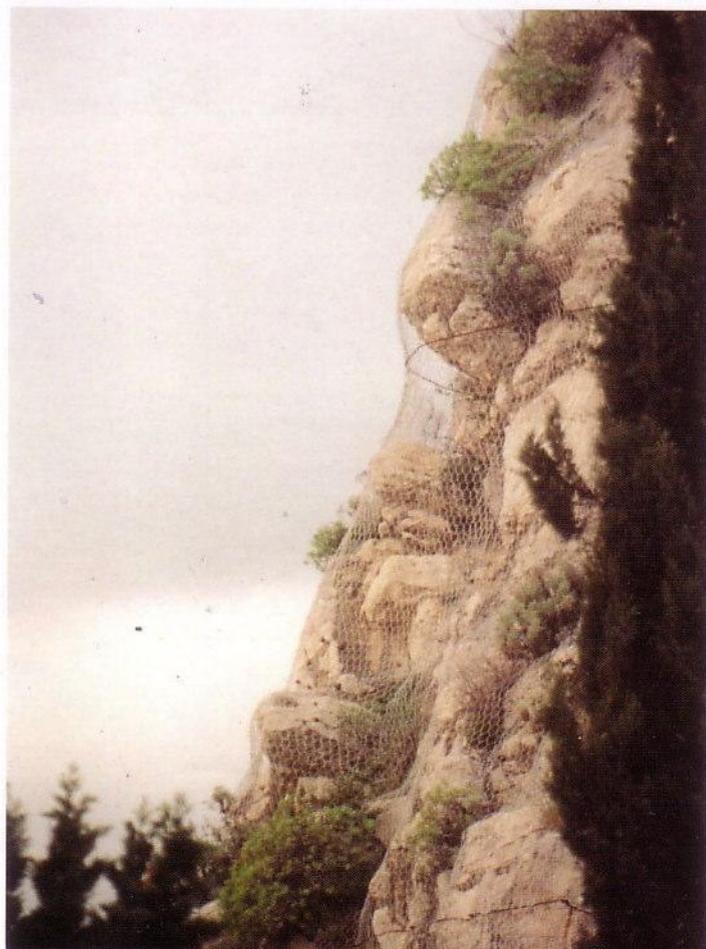
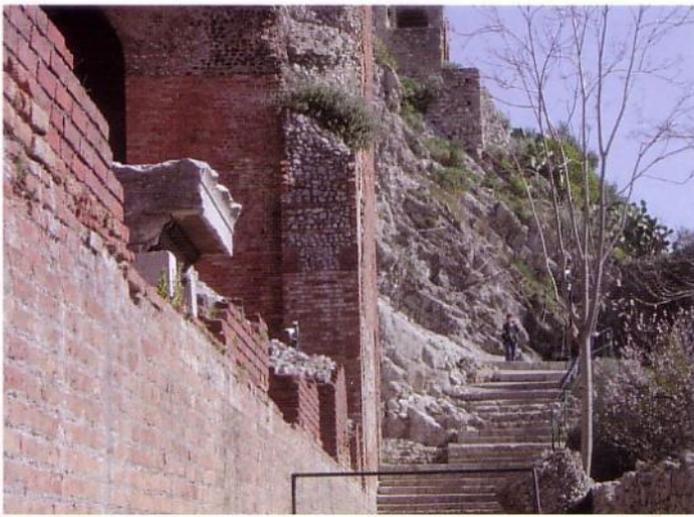


Foto 7 - Blocchi lapidei "a sbalzo" nella parete rocciosa nord-ovest



**Foto 8** - Vista della parete rocciosa sud-est incombente su una stradella di accesso al Teatro



**Foto 9** - Affioramento calcareo stratificato alla base della cavea



**Foto 10** - Affioramento calcareo in strati e banchi ai margini sud-est del Teatro



**Foto 11** - Affioramento di calcari grigi associati in superficie a terra rossa residuale derivante dalla soluzione dei carbonati



**Foto 12** - Zona della cavea soggetta a deflusso incontrollato delle acque superficiali



**Foto 13** - Rilievi geostrutturali eseguiti con metodi alpinistici

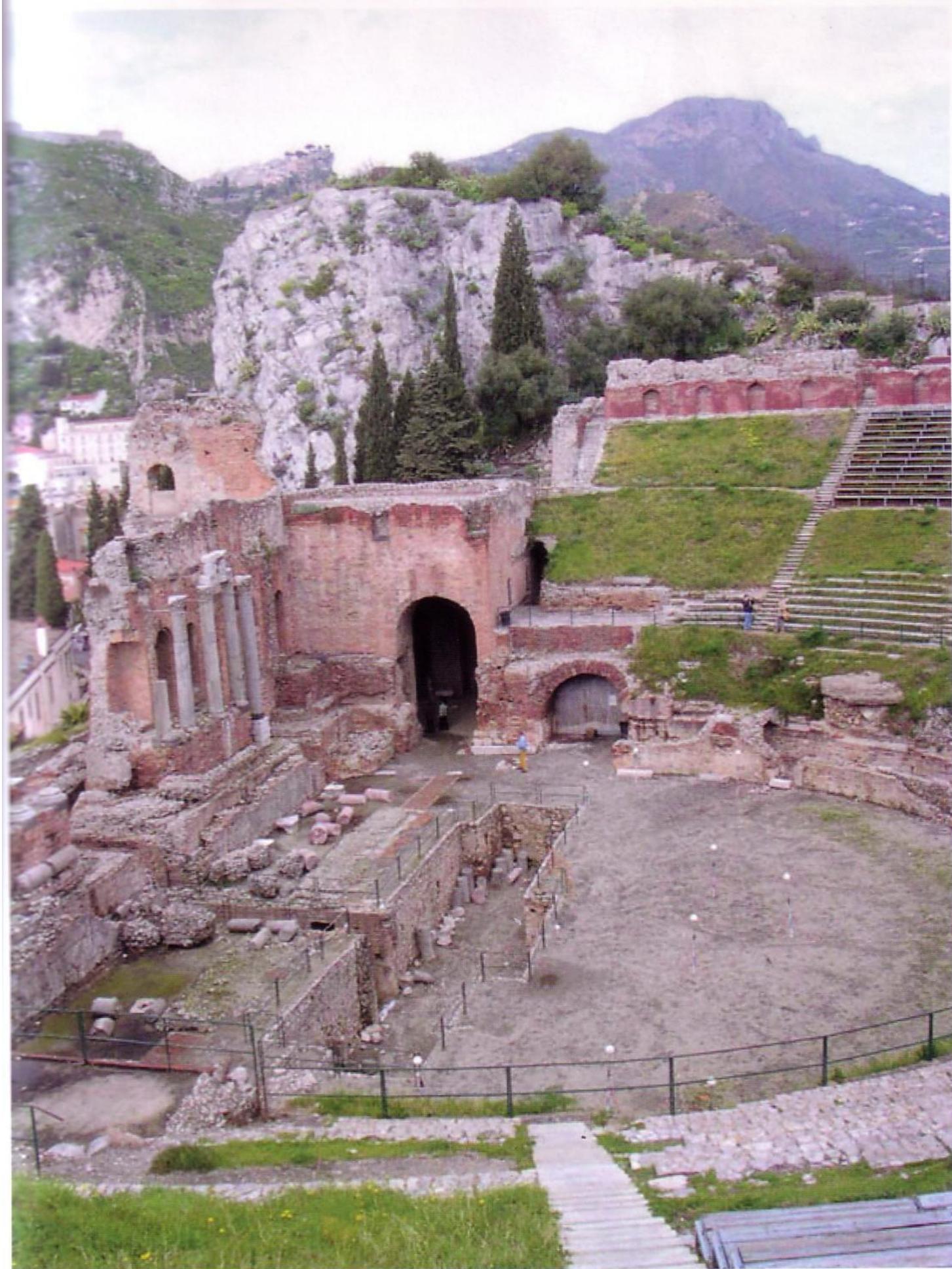


Foto 14 – Costone roccioso incombente sul settore nord-ovest del Teatro

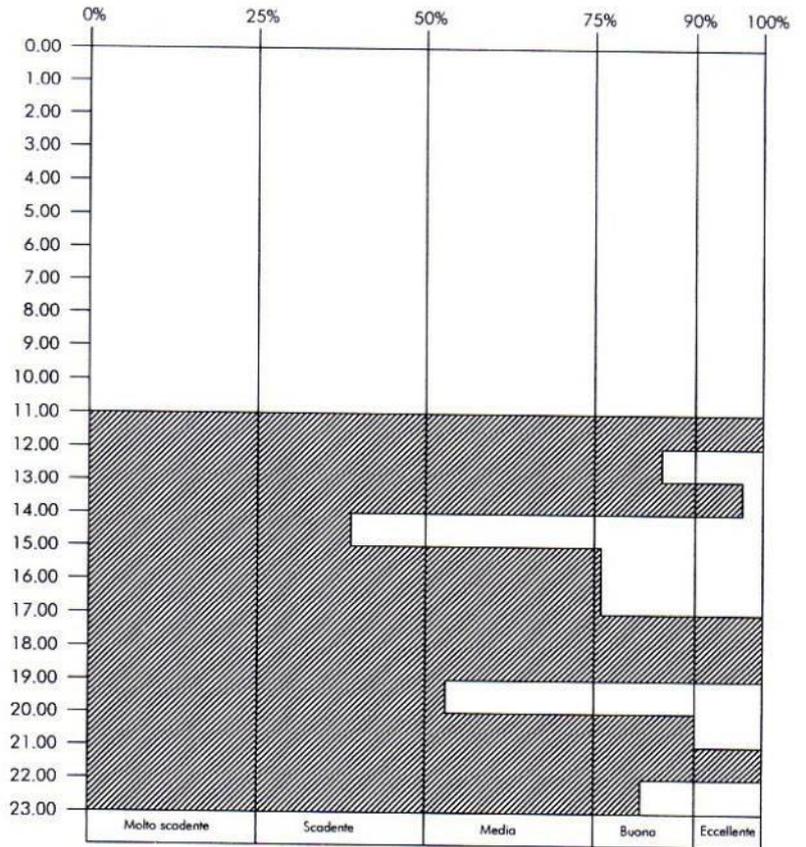
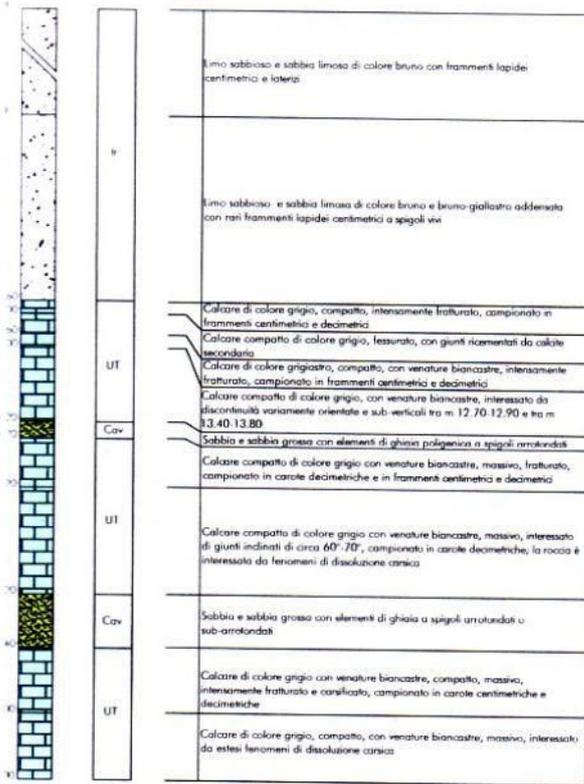


**Foto 15** – Stradella di accesso al Teatro sul lato nord-ovest  
messa in pericolo dall'eventuale distacco di volumi lapidei dal costone roccioso sovrastante

## APPENDICE B

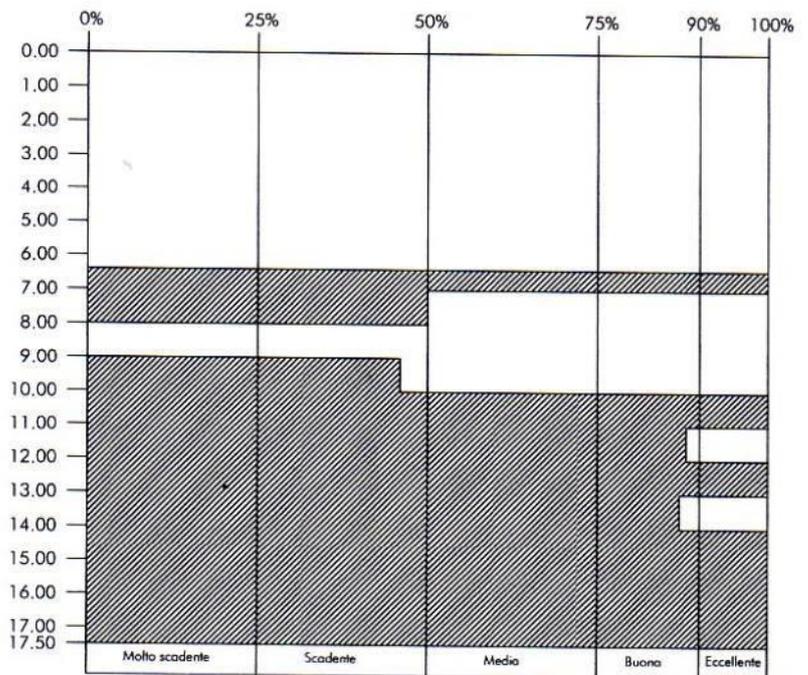
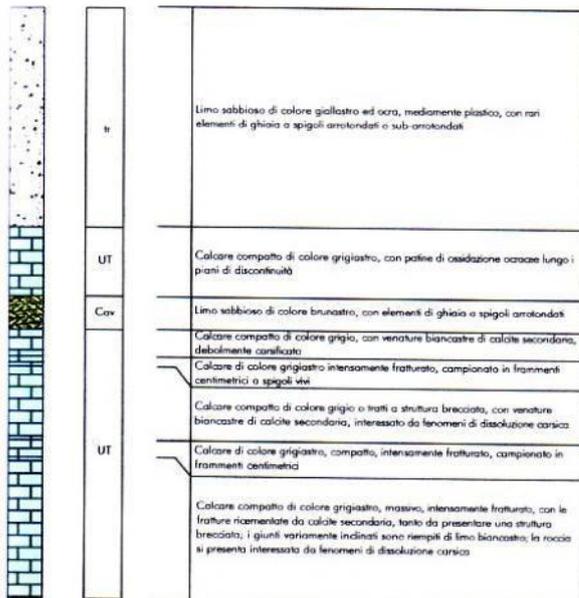
*Colonne stratigrafiche dei sondaggi  
con i valori di RQD*

S1

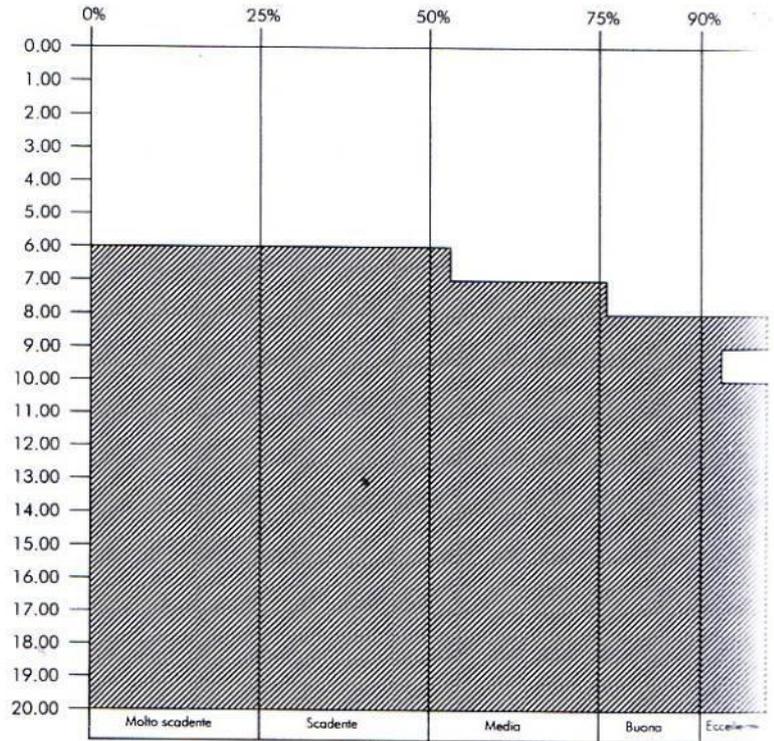
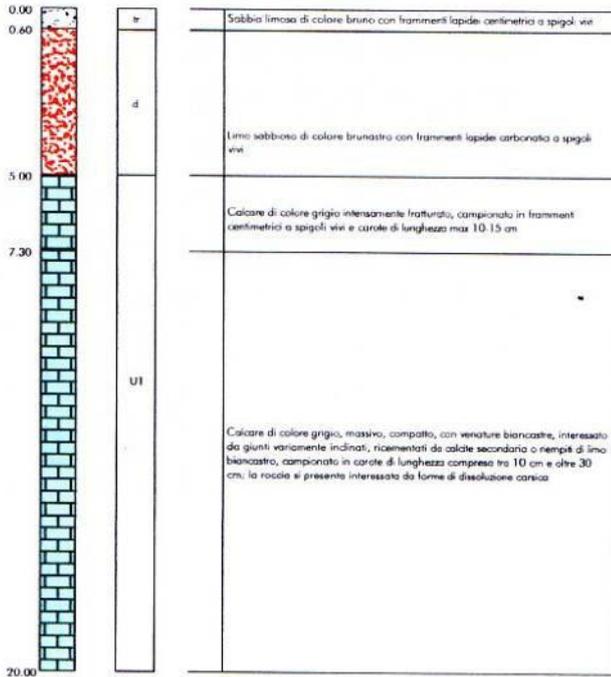


Stratigrafia del sondaggio meccanico S1 con indicazione dell'RQD

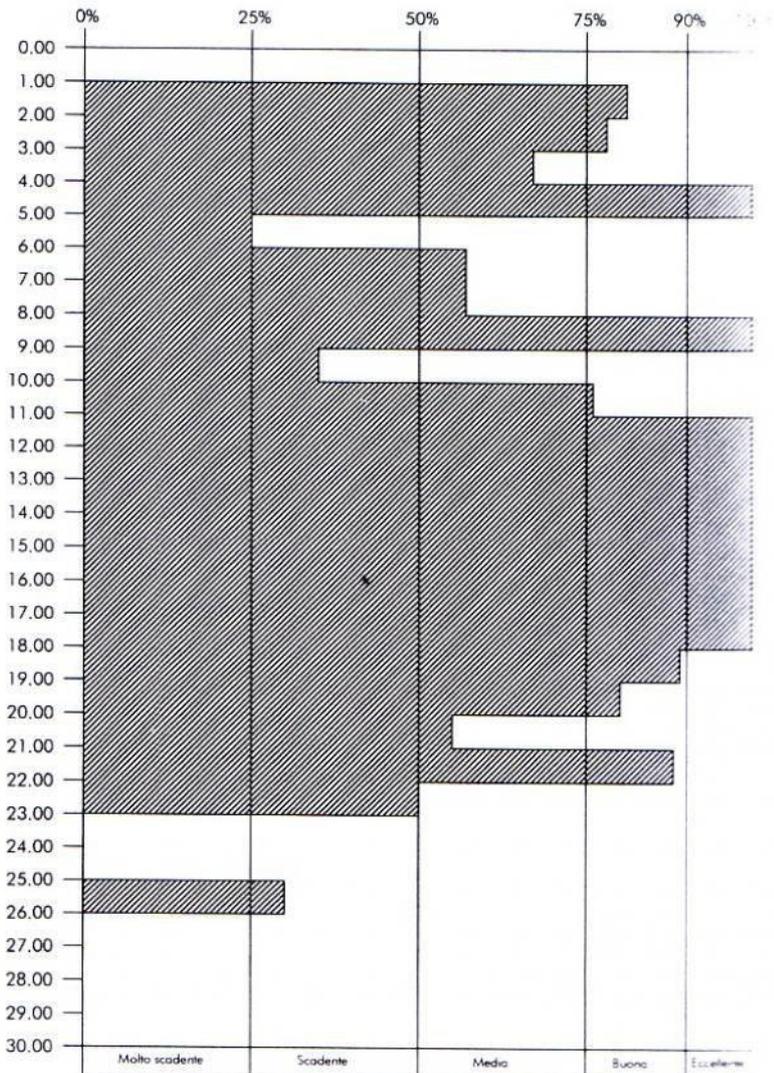
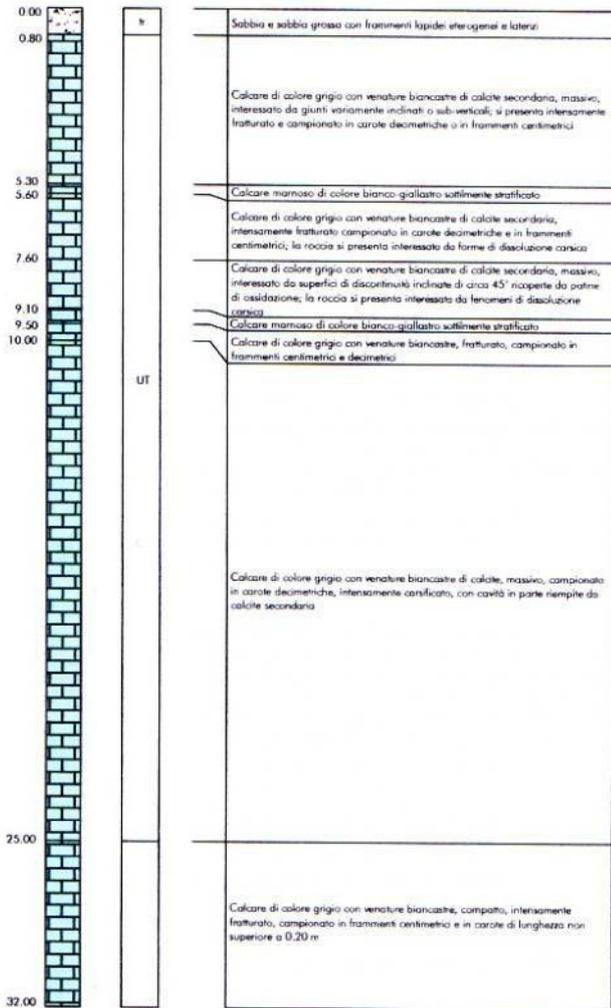
S2



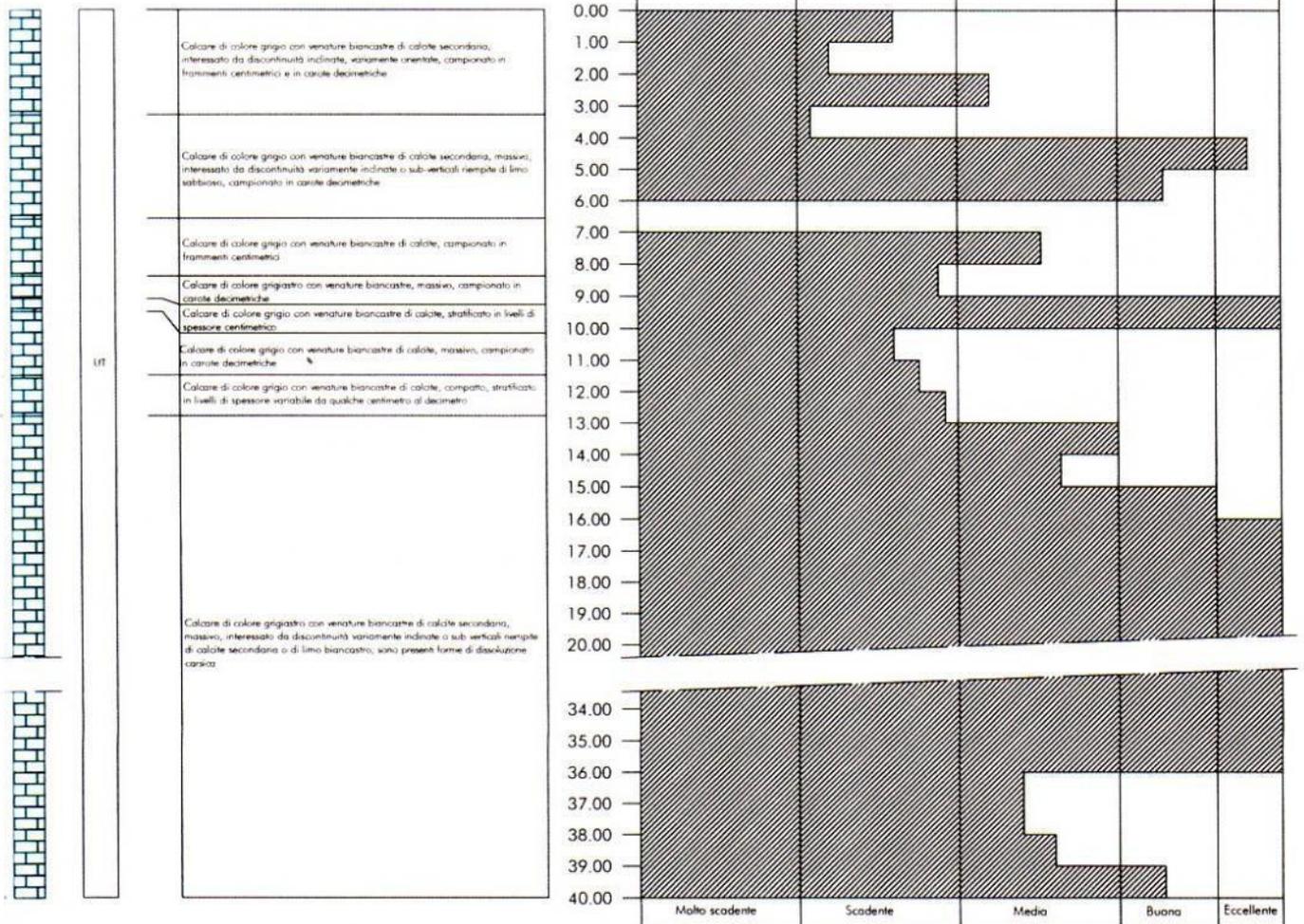
Stratigrafia del sondaggio meccanico S1 con indicazione dell'RQD



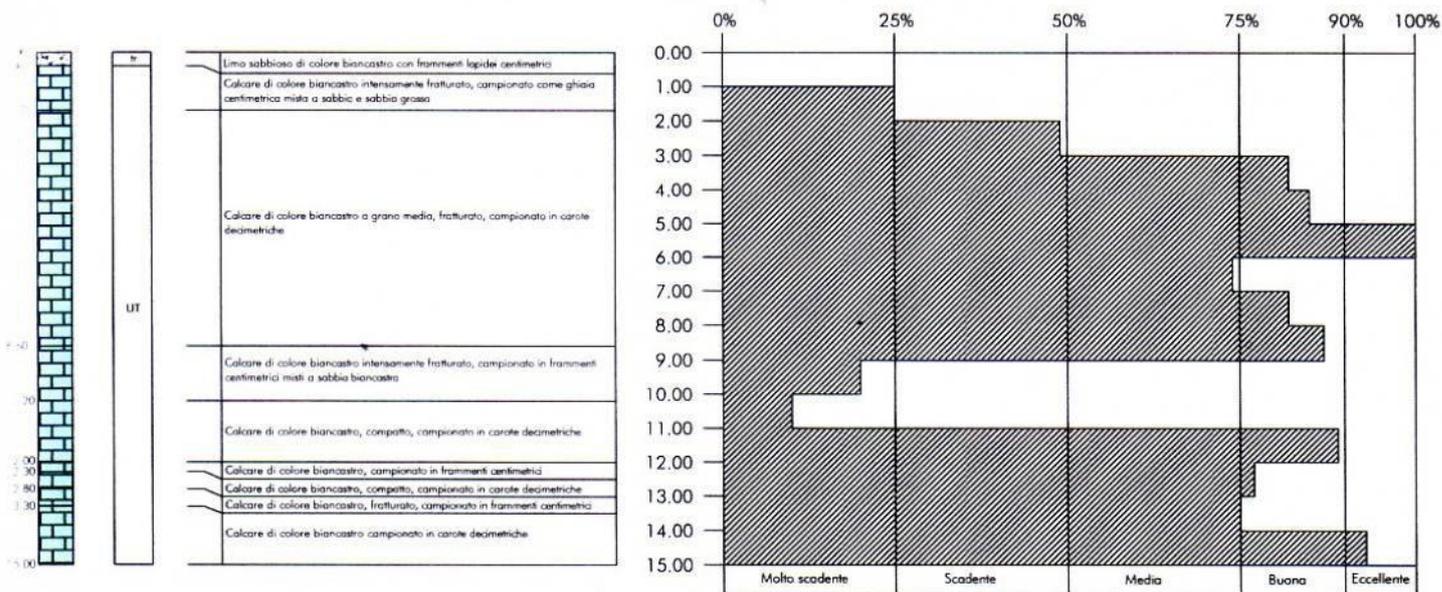
Stratigrafia del sondaggio meccanico S1 con indicazione dell'RQD



Stratigrafia del sondaggio meccanico S1 con indicazione dell'RQD



Stratigrafia del sondaggio meccanico S1 con indicazione dell'RQD



Stratigrafia del sondaggio meccanico S1 con indicazione dell'RQD

## APPENDICE C

*Definizione delle caratteristiche  
delle discontinuità nelle rocce lapidee*

# Definizione delle caratteristiche delle discontinuità nelle rocce lapidee

Le caratteristiche delle discontinuità utili ai fini della caratterizzazione geotecnica di un ammasso roccioso sono: l'orientazione, la spaziatura, la persistenza, la scabrezza, la resistenza della roccia in prossimità delle pareti, la apertura, la permeabilità e le proprietà meccaniche del materiale di riempimento eventualmente presente.

Le prime tre grandezze, nonché il numero di famiglia di discontinuità e le dimensioni dei massi in cui risulta suddiviso l'ammasso, definiscono la configurazione geometrica della struttura; le altre grandezze forniscono, unitamente alle precedenti, elementi per la caratterizzazione meccanica.

La cinematica degli spostamenti dei blocchi di un ammasso roccioso dipende dalla orientazione delle discontinuità che li delimitano, descritta dall'angolo di inclinazione  $\alpha$  e dall'azimut di inclinazione  $\beta$ , definiti in fig. A1a. Misurati in sito i valori di  $\alpha$  e  $\beta$  rappresentativi della giacitura di ciascuna superficie di discontinuità presente sul fronte di esposizione, mediante uno strumento chiamato bussola clinometrica del Prof. Clar, questi vengono restituiti in forma grafica sui diagrammi circolari di Schmidt. Alla costruzione di tali diagrammi si perviene utilizzando la tecnica grafica della proiezione sferica.

A tal fine, si immagini una sfera di raggio unitario che, essendo libera di traslare ma non di ruotare, mantiene rispetto al Nord una orientazione costante.

Portando idealmente a coincidere il centro della sfera con un punto del piano di discontinuità, quest'ultimo interseca la superficie sferica secondo un cerchio massimo o "meridiano".

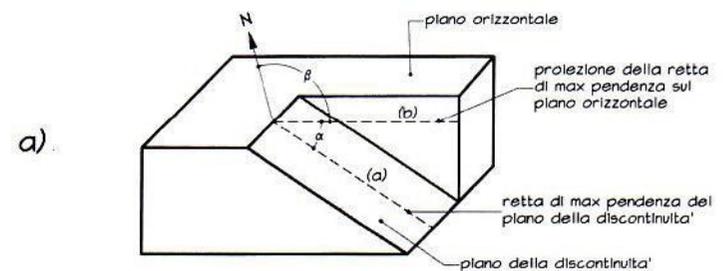
Oltre che dal meridiano, l'orientazione del piano di discontinuità può essere univocamente rappresentata dal "polo", punto di intersezione tra la superficie dell'emisfera inferiore e la retta, normale al piano, passante per il centro (fig. A1b).

Per la rappresentazione bidimensionale di tale costruzione ci si avvale della proiezione sferica a conservazione d'area (figg. A1b e A1c), in base alla quale esiste una proporzionalità diretta tra l'area di una qualsiasi porzione della superficie dell'emisfera e l'area della corrispondente proiezione sulla circonferenza equatoriale. Questa proprietà risulta assai utile ai fini

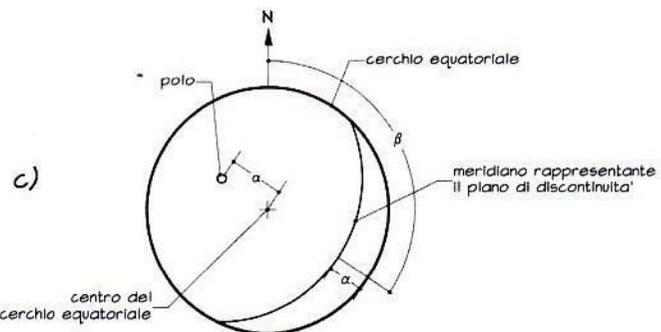
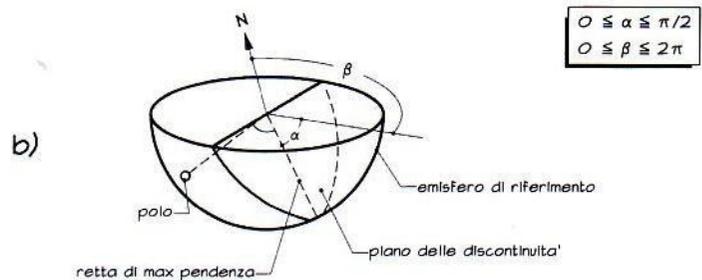
della elaborazione statistica dei dati di orientazione.

Per effettuare l'elaborazione statistica dei dati, risulta agevole fare riferimento a diagrammi su cui siano rappresentati solamente i poli delle superfici di discontinuità (diagrammi polari).

Infatti, poiché la presenza di discontinuità isorientate, e cioè appartenenti alla medesima famiglia, determina l'addensamento dei poli in aree discrete del diagramma, tale rappresentazione permette di individuare speditamente il numero di famiglie di discontinuità presenti nell'ammasso e di pervenire alla costruzione dei diagrammi di frequenza. Su questi ultimi, per ciascun raggruppamento, vengono tracciate le curve di isodensità, che contornano le aree in cui è presente la



$\alpha$ : angolo formato dalla retta (a) di max pendenza del piano di discontinuità con la sua proiezione (b) sul piano orizzontale  
 $\beta$ : angolo azimutale della retta (a) misurato in senso antiorario



**Fig. A1** – Definizione del sistema di riferimento per la rappresentazione grafica delle superfici di discontinuità e significato degli angoli di orientazione  $\alpha$  e  $\beta$

PROFILI DI SCABREZZA TIPICI	JRC
	0-2
	2-4
	4-6
	6-8
	8-10
	10-12
	12-14
	14-16
	16-18
	18-20
	Scala

Fig. A2 – Profili di scabrezza proposti da Barton per JRC variabile nell'intervallo 0-20

medesima percentuale di poli, allo scopo di individuare, per ciascuna famiglia, i valori degli angoli  $\alpha$  e  $\beta$  di massima densità. Sulla base dei valori di inclinazione e dell'azimut di inclinazione così determinati, vengono successivamente tracciati, sui diagrammi equatoriali, i meridiani rappresentativi di ciascuna famiglia di discontinuità.

La spaziatura è la distanza tra discontinuità adiacenti parallele o subparallele e viene misurata in centimetri.

Nel caso di rilievi lungo "scanlines", ossia lungo rette orientate, viene rilevata la cosiddetta "fracture intercept" che si indica con la lettera  $\lambda$  e rappresenta il numero di discontinuità a metro lineare di rilievo. Tale parametro può essere messo in relazione alla spaziatura.

La persistenza di una discontinuità, misurata in metri, viene identificata con la lunghezza della traccia di tale superficie sul fronte di esposizione.

Un altro parametro che interviene nel comportamento meccanico dell'ammasso roccioso è l'apertura delle discontinuità, e cioè la distanza che intercorre fra le pareti di quest'ultima.

La scabrezza è dovuta alla presenza di ondulazioni o gradini che modificano sensibilmente l'andamento geometrico complessivo della discontinuità, rispetto al piano di cui essa viene riferita. Tale grandezza viene rappresentata mediante il parametro JRC ("Joint Roughness Coefficient"), i cui valori sono stati proposti da Barton, come indicato in fig. A2.

# Monitoraggio vibrometrico eseguito durante la manifestazione canora Festivalbar 2002

LUCIO AMATO, GIOVANNI ANTONUCCI, VINCENZO CALABRESE

## PREMESSA

Su richiesta del Centro Restauro della Regione Siciliana - Assessorato dei Beni Culturali ed Ambientali e della P.I., la Tecno In S.r.l. ha eseguito un monitoraggio vibrometrico presso il Teatro Greco di Taormina (ME), al fine di misurare l'entità delle vibrazioni indotte dalla manifestazione canora *Festivalbar*, alle strutture del Teatro stesso.

Il piano di monitoraggio ha previsto l'installazione di cinque terne di velocimetri poste, rispettivamente, sulla sommità di una colonna ed al piede della stessa, sull'architrave congiungente due ulteriori colonne e sulla sommità di due muri a vela.

I dati rilevati nel corso delle misurazioni, sono stati successivamente elaborati e restituiti per desumere i valori di ampiezza e frequenza delle vibrazioni, evidenziare eventuali fenomenologie anomale, calcolare la distribuzione delle vibrazioni presso ciascun canale.

Infine, le grandezze misurate sono state raffrontate con i valori ammissibili riportati nella normativa italiana *UNI 9916*, tedesca *DIN 4150* e svizzera *Norm Sn 640 312a*.

Il monitoraggio vibrometrico suddetto è stato eseguito nel corso delle serate del *Festivalbar*, in data 21 e 22 giugno 2002, dal dott. geol. Giovanni Antonucci sotto la supervisione del dott. geol. Lucio Amato e, per la *Regione Siciliana*, del dott. Ing. Vincenzo Calabrese.

## TEATRO GRECO DI TAORMINA – BREVI CENNI STORICI

Il Teatro greco di Taormina costituisce un mirabile esempio di simbiosi tra arte e bellezza paesaggistica; infatti, il Teatro non è soltanto un pezzo del patrimonio archeologico di Taormina, ma è anche un luogo d'incomparabile bellezza panoramica poiché l'occhio spazia dalla baia di Naxos, alle coste calabre, all'Etna, a Castelmola.

Con ogni probabilità, il Teatro è stato costruito in epoca greca e ristrutturato ed ampliato in epoca romana. Una prova che il teatro sia di origine greca è data dalla presenza, sotto la scena, di blocchi di *pietra di Taormina*, che costituiscono il classico esempio del modo di costruire dei greci; successivamente il Teatro

fu ricostruito ed ingrandito dai Romani utilizzando mattoni d'argilla e calce.

Le misure attuali sono di 50 metri di larghezza, 120 di lunghezza, 20 d'altezza. Per dimensione è il secondo della Sicilia, dopo quello di Siracusa. Si divide in tre parti: la scena, l'orchestra e la cavea.

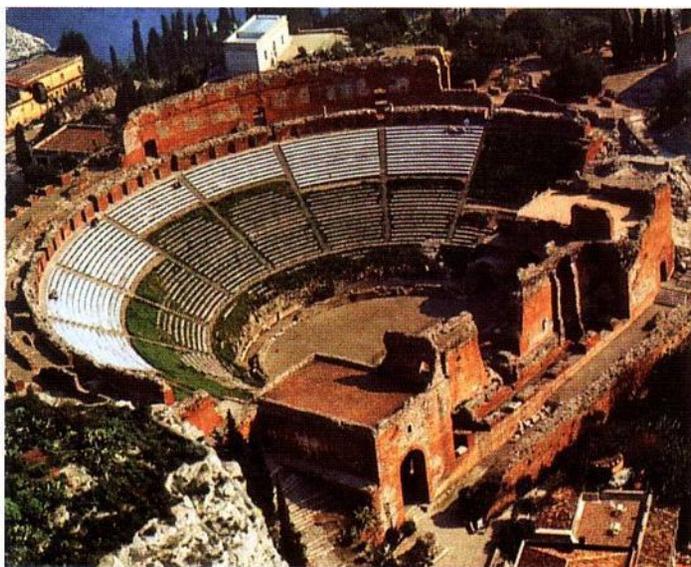


Foto 1 - Teatro greco di Taormina  
Vista dall'alto

La parte più importante è la scena, che parzialmente conserva la forma originale. Il muro scenico ha la lunghezza di m. 30 per 40. Due stanzoni laterali chiudevano la scena e la platea, impedendo il passaggio al pubblico. Il tetto di essi era costituito da due grandi terrazze, ancora esistenti.

La cavea è incavata nella roccia ed ha un diametro di 109 metri. È costituita dalla gradinata, che, partendo dal basso, sale fino alla sommità. I primi posti della cavea erano riservati alle autorità, mentre la parte alta era riservata alle donne. La plebe sostava sulle terrazze, che non avevano comunicazione con l'interno del teatro.

Un ampio velario riparava gli spettatori dal sole e dalla pioggia. La cavea era divisa in cinque corridoi anulari e verticalmente da otto scalette, formate da trenta gradini ciascuna. Le scalette partivano dalla cavea e arrivavano in alto al muro terminale, dove, in corrispondenza, si aprivano otto porticine, attraverso le quali si accedeva al corridoio coperto. Nel muro terminale le nicchie, ancora ben visibili, contenevano statue in esposizione.

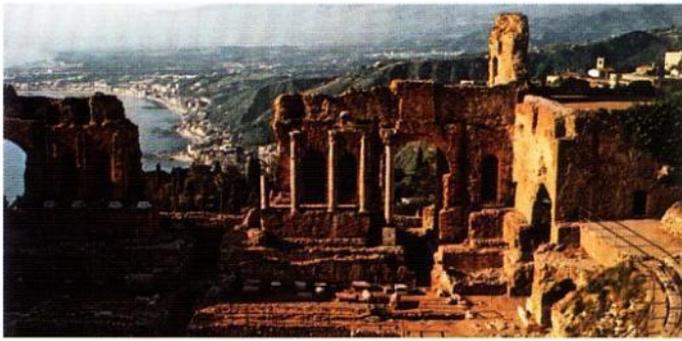


Foto 2 - Teatro greco di Taormina  
Vista dell'edificio scenico e scaenae frons

## MONITORAGGIO VIBROMETRICO: INSTALLAZIONE STRUMENTAZIONE

### Descrizione dell'installazione degli strumenti

Come accennato in premessa, il monitoraggio vibrometrico è stato eseguito al fine di misurare e quantificare le vibrazioni generate dalla manifestazione canora *Festivalbar* e trasmesse alle strutture del Teatro Greco di Taormina.

In dettaglio, su indicazioni del dott. Ing. Vincenzo Calabrese, gli strumenti di misura sono stati collocati presso i seguenti siti (Foto 3 [4]):

- sito A: sommità del muro a vela posto tra la versura di sud-est e l'edificio scenico;
- sito B: sommità del capitello della seconda colonna posta a sinistra della *scaenae frons* (nord-ovest);
- sito C: sommità dell'architrave congiungente la terza e quarta colonna poste a sinistra della *scaenae frons* (nord-ovest);
- sito D: sommità del muro a vela posto tra la versura di nord-ovest e l'edificio scenico;
- sito E: in prossimità della base della colonna di cui al sito B.

Per ciascun sito di misurazione, sono stati posizionati tre velocimetri, a componente orizzontale e verticale, in modo da misurare il valore della velocità della vibrazione lungo gli assi X, Y e Z.

Si precisa che, nella presente relazione, si fa riferi-



Foto 3 - Teatro greco di Taormina  
Posizionamento dei velocimetri

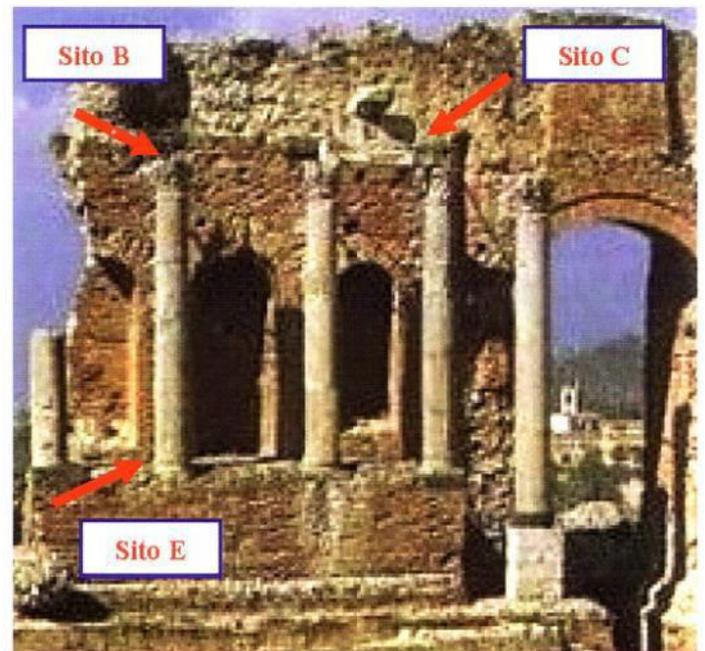


Foto 4 - Teatro greco di Taormina  
Posizionamento dei velocimetri. Particolare.

mento ai velocimetri a componente *orizzontale longitudinale*, per i trasduttori posizionati con asse di misurazione posto parallelamente all'edificio scenico e rivolto verso il mare, mentre i velocimetri a componente *orizzontale trasversale* sono stati ubicati ortogonalmente ai precedenti e rivolti verso Giardini Naxos (Tab.1).

<b>Monitoraggio vibrometrico</b> <b>Taormina (ME) - Teatro greco</b> <b>Ubicazione velocimetri</b>			
<b>n.</b>	<b>sito</b>	<b>componente</b>	<b>descrizione sito</b>
1	<b>A</b>	verticale	Muro a vela (sud-est)
2	<b>A</b>	orizzontale longitudinale	Muro a vela (sud-est)
3	<b>A</b>	orizzontale trasversale	Muro a vela (sud-est)
4	<b>B</b>	verticale	Sommità capitello seconda colonna (nord-ovest)
5	<b>B</b>	orizzontale longitudinale	Sommità capitello seconda colonna (nord-ovest)
6	<b>B</b>	orizzontale trasversale	Sommità capitello seconda colonna (nord-ovest)
7	<b>C</b>	verticale	Sommità architrave terza e quarta colonna (nord-ovest)
8	<b>C</b>	orizzontale longitudinale	Sommità architrave terza e quarta colonna (nord-ovest)
9	<b>C</b>	orizzontale trasversale	Sommità architrave terza e quarta colonna (nord-ovest)
10	<b>D</b>	verticale	Muro a vela (nord-ovest)
11	<b>D</b>	orizzontale longitudinale	Muro a vela (nord-ovest)
12	<b>D</b>	orizzontale trasversale	Muro a vela (nord-ovest)
13	<b>E</b>	verticale	Piede seconda colonna (nord-ovest)
14	<b>E</b>	orizzontale longitudinale	Piede seconda colonna (nord-ovest)
15	<b>E</b>	orizzontale trasversale	Piede seconda colonna (nord-ovest)

Tabella 1

#### Descrizione del sistema di acquisizione dati

Il sistema di acquisizione utilizzato per il rilievo delle vibrazioni, è costituito da:

- rilevatori di onde sismiche (velocimetri);
- scheda di acquisizione dati;
- personal computer per la registrazione e l'elaborazione dei dati;

Per le misurazioni in oggetto sono stati adoperati

velocimetri, mod. Mark L28B, 4,5 Hz, 395 Ohm, a componente sia verticale sia orizzontale. Tali strumenti sono costituiti da un magnete collegato con una molla alla struttura esterna del sensore, che vibra all'interno di un solenoide. La forza elettromotrice indotta è funzione della velocità con la quale la massa magnetica vibra; il legame fra velocità e forza elettromotrice indotta non è costante con la frequenza, e dipende dalla curva di risposta relativa agli strumenti impiegati (Fig.1).

Curva di risposta dei velocimetri L28B- 4,5Hz - 395ohm

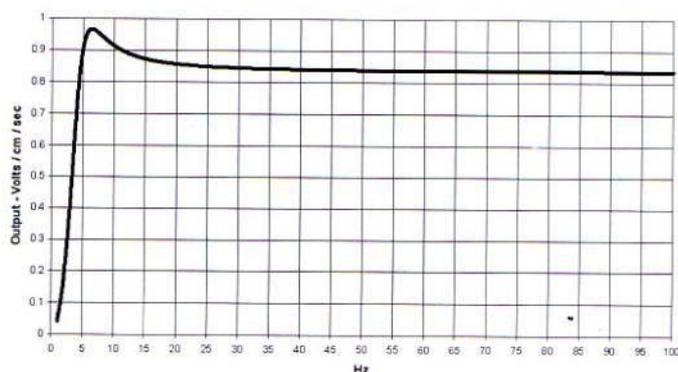


Fig.1

Il segnale rilevato dai velocimetri, è trasmesso in forma analogica ad una scheda di acquisizione dati che, dopo aver amplificato il segnale stesso, esegue una scansione dei canali in ingresso, alla frequenza di 100 punti al secondo per ogni canale.

Il ciclo di elaborazione prevede per ogni canale:

- l'esecuzione della trasformata di Fourier del segnale acquisito:

$$F_n(f) = \int_{-\infty}^{\infty} c_n(t) * e^{2\pi f t} dt$$

- la correzione per la curva di taratura dello strumento:

$$V_n(f) = F_n(f) * T(f) \text{ [convoluzione]}$$

- operazioni di derivazione direttamente nel dominio delle frequenze.
- l'esecuzione della trasformata inversa di Fourier:

I dati acquisiti sono stati memorizzati nella memoria di massa del personal computer ed in seguito elaborati, per risalire alla velocità ed alla frequenza caratteristica della vibrazione.

Si precisa che il sistema di acquisizione misura l'ampiezza delle vibrazioni in termini di velocità. I valori di accelerazione possono essere ricavati derivando la velocità, mediante algoritmi, direttamente nel dominio delle frequenze.

#### MONITORAGGIO VIBROMETRICO: ACQUISIZIONE DATI (21-22/06/02)

Come accennato nei precedenti paragrafi, il monitoraggio vibrometrico è stato finalizzato alla misurazione dell'entità delle vibrazioni, in termini di ampiezza e frequenza, indotte dalla manifestazione canora *Festivalbar* alle strutture del Teatro Antico.

Il monitoraggio vibrometrico ha avuto inizio in data 21 giugno 2002, con la rilevazione del rumore di fondo, ovvero, con la misurazione di microvibrazioni trasmesse alle strutture dalle attività antropiche produttive alla manifestazione ed attribuibili al montaggio del palco.

Successivamente, a partire dalle ore 20:15, si è proceduto alla misurazione delle vibrazioni indotte dalla manifestazione vera e propria. Le rilevazioni sono state eseguite impostando al sistema d'acquisizione la modalità di acquisizione "in continuo" ovvero memorizzando, per ciascun interprete (Tab.2 e Tab.3), l'intero brano musicale. Tale procedura ha portato alla memorizzazione di circa 80 Mb di dati e di ulteriori 230 Mb di dati elaborati.

#### Monitoraggio vibrometrico

Taormina (ME) - Teatro greco  
Rilevazioni del 21 giugno 2002

n.	ore	Evento e/o cantante	id. file
1	18:50	Rumore di fondo	Fondo
2	20:15	Applausi del pubblico	Applausi
3	20:39	Patricia Monterola	Monterol
4	20:45	Gabin	Gabin
5	20:50	Paola e Chiara	Paola
6	20:55	Grignani	Grignani
7	21:03	Articolo 31	Articolo
8	21:13	Ligabue	Ligabue
9	21:25	Christina Milian	Milian
10	21:32	Moony	Moony
11	21:40	Remy Shand	Shand
12	21:45	Marina Rey	Rey
13	21:50	Amanda Marshall	Marshall
14	22:03	Celine	Celine
15	22:10	Javier Garcia	Garcia
16	22:17	Neja	Neja
17	22:23	Daniele Stefani	Stefani
18	22:32	Sananda Maitreya (T.T. d'Arby)	Darby
19	22:37	Sananda Maitreya (T.T. d'Arby)	Darby_b
20	22:43	Jennifer Page	Page
21	22:47	Giorgia	Giorgia

Tab.2

## Monitoraggio vibrometrico

Taormina (ME) - Teatro greco  
Rilevazioni del 22 giugno 2002

n.	ore	Evento e/o cantante	id. file
1	15:30	Rumore di fondo	Fondo
2	20:28	You-You	YouYou
3	20:35	Sixty 5	Sixty
4	20:38	Daniele Silvestri	Silvestr
5	20:44	Biagio Antonacci	Biagio
6	20:50	Nek	Nek
7	20:59	Oasis	Oasis
8	21:04	Oasis (secondo brano)	Oasis_b
9	21:15	Alizée	Alisee
10	21:25	Planet Funk	Planet
11	21:30	Tricarico	Tricari
12	21:38	Tiziano Ferro	Ferro
13	21:44	Liberty X	Liberty
14	21:49	Dual Gang	Dualgang
15	21:55	Morcheeba	Morciba
16	22:00	Valentina Giovagnini	Giovagn
17	22:04	Amparanoia	Paranoia
18	22:12	Zucchero	Zucchero
19	22:16	Zucchero (secondo brano)	Zuccher2
20	22:25	Musti	Musti
21	22:37	Mango	Mango
22	22:44	Sigla di coda	Sigla

La restituzione dei segnali acquisiti è avvenuta sotto forma di diagrammi rappresentativi della fenomenologia nel dominio del tempo, come riportato negli Allegati A e B.

Si precisa che nei suddetti diagrammi, i valori dell'ampiezza delle vibrazioni sono espressi in cm/sec. Inoltre, negli allegati, le ampiezze delle vibrazioni sono state rappresentate sia "a scala intera", in modo da evidenziare anche i fenomeni di modesta entità (come riportato nell'esempio in Fig.2), sia in modalità grafica "autoscale" nella quale le tracce sono scalate in base alla vibrazione di maggior ampiezza (come riportato nell'esempio in Fig.3).

In totale, nel corso dell'intera manifestazione, sono stati memorizzati 1.300 files elaborati mediante i seguenti criteri:

- per ciascun canale è stata analizzata l'intera storia vibrazionale mediante analisi statistica e restituzione grafica tramite istogramma a classi di frequenza;
- per ciascun brano musicale, sono stati individuati i picchi di vibrazione di ampiezza massima; successivamente, selezionato il picco avente maggiore ampiezza, si è proceduto alla rappresentazione grafica della vibrazione per un intervallo di tempo pari a 30 secondi;
- analisi nel dominio delle frequenze per i segnali a maggiore ampiezza o caratterizzati da una morfologia di particolare interesse.

Tab.3

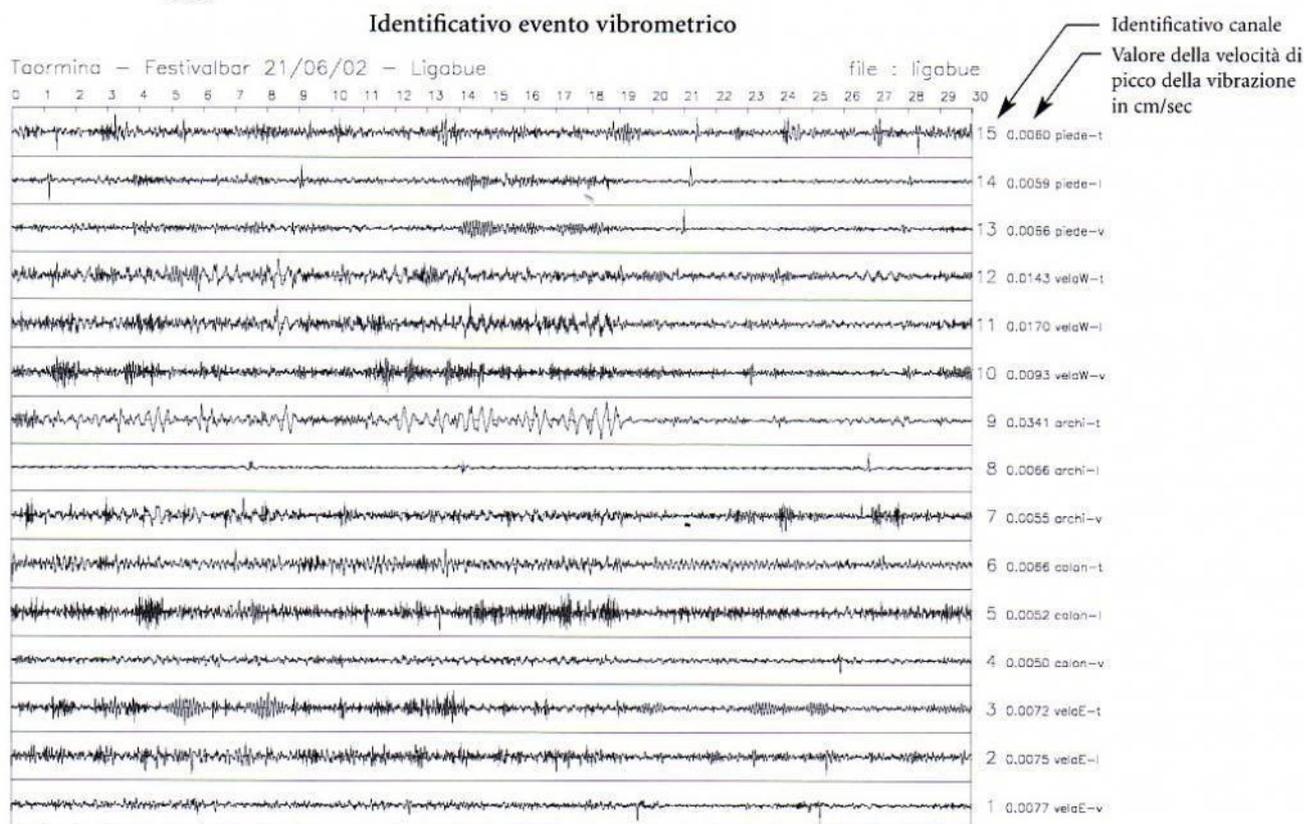


Fig. 2 - Chiave di lettura di un diagramma rappresentativo dell'andamento delle vibrazioni nel dominio del tempo - Modalità "scala intera"

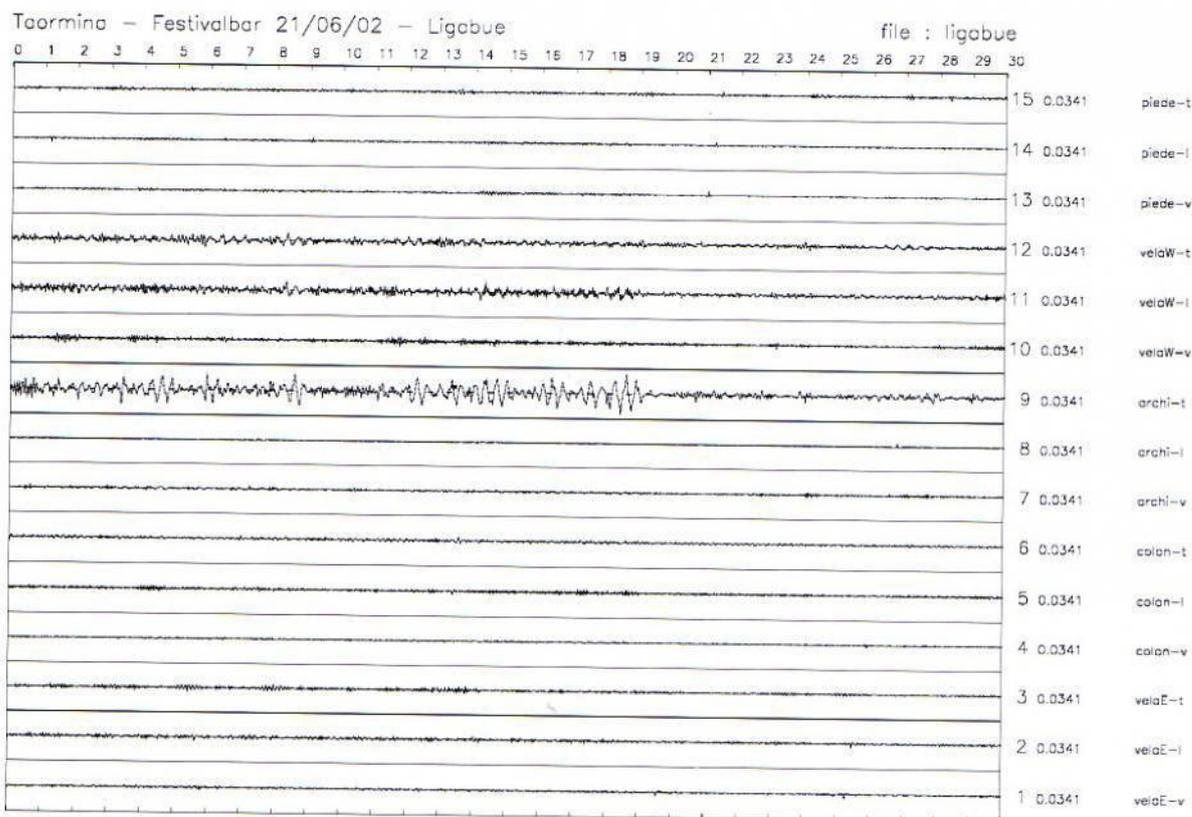


Fig.3 - Diagramma rappresentativo dell'andamento delle vibrazioni nel dominio del tempo  
Modalità "autoscale"

### Prima serata (21/06/2002) – storia vibrazionale

Il trattamento dei dati è stato eseguito, in primo luogo, mediante analisi statistica e restituzione grafica tramite istogrammi a classi di frequenza.

In tal modo, individuato il picco di vibrazione di ampiezza massima, registrato nel corso della manifestazione, pari a 0.054 cm/sec (esecuzione del brano di Celine in data 21/06/2002), è stato scelto un intervallo di dodici classi collocate tra 0.005 e 0.060 cm/sec, a passi di 0.005.

Successivamente, per ciascun canale, l'algoritmo di calcolo ha estratto da ciascun blocco di registrazione (pari a 10 secondi) il valore di picco massimo memorizzandolo in un database. Tale procedura è stata eseguita per tutte le canzoni in modo da poter ottenere un quadro esaustivo della fenomenologia.

L'analisi degli istogrammi ha evidenziato due raggruppamenti ben distinti: nel primo ricadono i canali 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 10, 13, 14, 15 per i quali le classi con maggior frequenza sono la 0.005, la 0.01 e, per i canali 3 e 10, anche la classe 0.015.

Per i canali 9 (*comp.orizz.trasv. – sommità architrave*), 11 (*comp.orizz.long. – muro a vela di nord-ovest*), 12 (*comp.orizz.trasv. – muro a vela di nord-ovest*), si è osservato, in primo luogo, come le classi a maggior frequenza siano la 0.015 e la 0.02.

Inoltre, per i canali 9 e 12, vi sono numerosi campioni presenti in classi superiori quali la 0.025 e la classe 0.03.

Infine, per il canale 9, oltre ad essere rappresentate le classi 0.035, 0.04 e 0.045, sono stati rilevati due campioni ricadenti nella classe 0.055.

Storia vibrazionale – prima serata (21/06/2002) – ch.1 – ch.2

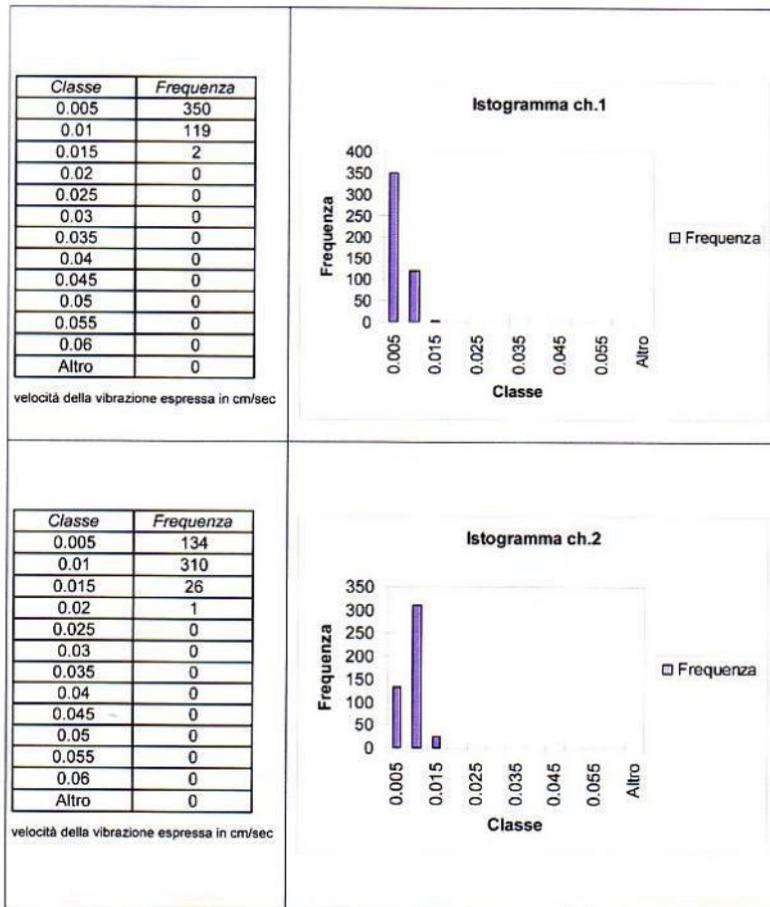


Fig. 4

Storia vibrazionale – prima serata (21/06/2002) – ch.3 – ch.4

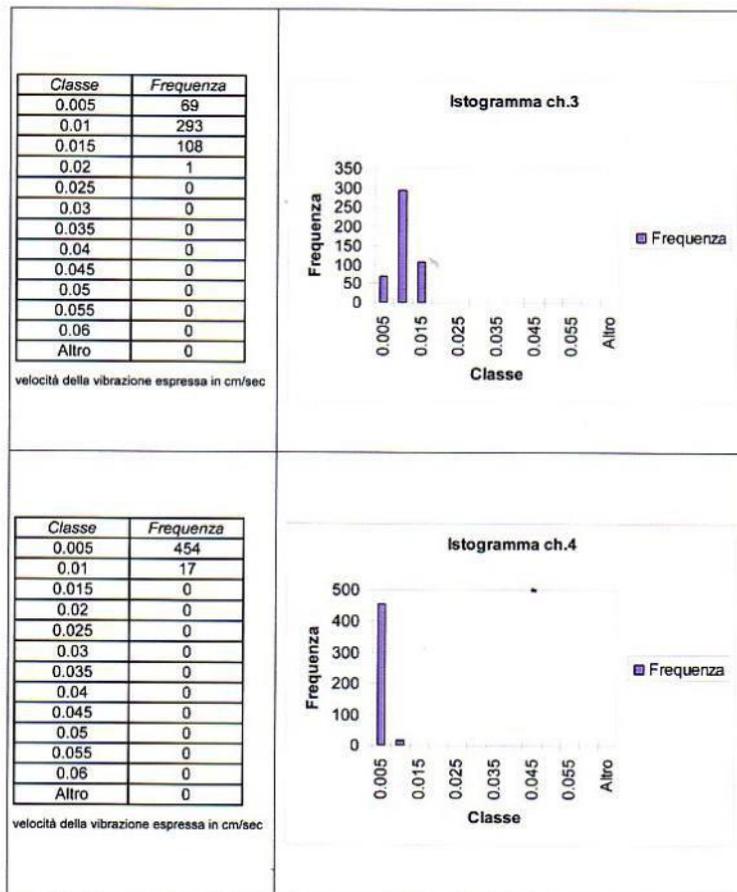


Fig. 5

Storia vibrazionale – prima serata (21/06/2002) – ch.5 – ch.6

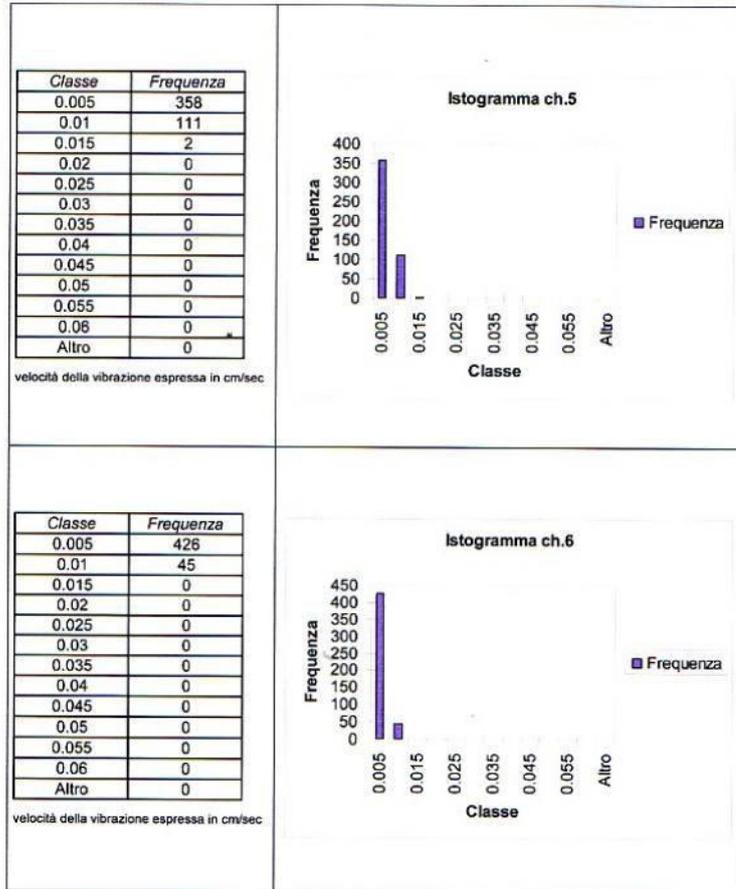


Fig. 6

Storia vibrazionale – prima serata (21/06/2002) – ch.7 – ch.8

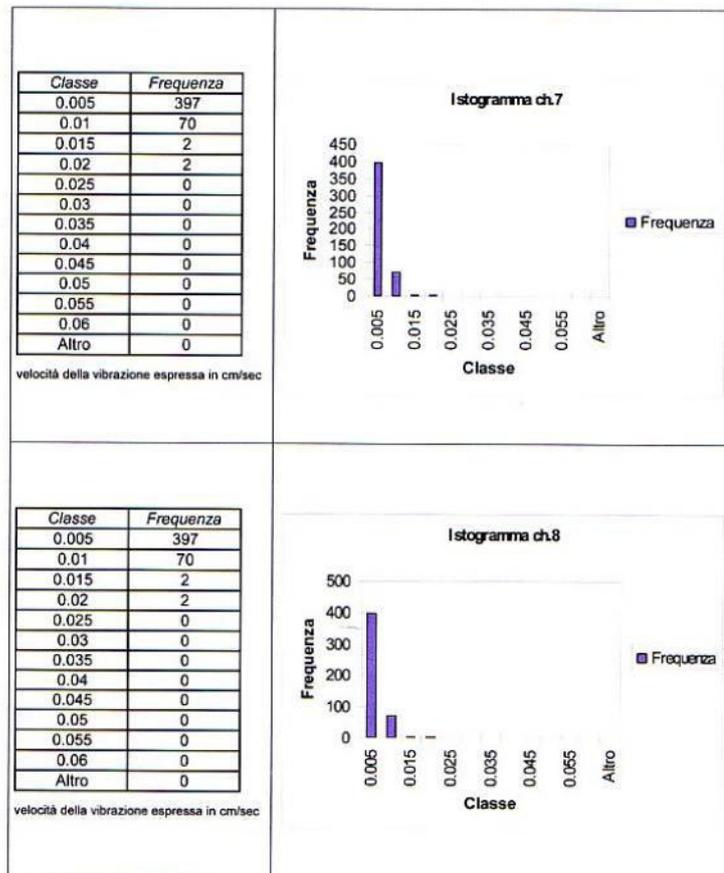


Fig. 7

Storia vibrazionale – prima serata (21/06/2002) – ch.9 – ch.10

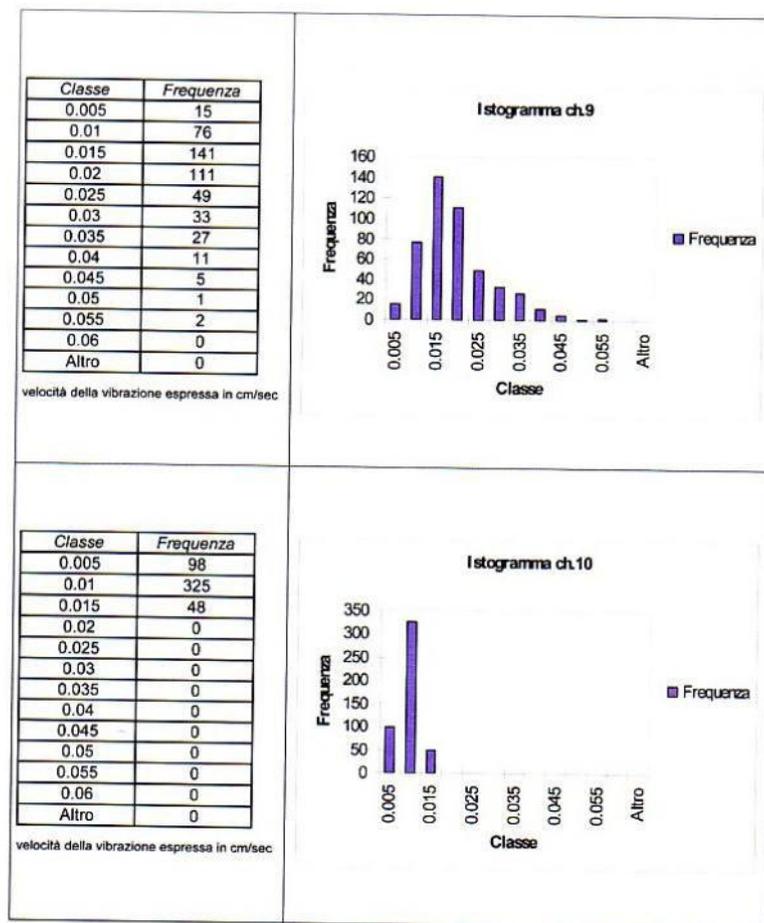


Fig. 8

Storia vibrazionale – prima serata (21/06/2002) – ch.11 – ch.12

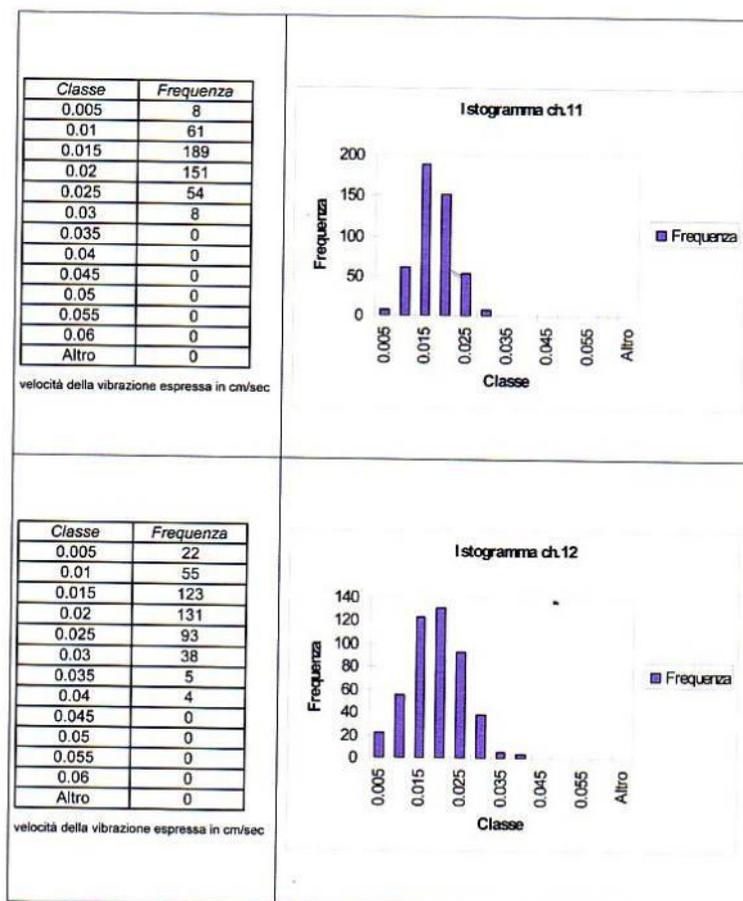


Fig. 9

## Storia vibrazionale – prima serata (21/06/2002) – ch.13 – ch.14

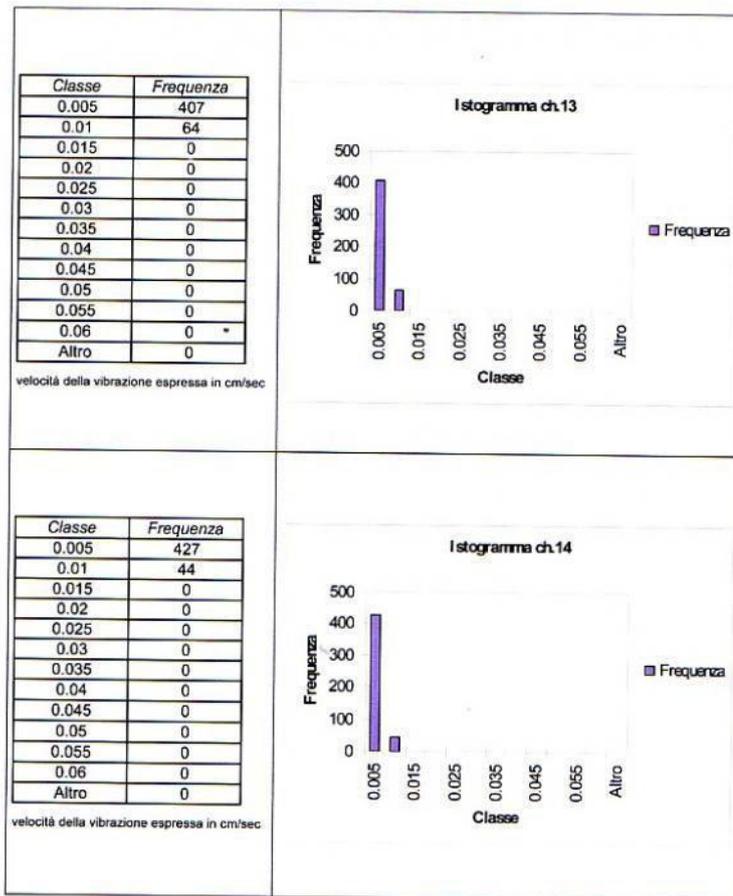


Fig. 10

## Storia vibrazionale – prima serata (21/06/2002) – ch.15

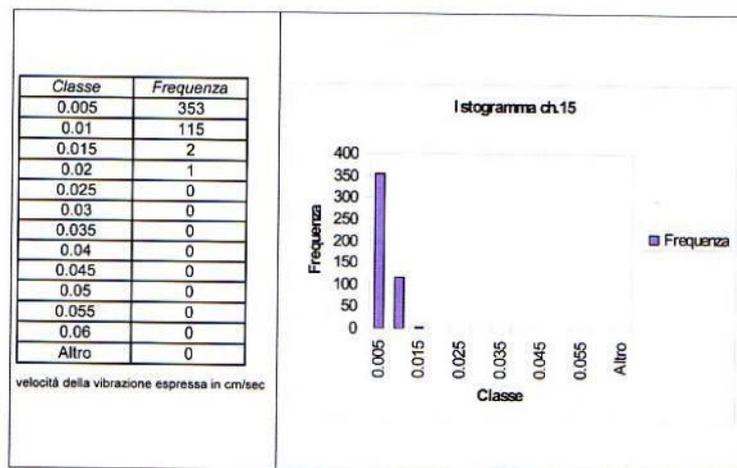


Fig. 11

## Seconda serata (22/06/2002) – storia vibrazionale

Sulla scorta delle elaborazioni eseguite per i dati rilevati in data 21/06/2002, si è proceduto all'analisi del dataset di dati acquisiti nel corso della seconda serata del *Festivalbar*.

Anche in questo frangente, l'analisi degli istogrammi evidenzia come in corrispondenza dei canali 9 (*comp.*

*orizz.transv. – sommità architrave*), 11 (*comp. orizz. lon. – muro a vela di nord-ovest*), 12 (*comp. orizz. trasv. – muro a vela di nord-ovest*), siano state osservate le classi a maggior frequenza.

Inoltre, dal confronto dei dati misurati nel corso della prima serata, l'analisi statistica ha evidenziato presso il canale 3, due ulteriori classi di frequenza poste a 0.025 e 0.03.

Storia vibrazionale – seconda serata (22/06/2002) – ch.1 – ch.2

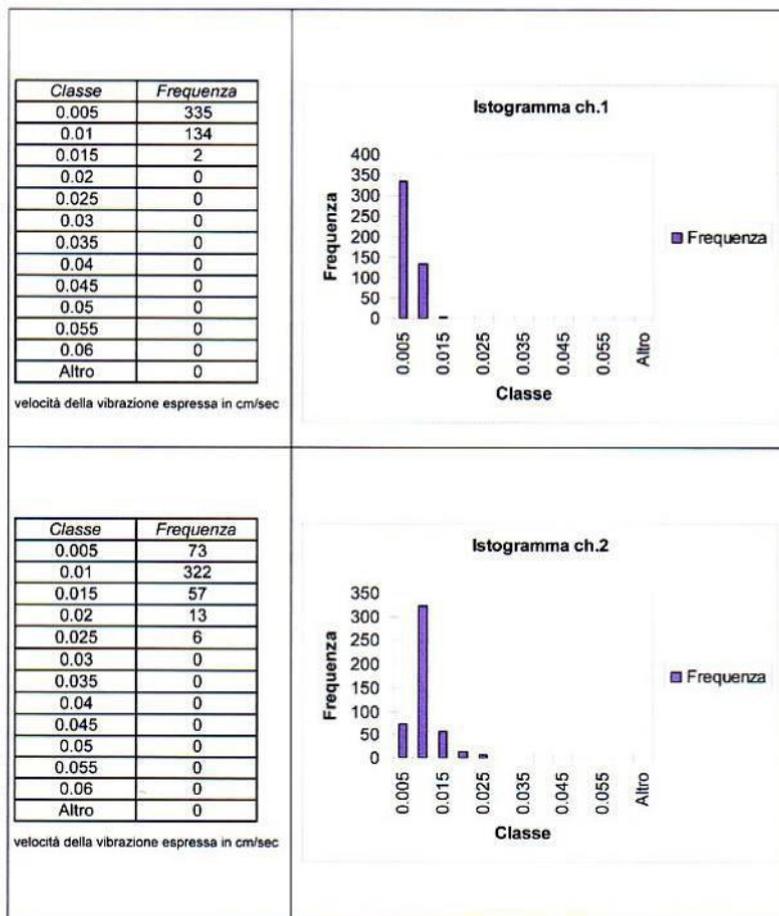


Fig. 12

Storia vibrazionale – seconda serata (22/06/2002) – ch.3 – ch.4

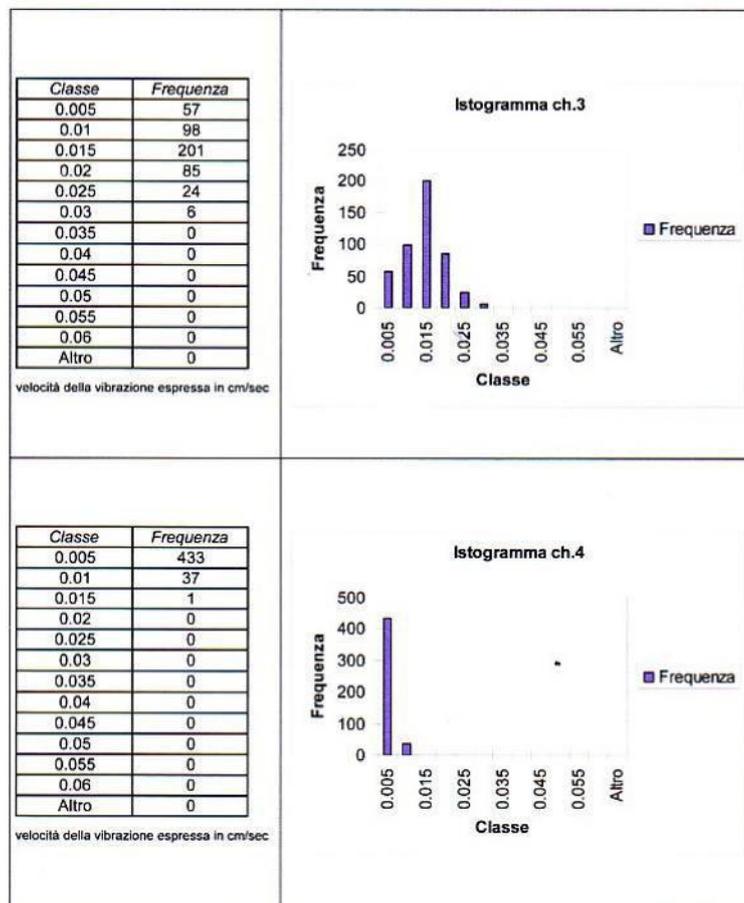


Fig. 13

Storia vibrazionale – seconda serata (22/06/2002) – ch.5 – ch.6

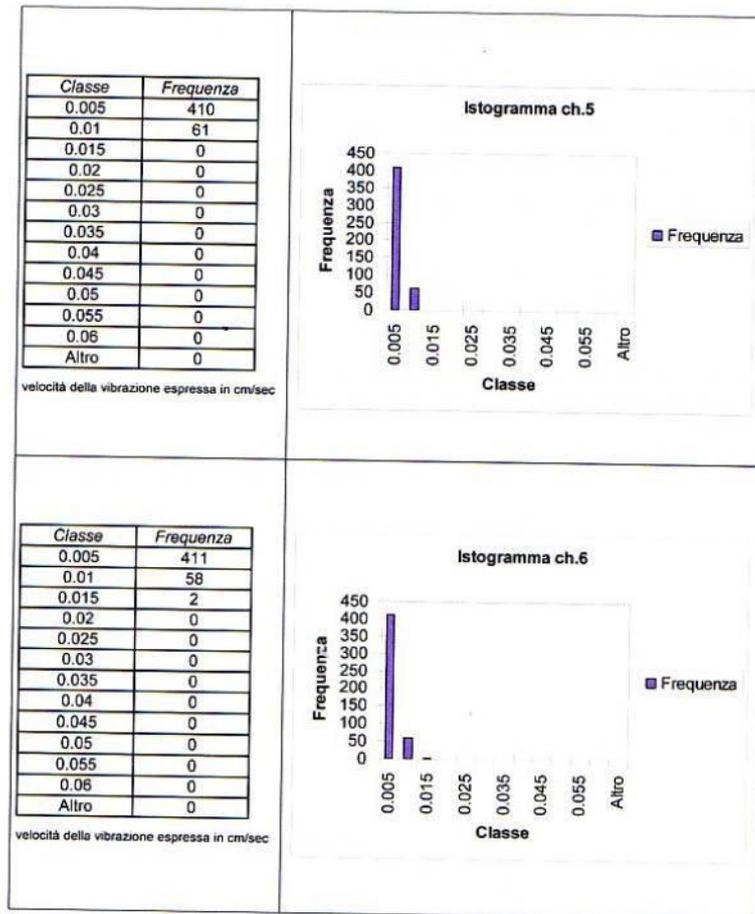


Fig. 14

Storia vibrazionale – seconda serata (22/06/2002) – ch.7 – ch.8

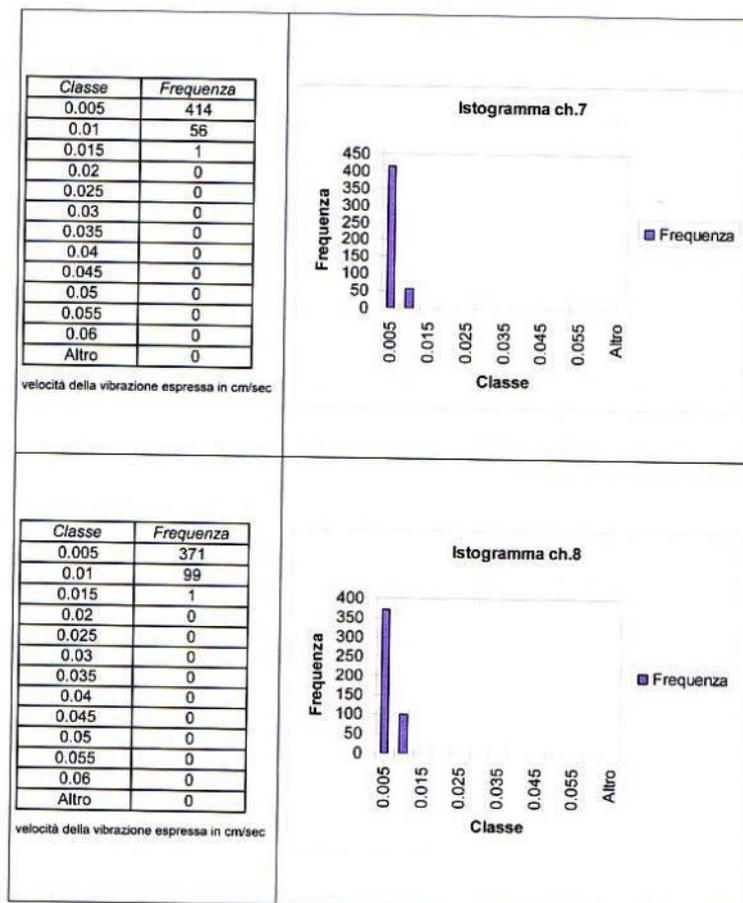


Fig. 15

Storia vibrazionale – seconda serata (22/06/2002) – ch.9 – ch.10

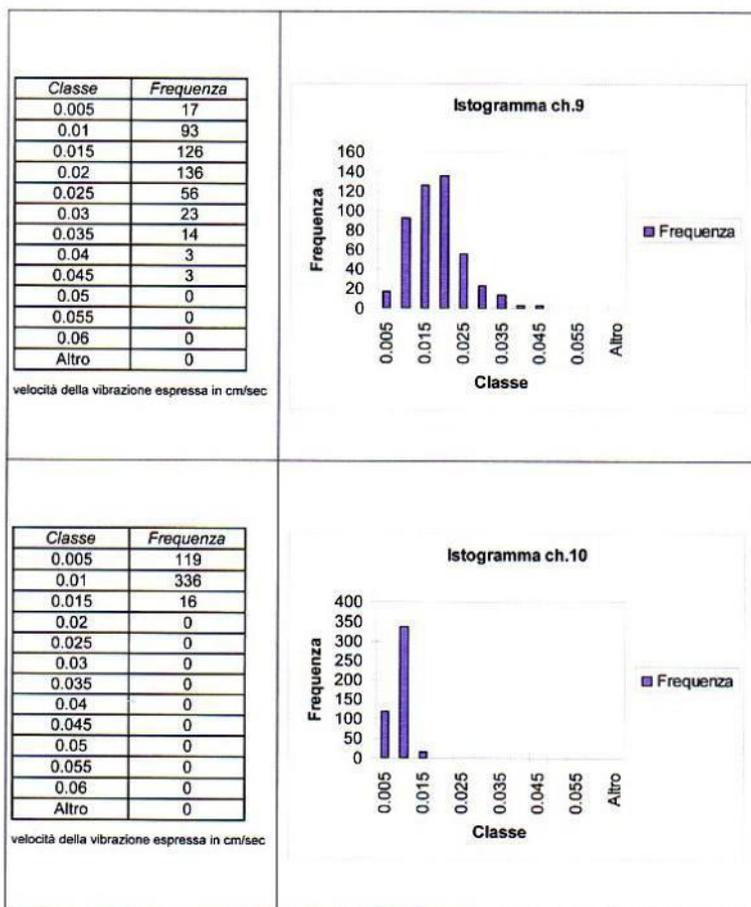


Fig. 16

Storia vibrazionale – seconda serata (22/06/2002) – ch.11 – ch.12

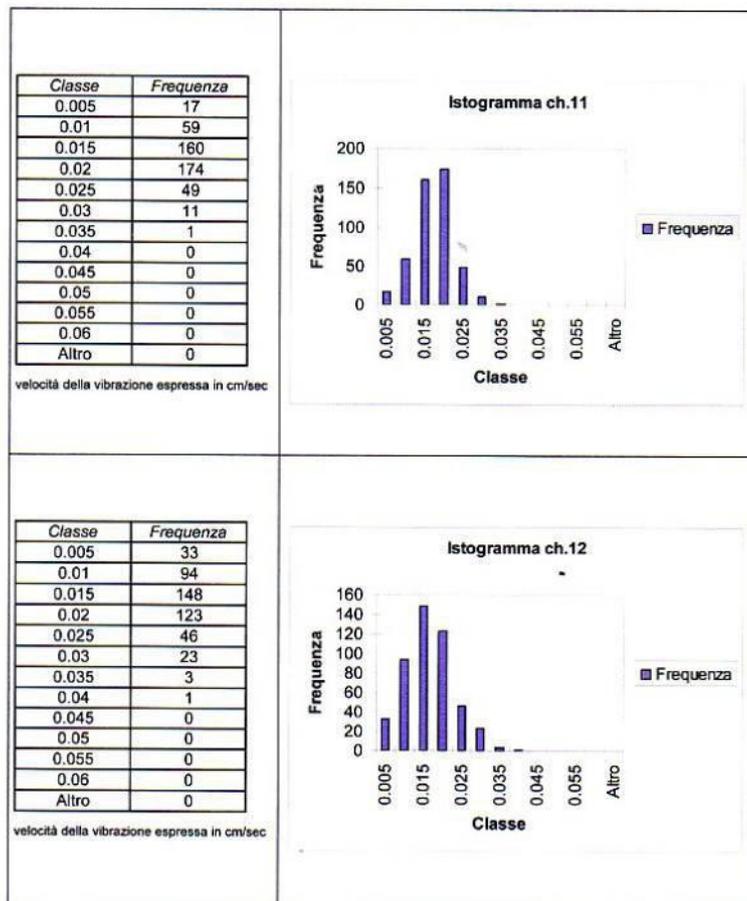


Fig. 17

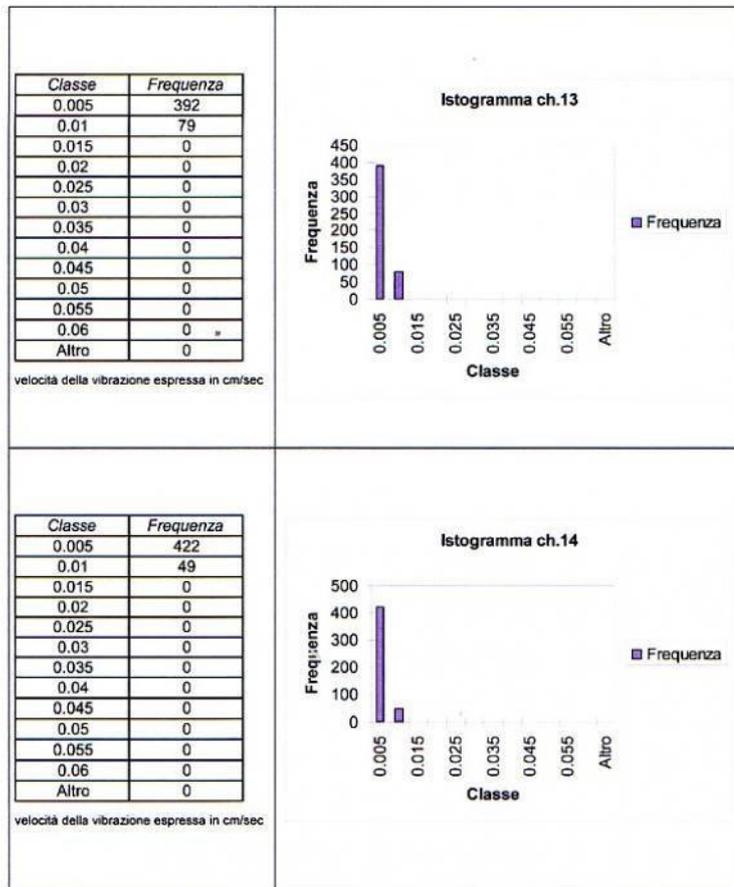


Fig. 18

Storia vibrazionale – seconda serata (22/06/2002) – ch.15

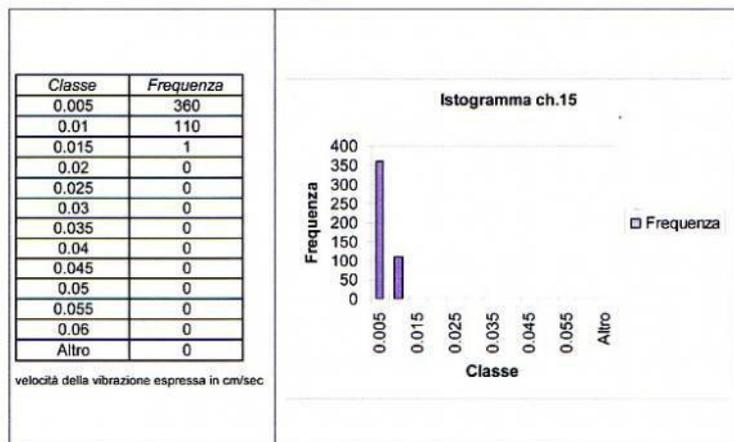


Fig. 19

Per fornire un quadro di sintesi delle elaborazioni eseguite, sono stati approntati due istogrammi con la distribuzione di valori di ampiezza della vibrazione sia in scala lineare (Fig.20) sia in scala logaritmica (Fig.21).

Dall'analisi di tali diagrammi, è stato possibile estra-

polare quanto segue:

- le vibrazioni apportano sollecitazioni alle strutture comprese tra le classi 0.005 e 0.015 cm/sec per l'88,7% dei casi;
- nel rimanente 11.3%, le sollecitazioni sono comprese tra le classi 0.02 e 0.055.

Teatro greco di Taormina - Festivalbar  
Distribuzione dei valori dell'ampiezza della vibrazione  
diagramma in scala lineare

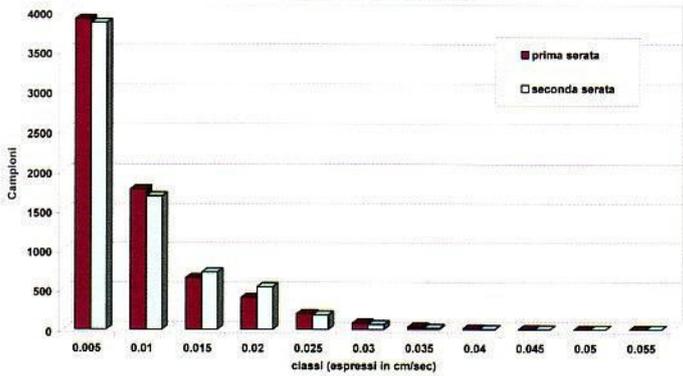


Fig.20

Teatro greco di Taormina - Festivalbar  
Distribuzione dei valori dell'ampiezza della vibrazione  
diagramma in scala logaritmica

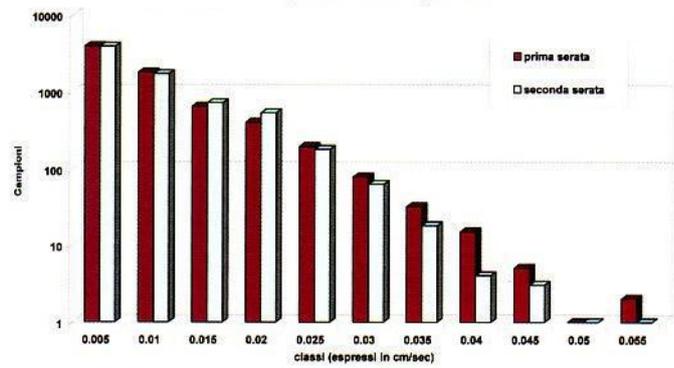


Fig. 21

## Analisi dei vibrogrammi

Come riportato nei precedenti paragrafi, il monitoraggio vibrometrico ha consentito di misurare le vibrazioni indotte alle strutture del Teatro Antico per l'intera manifestazione canora.

L'analisi dei diagrammi della velocità della vibrazione (riportati integralmente negli *Allegati A e B*), ha evidenziato come le maggiori sollecitazioni alle strutture siano state indotte dal ritmo della base musicale, in particolar modo dall'emissione di suoni a bassa frequenza, come evidenziato dall'analisi nel dominio delle frequenze.

In questo frangente, sono generate onde di pressione la cui porzione ad alta frequenza ricade nello spettro sonoro mentre la porzione a bassa frequenza non è udibile (ovvero è inferiore a 20 Hz) ma sollecita maggiormente le strutture.

È interessante osservare che le onde che si propagano in aria possono trasmettere sforzi di taglio, per cui

la propagazione di un'onda d'aria in una struttura è accompagnata da una componente trasversale che apporta cicli di sollecitazioni secondo questa direzione. Tale circostanza è ben evidenziata dalla lettura dei diagrammi riportati in allegato e negli istogrammi relativi ai ch.3, 9 e 12.

Inoltre, nel corso delle rilevazioni, è stato riscontrato che le strutture, in particolare i *muri a vela* (sito A e D) così come l'*architrave posto sulla terza e quarta colonna* (sito C), sono sollecitate anche in direzione longitudinale circostanza che può apportare ulteriori sollecitazioni alle strutture.

Inoltre, l'analisi in frequenza del segnale ha permesso di evidenziare, alcune frequenze significative, come rappresentato nei diagrammi di cui in figg.23[30].

In particolare, in corrispondenza degli spettri eseguiti per i canali 9 e 12, è stata osservata una gamma di frequenze comprese tra 3.5 e 14 Hz mentre gli spettri eseguiti per il canale 3, hanno evidenziato un picco ben definito posto ad una frequenza più alta, pari a 17.5 Hz.

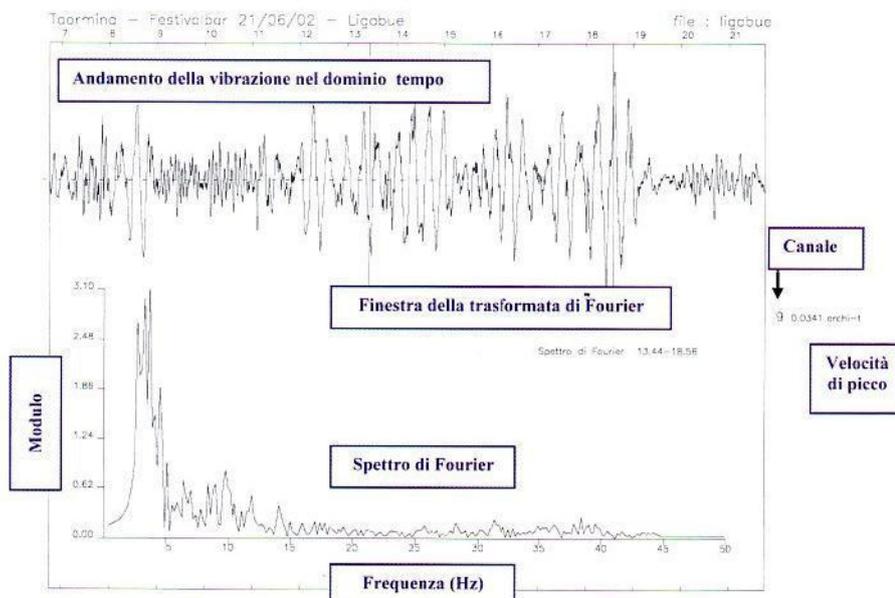


Fig. 22 - Chiave di lettura dello Spettro di Fourier

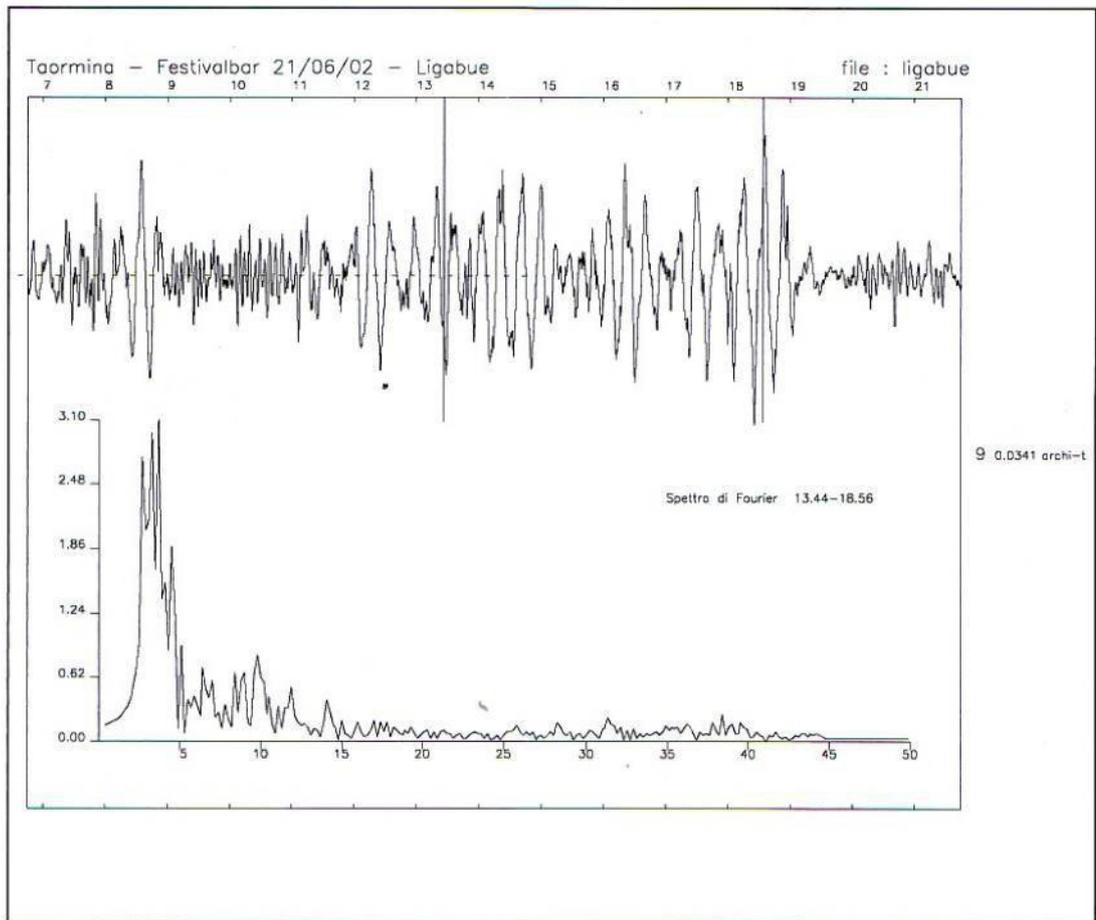


Fig. 23

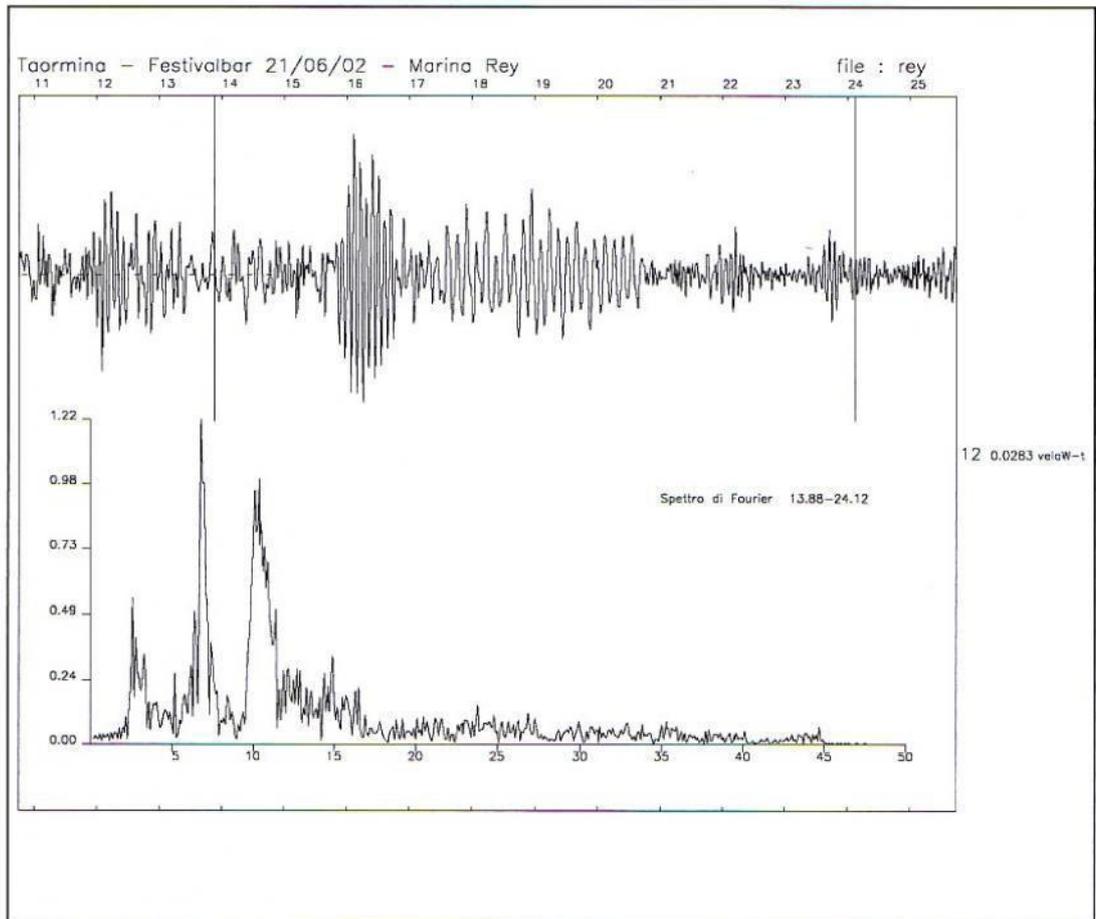


Fig. 24

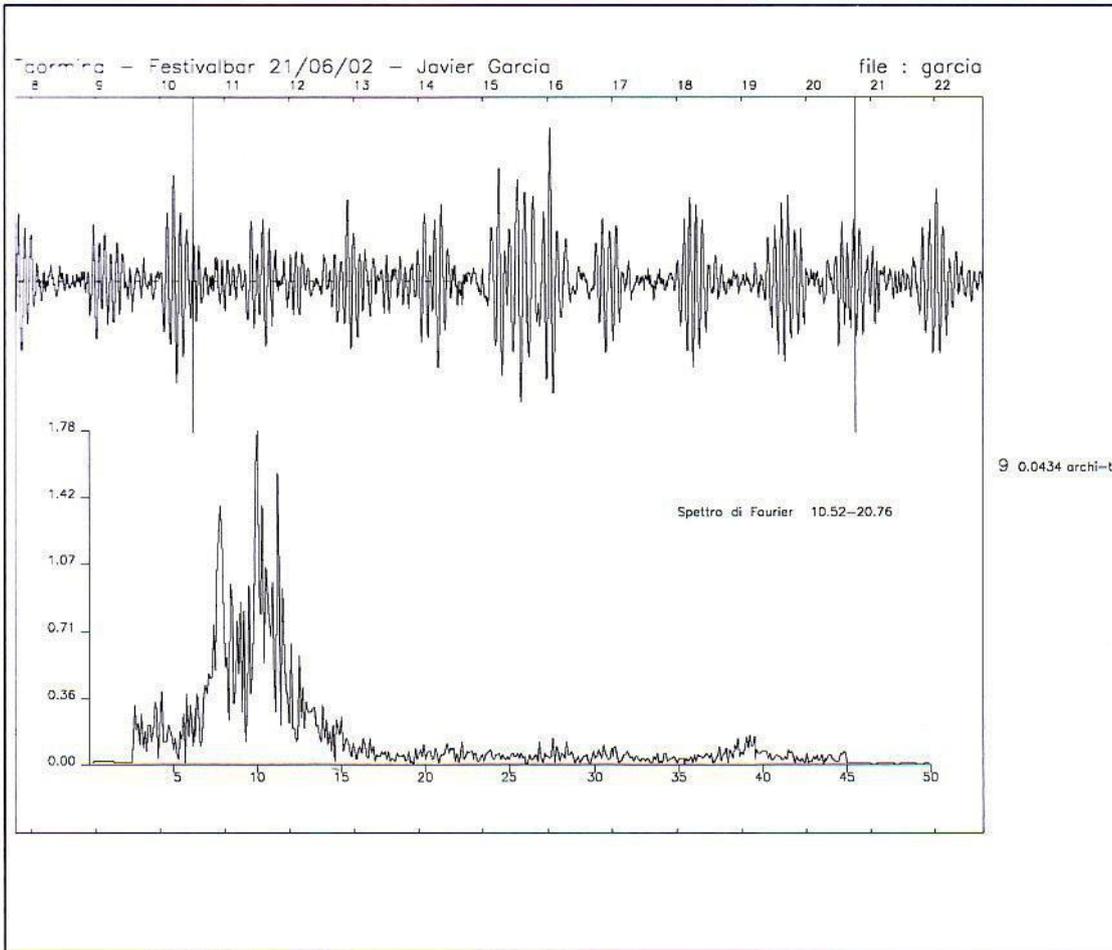


Fig. 25

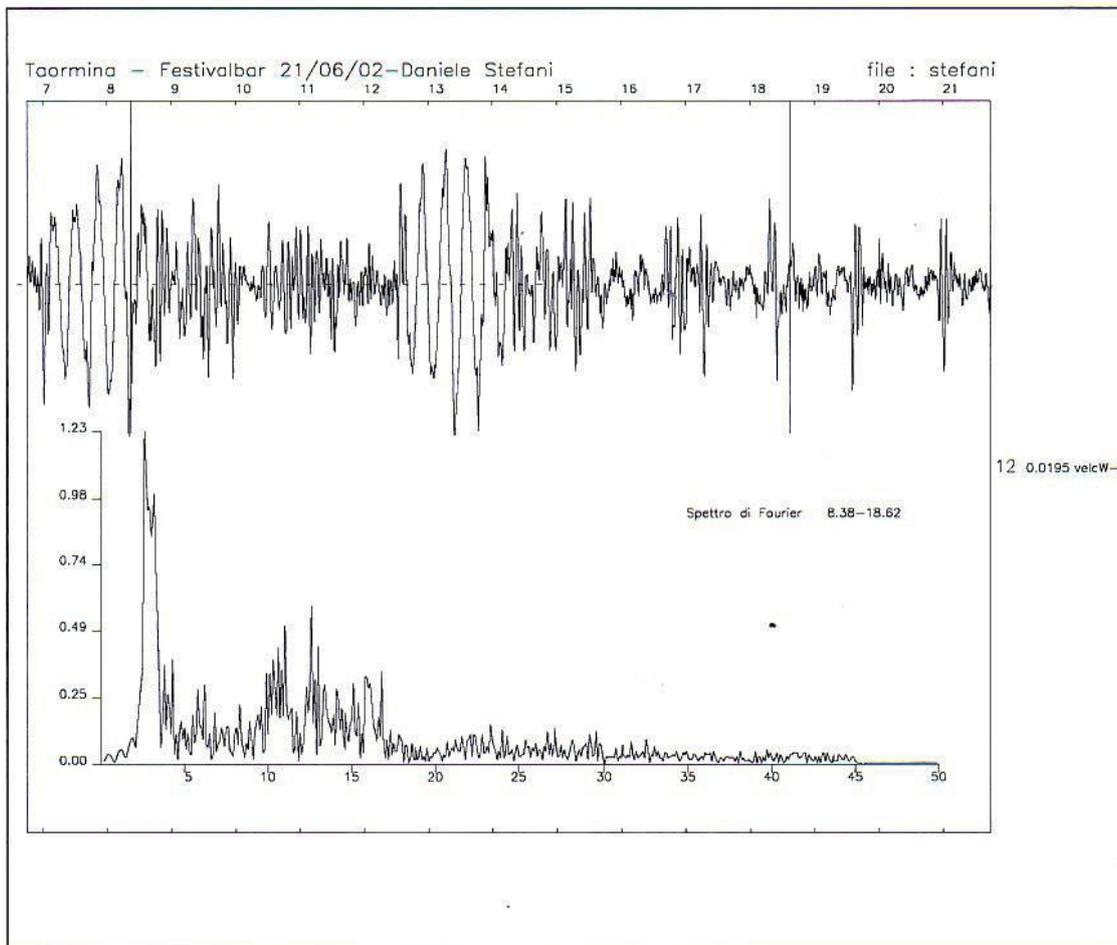


Fig. 26

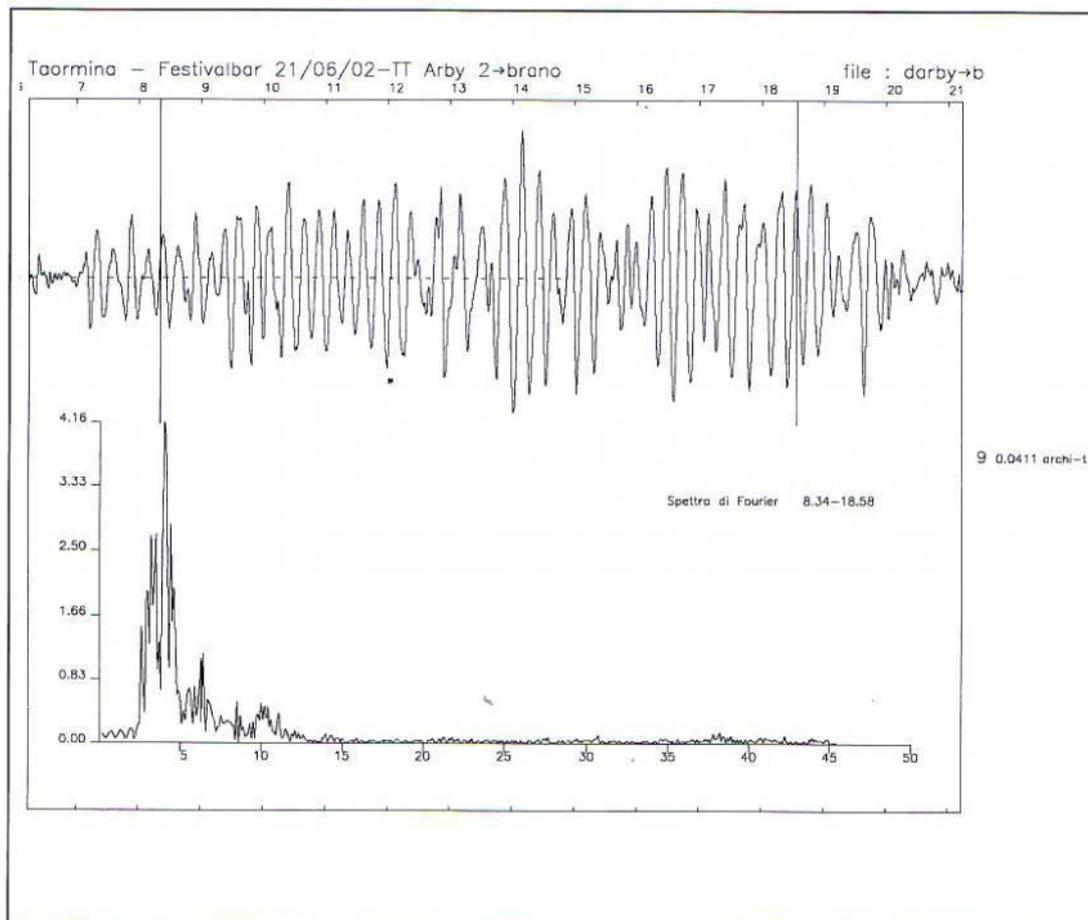


Fig. 27

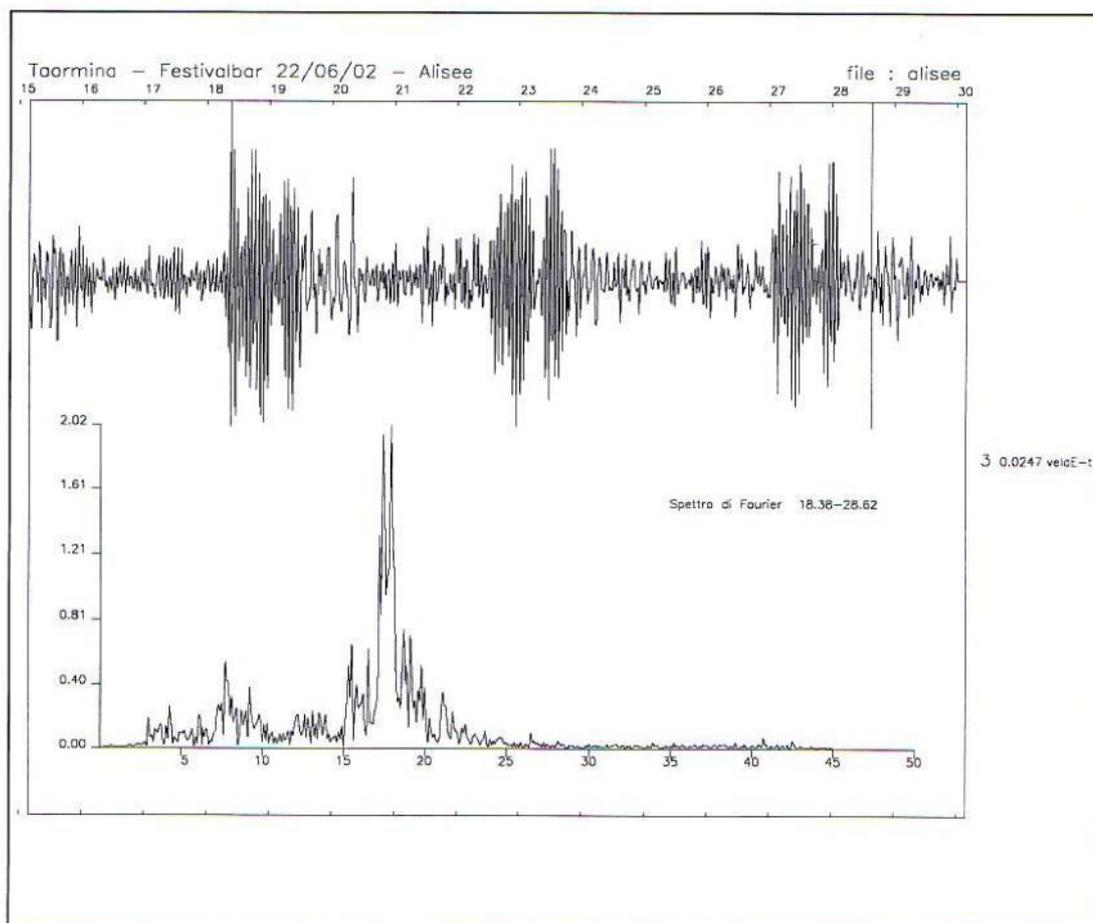


Fig. 28

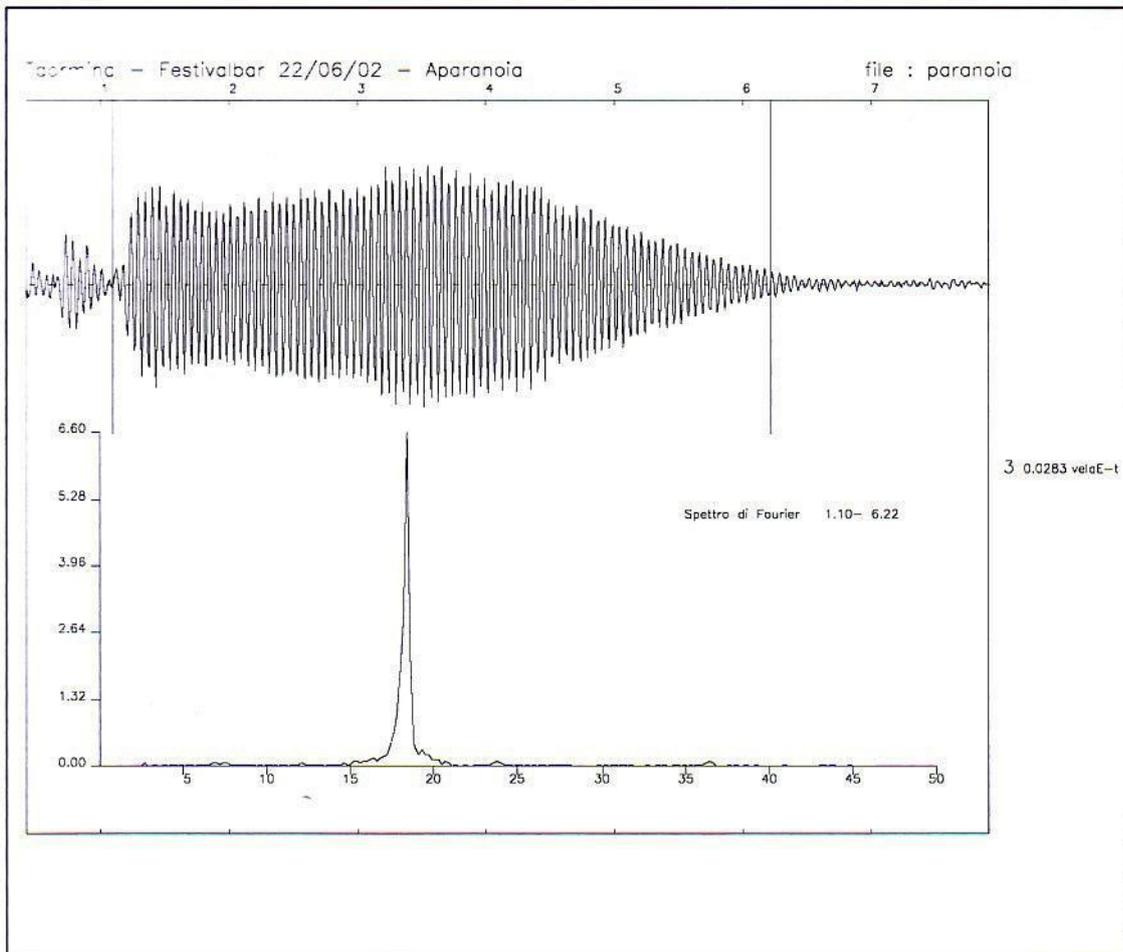


Fig. 29

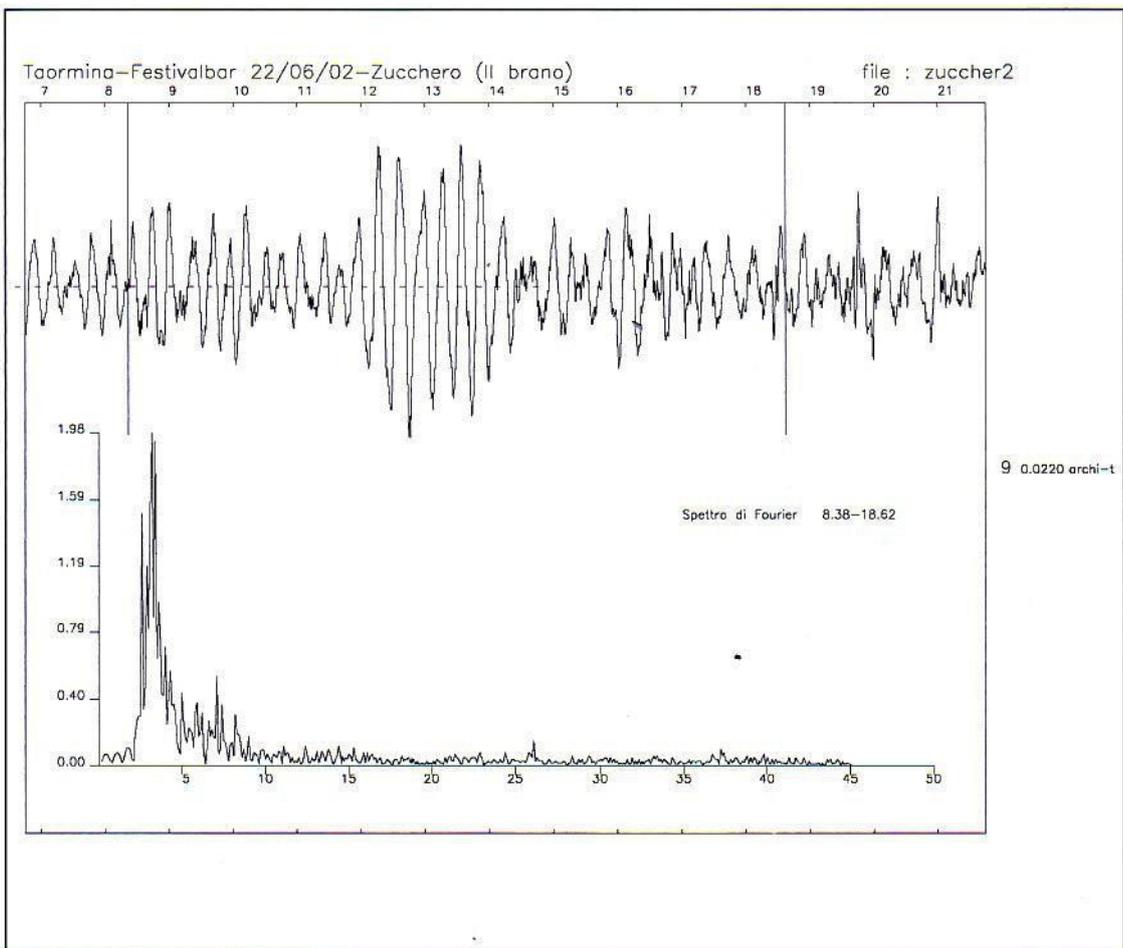


Fig. 30

## INQUADRAMENTO NORMATIVO

In questo paragrafo si riferisce in merito alle normative vigenti che possono essere applicate anche alle strutture monumentali come quella oggetto di indagine.

Generalmente un monitoraggio vibrometrico è finalizzato alla misurazione di grandezze quali la velocità della vibrazione ed il contenuto in frequenza che possono essere confrontati con i "valori ammissibili" riportati nelle normative internazionali, al fine di valutare gli

effetti delle vibrazioni sulla struttura investigata.

Va premesso che la quasi totalità delle normative internazionali, pur nelle loro differenziazioni, fanno riferimento, quale valore di soglia limite, al livello di tollerabilità degli edifici alle sollecitazioni impulsive, dove per "tollerabilità" è intesa quella soglia di estrema sicurezza oltre la quale possono verificarsi i cosiddetti "cosmetic cracks", ovvero lesioni agli intonaci o a parti non strutturali. Ne consegue come, dal punto di vista della sicurezza statica, i valori indicati da tutte le norme esistenti siano ampiamente a favore della sicurezza.

PAESE	NORMA	PARAMETRI							
		FREQUENZA	VELOCITA' TOTALE	VELOCITA' COMPONENTI	DISTANZA	TERRENO	TIPO DI EDIFICIO	TIPO DI VIBRAZIONE	TIPO DI ATTIVITA'
Germania	DIN4150	SI	NO	SI	NO	NO	SI	I, PI	NO
Svizzera	SN640312/92	SI	SI	NO	NO	NO	SI	I, C	NO
Francia	AFTES 1974	SI	NO	SI	NO	SI	SI	I, PI	NO
	MIN. AMB.	SI	NO	SI	NO	NO	SI	I, PI, C	SI
	GFEE	SI	NO	SI	NO	NO	SI	I	SI
Portogallo	NP 2074	SI	SI	SI	NO	SI	SI	I, PI	SI
Spagna	UNE 22-381	SI	NO	SI	NO	NO	SI	I, PI	NO
Svezia	SS4604566	SI	NO	SI	SI	SI	SI	I, PI, C	SI
Finlandia	MIN. SAN.	SI	NO	SI	SI	SI	SI	I, PI	NO
Stati Uniti	USBM-RI8507	SI	NO	SI	NO	NO	SI	I, PI	NO
	OSMRE	SI	NO	SI	NO	NO	SI	I, PI	SI

NOTA: I impulsiva  
PI periodica impulsiva  
C continua

Tab. 4

Come si può osservare dalla tabella precedente (Tab.4), si nota che le stesse normative internazionali non concordano sui parametri da prendere in considerazione (velocità della vibrazione, distanza, terreno, tipo di attività) pur distinguendo dei livelli di tollerabilità differenti in funzione della tipologia costruttiva degli edifici e della frequenza.

L'Italia, sino a pochi anni orsono, non annoverava una normativa al proposito ma alla fine del 1991 è stata emanata la norma UNI 9916 che è in sostanziale accordo con quanto contenuto nella norma ISO 4866 (1990).

La norma UNI 9916 cita testualmente "...fornisce una guida per la scelta di appropriati metodi di misura, di trattamento dati e di valutazione dei fenomeni vibratorii allo scopo di permettere anche la valutazione degli effetti delle vibrazioni sugli edifici, con riferimento alla loro risposta strutturale ed integrità architettonica".

In sintesi la norma fornisce la metodologia d'indagine e non i valori limite. Essa infatti, stabilisce i criteri

che devono essere utilizzati per una corretta impostazione dell'indagine, in particolar modo definisce come la vibrazione vada misurata ed elaborata.

Quale riferimento ai "valori ammissibili", si fa sovente riferimento a due normative internazionali: la norma tedesca DIN4150, che si riferisce ad eventi intermittenti e transitori (limitandosi a ridurre i valori ammissibili a due/terzi nel caso si verificano più eventi), e la normativa svizzera Norm Sn 640 312a (aprile 1992) che appare più idonea alla valutazione dei valori delle vibrazioni continue e/o frequenti, in quanto, per tale normativa, il "valore ammissibile" del "vettore velocità" è anche funzione del ripetersi delle sollecitazioni.

La normativa DIN 4150 considera la tipologia dell'edificio in esame, il campo di frequenza e la misurazione del "massimo valore di velocità" presso le tre componenti X, Y, Z, riportando i valori di velocità ammissibile in funzione della tipologia edilizia e dello stato di conservazione dello stabile (Tab.5).

## DIN Specification 4150

### Velocità ammissibili per la valutazione degli effetti delle vibrazioni sugli edifici

		Velocità di vibrazione in mm/s			
		<i>Misura alla fondazione</i>		<i>Misura all'ultimo piano</i>	
		<i>Campi di frequenza (Hz)</i>			
Categoria	Tipo di edificio	< 10 Hz	10 - 50 Hz	50 - 100	Frequenze diverse
1	Edifici utilizzati per scopi commerciali, edifici industriali e simili	20	20 - 40	40 - 50	40
2	Edifici residenziali e simili	5	5 - 15	15 - 20	15
3	Strutture particolarmente sensibili alle vibrazioni, non rientranti nelle categorie precedenti e di grandi valore intrinseco	3	3 - 8	8 - 10	8

Tab. 5

La normativa svizzera Norm Sn 640 312a (aprile 1992) determina i valori di soglia del “vettore velocità” in funzione del tipo di struttura, delle frequenze dominanti e del numero di sollecitazioni, dove per numero di sollecitazioni s’intende il numero totale di eventi perturbatori che investono la struttura. Il numero delle sollecitazioni è dato dalla relazione:

$$n. \text{ (sollecitazioni)} = n. \text{ (sollecitazioni/sec)} * 3600 * n. \text{ (durata in ore delle sollecitazioni)}$$

La citata normativa considera, quale parametro

significativo, il “vettore di velocità ammissibile”  $V_{rmax}$ , calcolato mediante la nota relazione

$$V_{rmax} = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}$$

dove  $V_x$ ,  $V_y$ ,  $V_z$ , sono i valori della velocità della vibrazione per le componenti del moto X, Y, Z (Tab.6).

Di seguito si riporta una tabella, estratta dalla normativa svizzera Norm Sn 640 312a, in cui sono riepilogati i valori ammissibili della velocità della vibrazione.

NORMATIVA SVIZZERA Sn 640 312a - aprile 1992				
Velocità ammissibili per la valutazione degli effetti delle vibrazioni sugli edifici				
Tipo di edificio	Ripetitività delle vibrazioni (numero di sollecitazioni che investono la struttura nel corso di una giornata)	Valore ammissibile del vettore velocità in mm/sec in funzione della frequenza dell'onda		
		< 30 Hz	30-60 Hz	> 60 Hz
<b>Pochissimo sensibile</b>	Occasionali < 1.000	≤ 45	≤ 60	≤ 90
	Frequenti < 100.000	≤ 18	≤ 24	≤ 36
	Permanenti > 100.000	≤ 9	≤ 12	≤ 18
<b>Poco sensibile</b> <i>Strutture industriali, in cls. armato o in acciaio, senza intonaco - silos, torri in muratura massiccia in ferro.</i>	Occasionali < 1.000	≤ 30	≤ 40	≤ 60
	Frequenti < 100.000	≤ 12	≤ 16	≤ 24
	Permanenti > 100.000	≤ 6	≤ 8	≤ 12
<b>Normale</b> <i>Abitazioni con strutture in cls, cls armato, o in pietra, chiese in muratura con intonaco.</i>	Occasionali < 1.000	15	20	30
	Frequenti < 100.000	6	8	12
	Permanenti > 100.000	3	4	6
<b>Molto sensibile</b> <i>Monumenti, edifici protetti.</i>	Occasionali < 1.000	7.5 - 15	10 - 20	15 - 30
	Frequenti < 100.000	3 - 6	4 - 8	6 - 12
	Permanenti > 100.000	1.5 - 3	2 - 4	3 - 6

Tab. 6

Se si considerano i dati acquisiti nel corso del monitoraggio, è stato misurato un valore di picco di ampiezza massima pari a 0.054 cm/sec mentre il valore del "vettore di velocità ammissibile"  $V_{\text{rmax}}$ , per la corrispondente terna, è risultato pari a 0.055 cm/sec.

In definitiva, se si considerano le normative citate in precedenza, i valori di vibrazione misurati, pur manifesti ed evidenti, come riportato nei diagrammi allegati, ricadono al di sotto dei valori di soglia fissati dalle normative di cui alle Tab. 5÷6.

## CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

La Tecno In S.r.l., ha eseguito un monitoraggio vibrometrico presso il Teatro Greco di Taormina, al fine di misurare l'ampiezza e frequenza delle vibrazioni indotte dai brani musicali eseguiti nel corso della manifestazione canora *Festivalbar*.

Le misurazioni in oggetto, hanno comportato rilevazioni in tempo reale per tutta la durata della manifestazione, in modo da poter ricostruire un vero e proprio quadro vibrazionale cui sono sottoposte le strutture antiche.

Le elaborazioni eseguite hanno evidenziato che un concerto di musica leggera può indurre, alle strutture del Teatro Antico, manifeste sollecitazioni pur ricadendo, quest'ultime, al di sotto dei valori di soglia riportati nelle normative UNI 9916, tedesca DIN 4150 e svizzera Norm Sn 640 312a.

Si deve però sottolineare che, nel caso del Teatro Antico, le strutture maggiormente sollecitate sono state il muro a vela di nord-ovest e l'architrave che congiunge la terza e quarta colonna.

Inoltre, l'analisi in frequenza eseguita per i treni d'onda di maggior interesse, ha evidenziato picchi ben definiti attribuibili al moto della struttura stessa attorno al periodo proprio di vibrazione. Tale circostanza, com'è noto, amplifica le sollecitazioni apportate e, nel caso di un eventuale aumento dell'ampiezza delle vibrazioni in successive manifestazioni, potrebbero essere indotte ulteriori tensioni alle strutture antiche.

Alla luce di tali valutazioni, la fenomenologia vibrazionale e le sollecitazioni apportate al Teatro Antico, potrebbero essere mitigate svolgendo manifestazioni a minor impatto e/o attenuando drasticamente il livello di emissione sonora, in particolar modo nella porzione dello spettro inferiore (le cosiddette basse frequenze)

nel caso che il Teatro sia utilizzato come ribalta di spettacoli pop/rock.

La documentazione aerea o satellitare fornisce un bagaglio importante di informazioni per comprendere la morfologia del territorio dove si collocano i teatri antichi. Occorre però scendere di scala, con il rilievo del teatro e del suo contesto ambientale, per costruire la prima tappa di osservazione e valutazione della realtà conservativa dell'edificio, interpretando le dinamiche caratterizzanti i terreni circostanti.

Ovviando all'incompletezza e mancato aggiornamento dei rilievi grafici disponibili, il gruppo di progettazione ha optato per una scansione laser tridimensionale che ha interessato l'edificio e la balza rocciosa sovrastante. Su queste basi il progetto del Teatro antico di Taormina intende infatti definire stratificazioni e cronologie costruttive, individuare matrici formali e culturali, graficizzare materiali costitutivi e tecniche esecutive utilizzati, ricostruire il sistema di regimazione delle acque meteoriche. Con l'obiettivo di calibrare il progetto di stabilizzazione dell'area e di individuare i criteri di mitigazione delle vulnerabilità intrinseche all'edificio.

L'applicazione della tecnologia della scansione tridimensionale con scanner laser garantisce un'ampia versatilità applicativa e consente un'estrema precisione, che scende a pochi millimetri, sia per brani murari molto distanti che estremamente ravvicinati.

La realizzazione del modello numerico tridimensionale del teatro, verificando le conformazioni definite nei rilievi tradizionali precedentemente elaborati, è stata frutto di un'attività di rilevazione prevalentemente concentrata sull'interno del teatro e la balza rocciosa sovrastante. Allineando i modelli degli scanworlds, ritenuti necessari per l'estrazione del modello volumetrico complessivo, si è definita la nuvola di punti con densità di maglia a grande dettaglio e si sono elaborati i conseguenti parametri esportandoli in uno specifico programma di modellazione solida. Con il modello numerico, così costruito con la scansione, è stato possibile descrivere la collocazione nelle tre coordinate spaziali di ogni punto in relazione al punto di origine fissato nel laser scanner 3D, così come costruire le sezioni orizzontali e trasversali ritenute significative.

All'attività di rilevazione si dovranno correlare la lettura dei documenti storici e il riscontro diretto sulle architetture, per ricostruire le tappe della costruzione e delle trasformazioni, in relazione al mutare dei tipi di rappresentazione.

# Caratterizzazione dei materiali costitutivi e valutazione del loro stato di degrado

COSIMO DI STEFANO

Nell'ambito dei progetti pilota, utili alla redazione della "CARTA DEL RISCHIO DEL PATRIMONIO CULTURALE E AMBIENTALE" siciliana, la città di Taormina è al centro dell'attività di ricerca multidisciplinare del Centro Regionale per la progettazione ed il restauro. Dopo l'esperienza, fatta dal laboratorio di chimica del Centro, presso la biblioteca comunale di Taormina, dove è stato effettuato il monitoraggio chimico del patrimonio librario prima e dopo un trattamento di deacidificazione di massa a libro integro e lo studio, in corso, preliminare al restauro di otto dipinti su tela custoditi nella chiesa di S. Giuseppe, si è avviato il progetto di caratterizzazione dei materiali costituenti il Teatro greco-romano finalizzato all'individuazione di modelli di interventi conservativi. A tale scopo il laboratorio di chimica del Centro sta conducendo indagini scientifiche programmate, coadiuvato da collaborazioni esterne, attraverso tecniche di indagini chimiche, chimico-fisiche e mineralogico-petrografiche, per caratterizzare i materiali costituenti il teatro e valutarne il loro stato di degrado. Tali indagini scientifiche saranno capaci di orientare i test esplorativi di restauro, che saranno curati dal laboratorio di restauro materiali inorganici del Centro. Al termine dei test esplorativi, che saranno condotti, su aree predefinite, il laboratorio di chimica completerà il proprio studio di ricerca valutando, attraverso indagini scientifiche, l'efficacia dell'intervento conservativo.

Per quanto di competenza il laboratorio di chimica del Centro ha già completato tutte le indagini scientifiche su diverse tipologie di materiali costituenti il teatro greco-romano di Taormina. Sono state eseguite indagini di intonaci, malte, laterizi e marmi utilizzando tecniche di caratterizzazioni di prodotti organici ed inorganici rilevabili per spettroscopia infrarossa a trasformata di Fùrier (FTIR), caratterizzazione elementare per fluorescenza a raggi X, tramite uno strumento portatile capace di eseguire indagini non distruttive, e caratterizzazione di sali solubili attraverso tecniche elettrochimiche e di cromatografia ionica.

I risultati scientifici, fin qui raccolti dal laboratorio di chimica del Centro, ci permettono solo di esprimere giudizi generali sulla natura dei materiali ed il loro stato di conservazione, ma per completare il quadro

generale sulla valutazione dei componenti costitutivi i materiali del teatro greco-romano è d'obbligo, per un giusto approccio metodologico, corredarli con i dati prodotti dalle indagini scientifiche che stanno conducendo i nostri consulenti esterni ed altri laboratori scientifici del Centro.

Pertanto, le valutazioni qui di seguito descritte hanno un carattere prevalente di primo approccio scientifico che presentano, però, dati analitici incontestabili, per il loro valore qualitativo.

Gli spettri prodotti dall'indagine di spettroscopia infrarossa a trasformata di Fùrier (FTIR), di intonaci, malte, laterizi e marmi indicano rilevanti quantità di carbonati e di silicati senza che siano presenti sostanze di natura organica in quantità significative.

Dalla caratterizzazione per fluorescenza RX portatile, su lacerti di intonaci presenti nel proscenio, è sensibile la presenza di ferro e di elementi chimici presumibilmente provenienti da eruzioni vulcaniche dell'Etna.

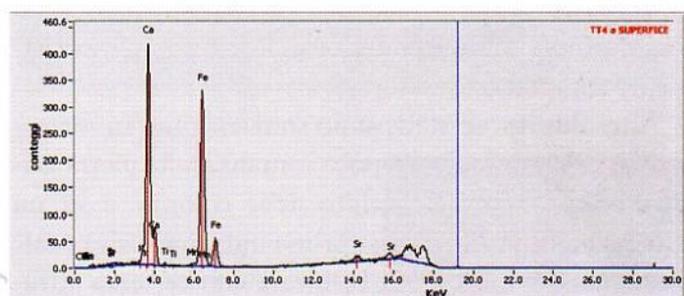


Fig. 1 – Dida

Con la stessa tecnica si è potuto dedurre che le malte si presentano particolarmente decorse con presenza di zolfo (S), derivante da una diffusa solfatazione riscontrata con tecnica di caratterizzazione per cromatografia ionica, dopo l'estrazione dei sali solubili condotta con metodo NORMAL 13/83.

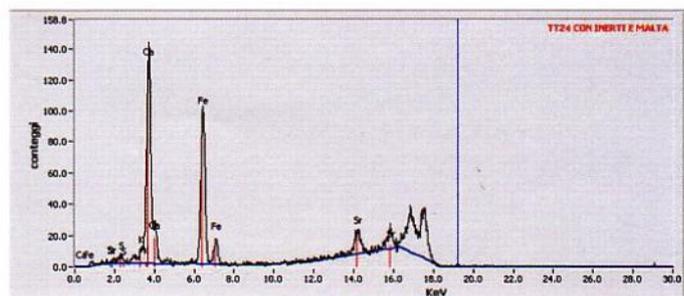


Fig. 2 – Dida

## CONCENTRAZIONI

ELEMENTO	%	AREA
Ca	16.572	4615
Fe	0.802	3423
Sr	0.009	775
S	5.019	96
K	1.197	180

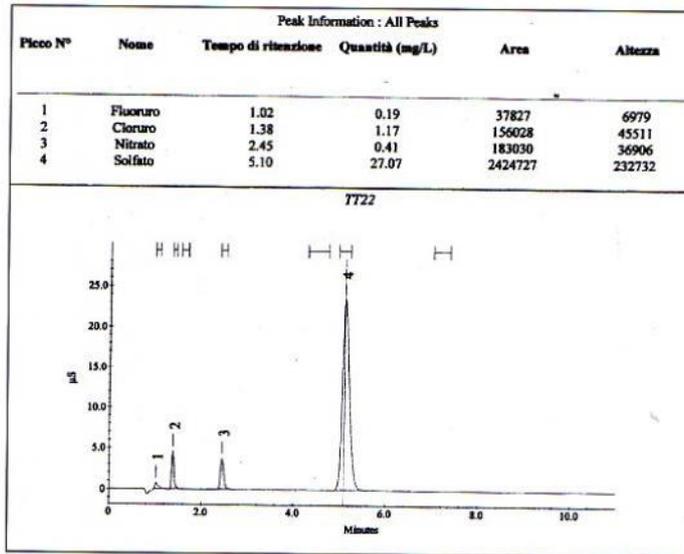
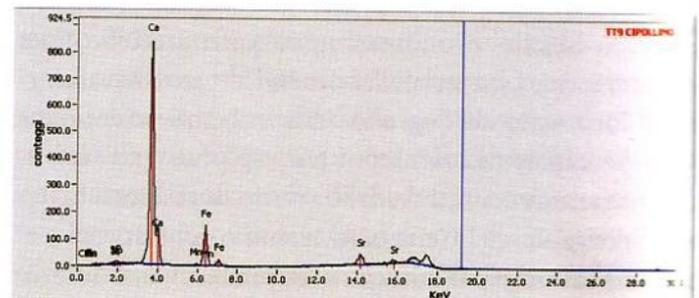
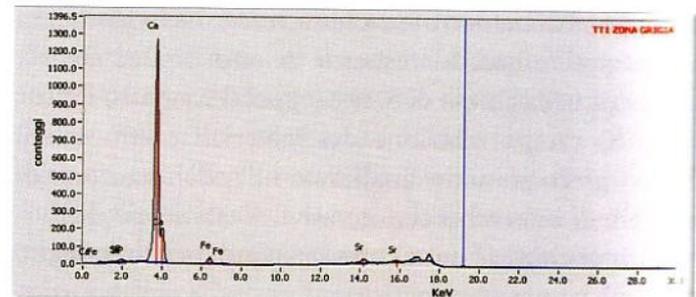
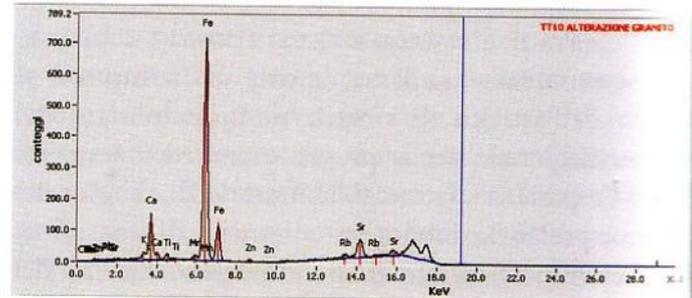
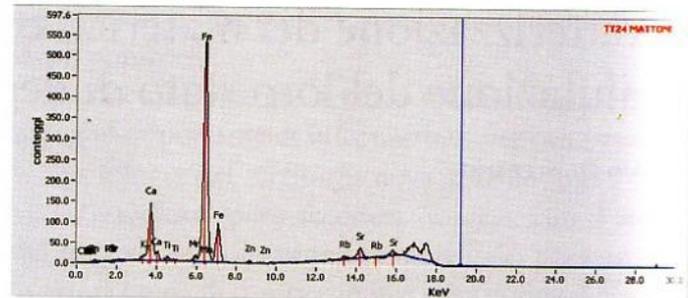


Fig. 3 – Dida

Particolarmente alterata risulta, per gli stessi fenomeni, la malta insistente sull'unica volta posta nella *Summa cavea*, il cui dissesto strutturale è stato segnalato, dal Centro Regionale per la progettazione ed il restauro, alla Soprintendenza di Messina, territorialmente competente.

Altre fluorescenza RX sono state eseguite su mattoni d'argilla originale di epoca romana, sulla pietra grigia di Taormina, sul granito delle colonne e su un marmo identificato, da una prima indagine visiva e tattile, come "cipollino" (da verificare con certezza attraverso una caratterizzazione per diffrazione XRD).

A meno di una comparazione con diffrazione XRD, dalla fluorescenza RX portatile si deduce che il mattone di epoca romana può appartenere alla famiglia



delle *Illiti* di formula generale  $K_2O \cdot 3Al_2O_3 \cdot 6SiO_2 \cdot H_2O$  la pietra grigia ed il marmo, al momento, definito cipollino sono di natura calcarea a carattere organogena per la presenza di fosforo (P), infine, il granito della quarta colonna è una calcite con presenza di minerali di ferro.

A cura di:  
Laboratorio di Chimica del Centro Regionale Progettazione e Restauro

Responsabile: Cosimo Di Stefano  
Collaboratori: Giacomo Cinà, Antonino Vitelli

# Caratterizzazione di materiali lapidei

ANTONIO BARTOLOTTA, STEFANO BELLIA, MARIELLA BRAI, CINZIA CASIERI, FRANCESCO DE LUCA, PAOLA FANTAZZINI, ANTONELLA MACCOTTA, FILIPPA MORREALE, TIZIANO SCHILLACI, GIUSEPPE RASO

## SITO GEOLOGICO E CAMPIONAMENTI

Le aree di campionamento e i materiali scelti per le analisi in laboratorio con diverse tecniche (XRD, NMR.), sono rappresentativi degli elementi presenti nel Teatro antico di Taormina. Il Teatro di impianto Greco, ottenuto adattando uno dei fianchi laterali del Monte Tauro, è stato realizzato interamente con i calcari massicci grigio-biancastri (“pietra di Taormina”). Nel periodo successivo a quello greco il teatro è stato riprogettato dai Romani. La struttura è stata realizzata interamente con la tecnica del muretto a sacco; ad un armatura esterna di mattoni in cotto si contrappone internamente un miscuglio di malta e pezzi di “pietra di Taormina” grossolanamente tagliati. Nella figura 1 viene riportata in dettaglio la carta geologico-morfologica dell’area di Taormina.



Fig. 1 – Dettaglio della carta geologico-morfologica dell’area di Taormina

Le zone del teatro da cui sono stati prelevati i campioni oggetto delle analisi, sono mostrate nelle figure 2 e 3.

I campioni sono stati individuati mediante sigle, come riportato in tabella 1:

Tabella 1

CAMPIONE	SIGLA
“Pietra di Taormina”	TAO 1
Mattone in cotto	MATTONI ROMANO
Frammenti di malta	MALTA



Fig. 2 - Rampa di accesso al portico voltato

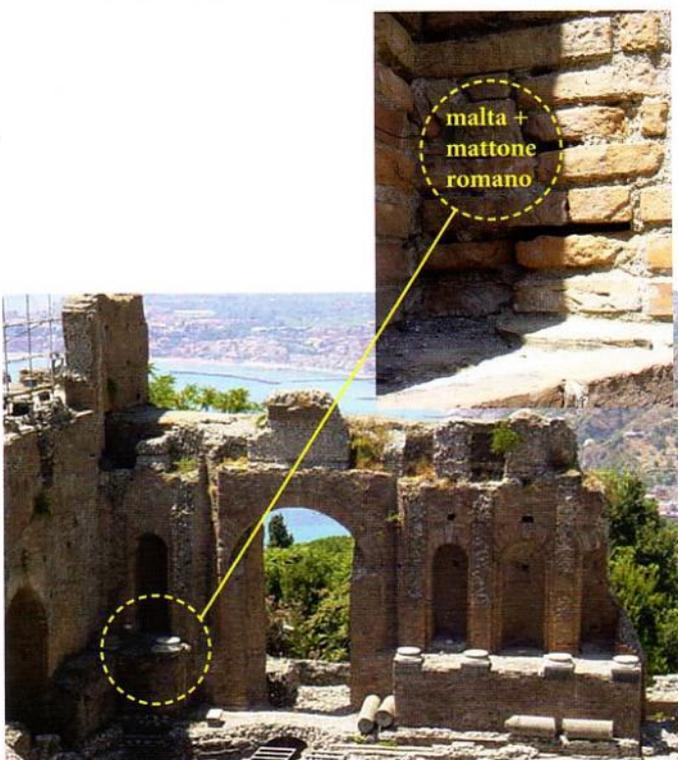


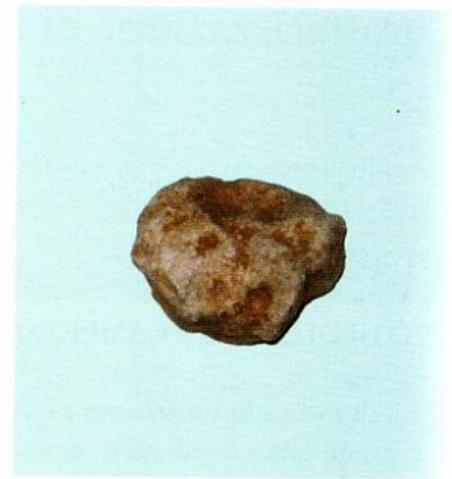
Fig. 3 – Scena (parte sinistra) con evidenziato un particolare



Malta



Mattone romano



TAO 1

## ANALISI XRD (X- RAY DIFFRATTOMETRY)

Per ottenere informazioni sulla natura petrografica e mineralogica, non basta conoscere la composizione elementare e chimica. L'analisi diffrattometrica di raggi X su polveri, permette di conoscere la struttura cristallografica e di ordine. Per tale motivo su pietre naturali, malte e cotti è indispensabile l'analisi XRD. In figura 4, è mostrato il diffrattogramma della pietra di TAO 1, l'elemento presente in alcune delle gradinate e in un paio di blocchi all'interno del proscenio di destra.

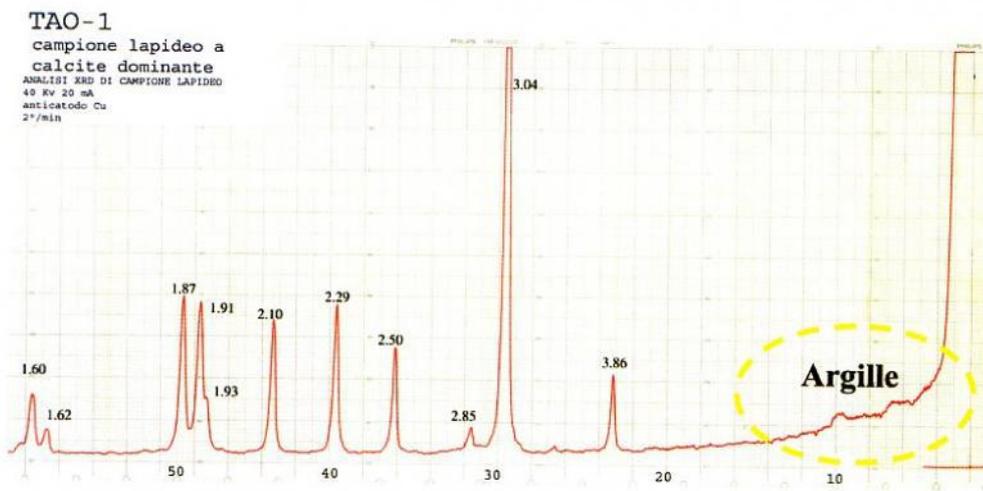


Fig. 4 – Diffrattogramma del campione TAO 1

Il diffrattogramma mostra chiaramente la presenza di soli picchi della calcite. Sulla parte all'estrema destra dello spettro, sono appena accennate le zone delle argille. Nella stessa zona, nei diffrattogrammi del MATTONE ROMANO sono evidenti i picchi delle argille, di cui una migliore caratterizzazione mineralogica è in corso con la tecnica della setacciatura ad umido e mediante monitoraggio a raggi X della frazione sedimentata.

## ANALISI NMR

Le prime analisi effettuate sui campioni TAO 1, MATTONE ROMANO e MALTA sono state effettuate utilizzando un "imager" per arti (ARTOSCAN) dell'Istituto di Radiologia del Policlinico Universitario e hanno messo in evidenza immagini non trasparenti che hanno permesso di ipotizzare una bassa porosità nel campione TAO1 e un'alta concentrazione di ferro nei campioni di MATTONE ROMANO e MALTA. L'analisi di fluorescenza conferma quest'alta concentrazione di ferro presente in

questi ultimi due campioni presenti nel teatro di Taormina. Si è ritenuto utile sottoporre gli stessi campioni ad analisi di rilassometria NMR, per una valutazione della porosimetria dei campioni e dell'eventuale loro permeabilità all'acqua. Le tecniche di Risonanza Magnetica per lo studio non distruttivo delle proprietà strutturali e di trasporto di materiali porosi si basano sulle proprietà magnetiche dei nuclei degli atomi di

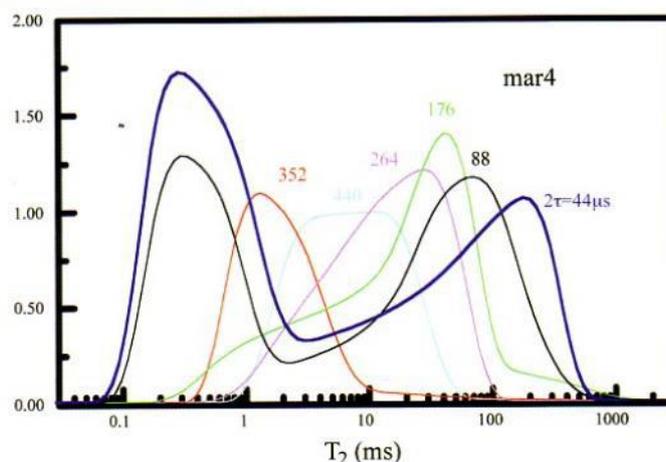
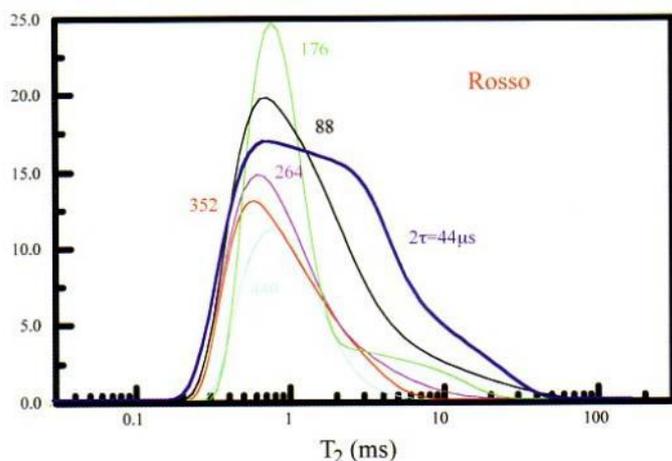
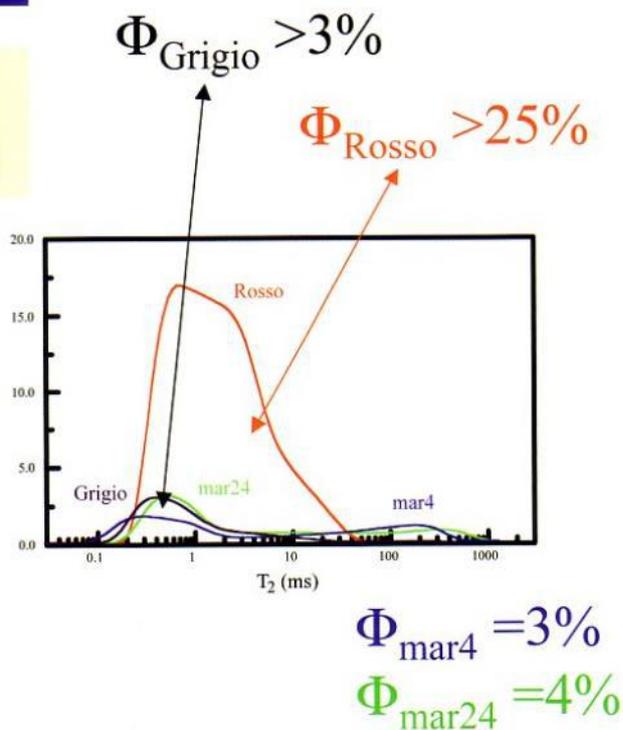
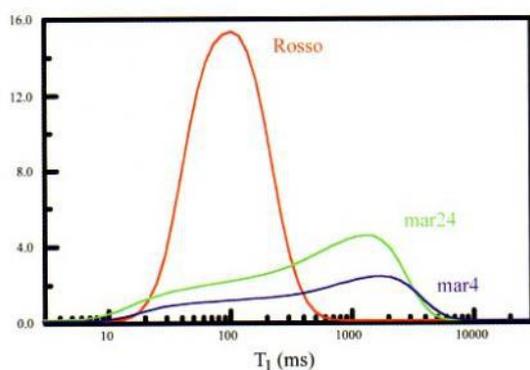
idrogeno legati all'acqua intrappolata nello spazio poroso. I mezzi porosi che possono essere studiati includono materiali naturali ed artificiali anche molto diversi tra loro come ceramiche, legno, materiali lapidei, malte, carta, ecc.. Ciò che rende la Risonanza Magnetica particolarmente indicata per lo studio di questi materiali, che come è noto sono molto diffusi tra i Beni Culturali, è l'utilizzazione della molecola d'acqua come sonda microscopica per studiare le strutture porose.

Come noto, l'acqua è una delle principali cause di degrado dei materiali porosi impiegati nei manufatti d'interesse storico-artistico. Recentemente, con la messa a punto di un sistema a Risonanza Magnetica portatile per superfici è stato possibile utilizzare *in situ* varie tecniche di Risonanza sulle opere d'arte e su manufatti d'interesse storico in modo non invasivo e non distruttivo. Le curve di rilassamento protonico delle molecole d'acqua confinate in una struttura porosa sono "impronte digitali" dello spazio poroso a causa degli effetti di rilassamento di superficie poichè le molecole del liquido vicino la superficie si rilassano più velocemente ed esibiscono un tempo di rilassamento più corto rispetto alle molecole del "bulk". In questo modo le curve di distribuzione in T1 (tempo di rilassamento longitudinale) sono riconducibili alle distribuzioni dei rapporti superficie/volume dello spazio poroso. Nelle figu-

re sono riportati i dati di reperti lapidei provenienti dal Teatro Greco di Taormina. Con l'imaging NMR si possono ottenere in modo non distruttivo immagini di sezioni interne delle strutture porose, con la conseguente capacità di osservare, ad esempio, la cinetica di assorbimento dell'acqua entro lo spazio poroso. Nel caso poi di materiali trattati con prodotti idrofobici, l'imaging evidenzia le vie preferenziali dell'ingresso d'acqua e, indirettamente, la distribuzione spaziale del prodotto. Le misure di rilassometria permettono di avere informazioni sui tempi di rilassamento T1 e T2 dei protoni dell'acqua e quindi sono indicativi sia del contenuto d'acqua che delle dimensioni dei canali (pori) che la contengono. I dati del campione TAO1 (in figura indicato con Grigio) e del MATTONE ROMANO (in figura indicato con Rosso) sono confrontati con due travertini romani di chimismo carbonatico.

## per assorbimento capillare

dalla scalinata, campione grigio  
dai resti romani, campione rosso



Le TECNICHE MRPM (Risonanza Magnetica nei Mezzi Porosi) utilizzate per questo studio sono:

- MRI per ottenere immagini
- Rilassamento MR (MRR) per determinare contenuto d'acqua, porosità, distribuzione delle dimensio-

ni dei pori, ed altre proprietà dello spazio poroso, applicabile anche in situ mediante NMR-MOUSE.

Nelle figure seguenti sono illustrate alcune delle strumentazioni utilizzate:

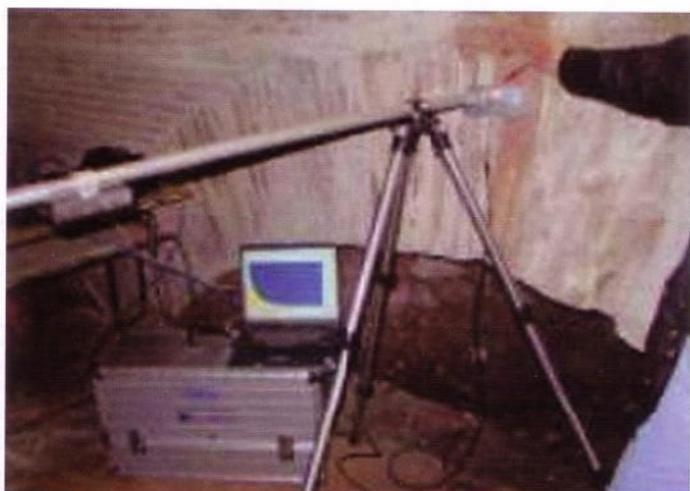
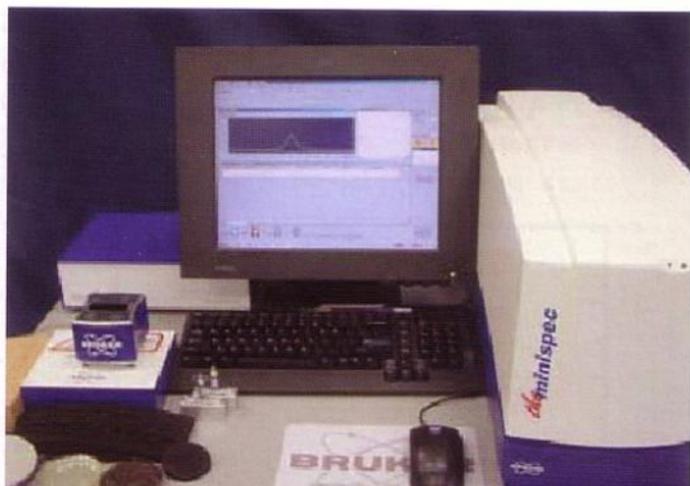


Strumentazione per Imaging



Rilassometro

### NMR portatile e alcune applicazioni



Ricerche e studi condotti nell'ambito della collaborazione scientifica con il Centro Regionale per la Progettazione e il Restauro di Palermo  
 A cura di: Dipartimento di Fisica e Tecnologie Relative, Palermo – INFM-CRS soft e Dipartimento di Fisica, Roma La Sapienza – INFM-CRS soft e Dipartimento di Fisica, L'Aquila – Dipartimento di Fisica, Bologna – Dipartimento di Chimica Fisica della Terra - Palermo – Dipartimento di Chimica, Siena – Dipartimento Farmacochimico, Tossicologico e Biologico  
 Gruppo di lavoro: Antonio Bartolotta, Stefano Bellia, Mariella Brai, Cinzia Casieri, Francesco De Luca, Paola Fantazzini, Antonella Maccotta, Filippa Morreale, Tiziano Schillaci, Giuseppe Raso

# Materiali porosi d'interesse per i beni culturali: studio di campioni lapidei

MARIELLA BRAI, MARA CAMAITI, CINZIA CASIERI, FRANCESCO DE LUCA, PAOLA FANTAZZINI, ANTONELLA MACCOTTA, C. TEREZI

Materiali come quelli lapidei, ceramiche, malte, carta, legno, resine hanno in comune un alto rapporto superficie-volume, vale a dire delle strutture porose che sono in grado di intrappolare acqua in quantità che variano da poche molecole a migliaia di miliardi di molecole d'acqua per poro. In condizioni ambientali normali, questi materiali sono quasi sempre colonizzati dall'acqua che con le sue proprietà chimico-fisiche influenza molte proprietà macroscopiche del mezzo poroso. L'acqua, ad esempio, pilota con meccanismi osmotici il trasporto di sali all'interno e all'esterno del materiale, cambia le proprietà termiche e meccaniche del mezzo poroso con la sua complessa fenomenologia termodinamica o induce alterazioni nelle strutture molecolari del materiale modificando le loro modalità d'aggregazione. In altre parole, la stabilità o precarietà temporale di molti dei materiali citati sopra è fortemente influenzata all'acqua confinata nelle loro strutture porose. Studiare queste sostanze e il comportamento dell'acqua al loro interno è dunque di vitale importanza per la conoscenza dello stato di salute di queste, specialmente se la sostanza in esame costituisce il substrato materiale di un manufatto d'interesse storico-artistico. Questo ultimo aspetto rende le cose notevolmente più complicate. Il Bene Culturale infatti non deve essere danneggiato a causa dell'analisi scientifica cui è sottoposto e, se ciò non può proprio essere evitato, è essenziale ridurre al minimo i danni comunque a fronte del vantaggio chiaro e incontrovertibile che deriva dall'aver acquisito informazioni vitali per la conservazione del Bene. Da ciò l'ovvia conseguenza che quando si tratta di Beni Culturali, ai metodi scientifici è richiesto di essere non invasivi, ovvero di possedere la capacità di non alterare durante l'analisi né la struttura microscopica né quella macroscopica del manufatto. Si potrebbe dire, forzando un po' il paragone, che per i Beni Culturali sono richiesti gli stessi criteri etici che si incontrano in biomedicina. Tra le tecniche d'indagine scientifica mirate allo studio dei sistemi porosi, non sono molte quelle che possono fregiarsi di avere una versione non invasiva. Tra queste vi è la Risonanza Magnetica. Il fenomeno della Risonanza Magnetica si basa sulla proprietà di molti nuclei atomici, come quelli degli idrogeni dell'acqua, di possedere microscopici

dipoli magnetici. Sotto l'azione di un campo magnetico esterno i dipoli si ordinano e acquistano la capacità di assorbire energia sotto certe forme e in certe precise piccole quantità (risonanza). L'assorbimento di energia modifica le condizioni di ordinamento dei dipoli che tendono a ritornare in quelle dello stato iniziale non appena cessa l'assorbimento. Il processo di ritorno allo stato iniziale rende i dipoli osservabili: se ne può contare il numero e quindi, per esempio, valutare la quantità d'idrogeno contenuto in un certo campione; si può misurare la velocità con cui i dipoli ritornano allo stato iniziale (rilassamento) e da questa ottenere informazioni sulle proprietà fisiche del sistema molecolare cui appartengono; da un parametro chiamato di chemical-shift si può identificare la natura chimica delle molecole di cui si osservano i dipoli, e altro ancora. Questi fenomeni comportano scambi di energia così basse da non coinvolgere in alcun modo l'integrità microscopica e, quindi, macroscopica del materiale. Le tecniche di Risonanza Magnetica che sono state più ampiamente impiegate nella ricerca sui materiali porosi sono quelle di imaging, ben nota per la sua utilizzazione in diagnostica clinica, e quella meno nota di rilassometria, usata principalmente nello studio delle proprietà dinamiche e strutturali degli aggregati molecolari. L'uso diretto della Risonanza Magnetica su manufatti d'interesse storico-artistico non ha ricevuto finora una grande attenzione a causa del costo e complessità della strumentazione e, soprattutto, per il ridotto volume di accesso alla sonda di Risonanza, volume che può essere quantificato nell'ordine del  $\text{cm}^3$ , ovvero solo su campioni molto piccoli o su frammenti di essi era possibile ottenere dati di Risonanza Magnetica. Ciò ha sempre fatto includere la Risonanza Magnetica tra le metodologie sperimentali invasive, nonostante le sue enormi potenzialità sperimentali. Recentemente però, la Risonanza Magnetica è stata investita da una piccola rivoluzione tecnologica che ne ha modificato profondamente le possibilità d'impiego nell'ambito dei Beni Culturali. Questo cambiamento ha prodotto una sonda portatile che ha reso possibile utilizzare la Risonanza Magnetica su Beni Culturali, indipendentemente dalla loro forma, volume e luogo di residenza del Bene. In altre parole la sonda a Risonanza Magnetica per super-

fici ha reso questa tecnica non invasiva, facilmente trasportabile per analisi *in situ* e di semplice gestione logistica. Naturalmente con la strumentazione portatile non si possono ottenere tutte le informazioni scientifiche che normalmente sono fornite dalla grande strumentazione di laboratorio. Per quanto riguarda lo studio dei sistemi porosi, le informazioni di Risonanza Magnetica che possono essere ottenute con la sonda

superficiale permettono una descrizione sufficientemente accurata di molti aspetti di queste sostanze e delle loro proprietà, specialmente se la descrizione viene integrata da dati ottenuti con simulazioni su strumentazione da laboratorio. Le informazioni che i metodi basati sulla Risonanza Magnetica possono fornire sulla morfologia dello spazio poroso sono difficilmente ottenibili per altra via. Questi metodi permettono di esplorare le strutture porose dal punto di vista della molecola d'acqua e quindi caratterizzare gli spazi ad essa accessibili (o individuare quelli interdetti) su una scala che può variare tra il milionesimo e il centesimo di cm. La struttura di confinamento dell'acqua influisce drasticamente sul rilassamento dei dipoli magnetici; in particolare si osserva un aumento della loro velocità di rilassamento, rispetto a quella dell'acqua non confinata, e la diversificazione delle velocità che risulta legata alla distribuzione delle dimensioni dei pori, alle loro connessioni e all'eterogeneità delle superfici porose. In altre parole quasi tutti gli aspetti topologici e morfologici della struttura porosa concorrono a determinare la forma e le modalità di rilassamento del dipolo, modalità che, in un certo senso, può essere considerata come una sorta di impronta digitale dello spazio poroso. In Fig. 1 sono riportate le distribu-

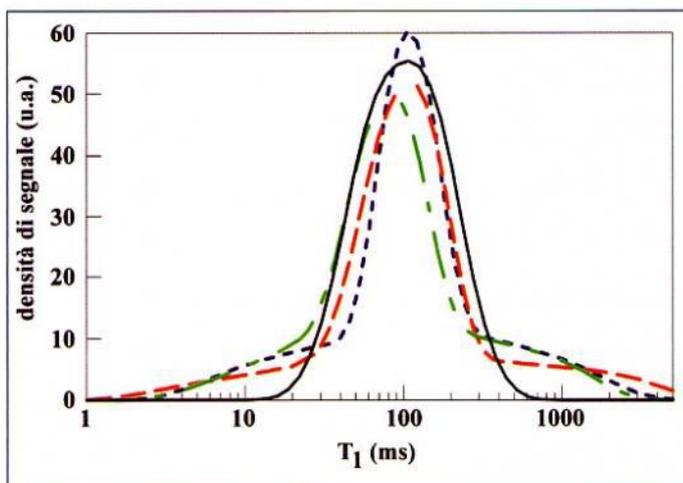


Fig. 1 – Le distribuzioni del tempo di rilassamento dei dipoli magnetici dell'acqua sono riconducibili alle distribuzioni dei rapporti superficie/volume dello spazio poroso. Con le linee tratteggiate sono riportati i dati ottenuti con strumentazione da laboratorio, mentre con la linea continua è riportata la curva di rilassamento ottenuta con la strumentazione portatile di superficie, in questo caso lo strumento BrukerEureka-Mouse10.

zioni quasi-continue del tempo di rilassamento dei dipoli dell'acqua di un reperto lapideo proveniente dal sito archeologico del Teatro Antico di Taormina, il campione "Rosso" completamente saturo d'acqua rinvenuto tra i resti della parte romana del teatro.

I risultati di Fig. 1 mostrano che i dati ottenuti in laboratorio con strumentazione standard (linee tratteggiate) e quelli relativi alla strumentazione portatile (linea continua) sono in ottimo accordo tra loro a riprova della grande opportunità che la strumentazione di superficie offre per consentire il trasferimento della cultura delle grandi macchine per Risonanza Magnetica dal laboratorio al sito archeologico, al museo, alla biblioteca. In Fig. 2 è mostrato, per confronto, la distribuzione delle dimensioni dei pori ottenute sul campione "Rosso" con la porosimetria ad iniezione di mercurio. I due metodi mostrano punti di accordo e differenze dovute alla diversa definizione operativa della dimensione caratteristica del poro.

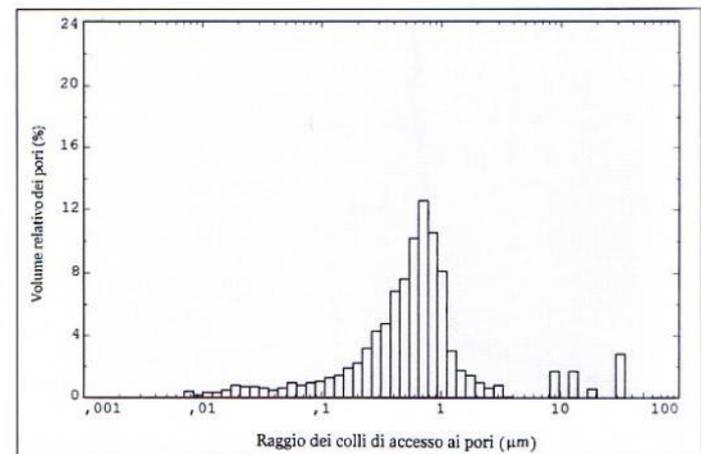


Fig. 2 – Distribuzione delle dimensioni dei "pori" ottenute con la porosimetria a mercurio del campione "Rosso".

La sonda portatile per Risonanza Magnetica è costituita da un piccolo magnete permanente con una piccola antenna circolare con cui si invia (e si riceve) l'energia ai dipoli magnetici dell'acqua. Il volume è circa di 5x5x10 cm e il peso circa 2 kg, mentre l'elettronica, cui la sonda è collegata con un cavo, pesa circa 10 kg ed ha le dimensioni di una piccola valigia. Laddove la quasi totalità dei metodi sperimentali non invasivi non va oltre l'esame di qualche millesimo di mm dalla superficie del manufatto, la sonda di superficie per Risonanza Magnetica ha una capacità di penetrazione dalla superficie che può arrivare a circa 8 mm. Inoltre, con opportune calibrazioni, consente di valutare in modo semplice e rapido la percentuale in volume dell'acqua presente nella struttura porosa. A titolo esemplificativo, è stata valutata con questa sonda la porosità del campione "Rosso" che risulta essere circa il 35%, in ottimo accordo con il risultato ottenuto in

laboratorio utilizzando la spinta di Archimede. Per completare il quadro delle opportunità fornite dalle metodologie basate sulla Risonanza Magnetica nello studio dei materiali porosi, si può ricordare che è possibile ottenere, spesso in modo non invasivo e non distruttivo, immagini di sezioni interne dell'acqua contenuta nel corpo poroso e quindi informazioni, ad esempio, sulla cinetica del suo assorbimento. Nel caso poi di materiali trattati con prodotti idrofobici, questo metodo evidenzia le vie preferenziali dell'ingresso d'acqua e, indirettamente, la distribuzione spaziale del repellente. Un esempio è fornito in Fig. 3.

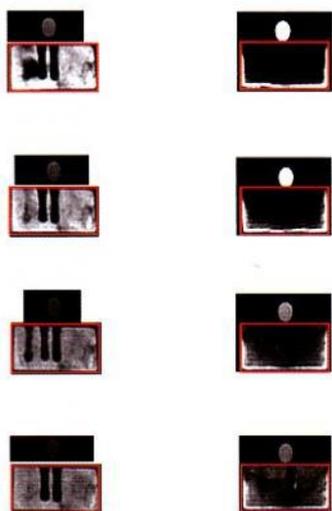


Fig. 3 – Immagini a Risonanza magnetica di una calcarenite (Sasso di Matera) non trattata e trattata con prodotti idrorepellenti. Le immagini sono state acquisite dopo aver tenuto i campioni (dimensioni 5x5x2 cm<sup>3</sup>) in contatto con acqua liquida per differenti tempi. Entrambi i campioni, come si nota dalle immagini, erano stati precedentemente forati per la determinazione dell'efficacia del consolidante.

### Sviluppi futuri per l'applicazione di tecniche NMR nei materiali di interesse per i beni culturali:

- Indagini sistematiche ed analisi di routine in laboratorio per la caratterizzazione della struttura di materiali porosi e del loro degrado
- Studi sistematici dei trattamenti idrorepellenti
- Dal laboratorio al cantiere: misure *in situ* del contenuto d'acqua e delle proprietà capillari mediante strumenti NMR portatili.

### BIBLIOGRAFIA

- G. EIDMANN, R. SAVELSBERG, P. BLÜMLER, B. BLÜMICH, *The NMR-MOUSE: a mobile universal surface explorer*, J. Magn. Reson. A, 122: 104-109 (1996).
- B. BLÜMICH, P. BLÜMLER, G. EIDMANN, A. GUTHAUSEN, R. HAKEN, U. SCHMITZ, K. SAITO, G. ZIMMER, *The NMR MOUSE: construction, excitation, and applications*, Magn. Reson. Imaging, 16: 479-484 (1998).
- G.C. BORGIA, M. CAMAITI, F. CERRI, P. FANTAZZINI, F. PIACENTI, *MRI tomography. A new method to evaluate treatments on stone monuments*, La Chimica e l'Industria, 81: 729731 (1999).
- G.C. BORGIA, M. CAMAITI, F. CERRI, P. FANTAZZINI, F. PIACENTI, *Study of water penetration inside rock materials by nuclear magnetic resonance tomography: hydrophobic treatment effects*, J. Cultural Heritage, 1: 127-132 (2000).
- L. APPOLONIA, G.C. BORGIA, V. BORTOLOTTI, R.J.S.BROWN, P. FANTAZZINI, G. REZZARO, *Effects of hydrophobic treatments of stone on pore water studied by continuous distribution analysis of NMR relaxation times*, Magn. Reson. Imaging, 19: 509-512 (2001).
- C. CASIERI, S. BUBICI, I. VIOLA, F. DE LUCA, R. MELZI, F. TEDOLDI, *Role of diffusion on valuation of porosity in strong inhomogeneous fields*, 31st Congress Ampère on Magnetic Resonance, July 2002, Poznan (Poland) p.98.
- C. CASIERI, F. DE LUCA, P. FANTAZZINI, I. VIOLA, *Use of model systems to interpret NMR in-situ measurements for cultural heritage materials*, XXXIII National Congress on Magnetic Resonance GIDRM, 16-19 September 2003, Bressanone (Italy).
- C. CASIERI, F. DE LUCA, P. FANTAZZINI, I. VIOLA, *Single-sided NMR analysis on standard systems for the evaluation of in situ measurements on Cultural Heritage*, LXXXIX Congresso SIF, 17-22 September 2003, Parma (Italy).
- C. CASIERI, S. BUBICI, I. VIOLA AND F. DE LUCA, *A low resolution non-invasive NMR characterization of ancient paper*, Solid State Nucl. Magn. Reson., 26: 77-85 (2004).
- C. CASIERI, F. DE LUCA, P. FANTAZZINI, *Pore-size evaluation by single-sided Nuclear Magnetic Resonance measurements: compensation of water self-diffusion effect on transverse relaxation*, accepted on J. Appl. Phys., (2004).

# Datazione mediante la tecnica della Termoluminescenza

MARIELLA BRAI, GIUSEPPE RASO, TIZIANO SCHILLACI, ANTONIO BARTOLOTTA

La caratterizzazione temporale dei campioni prelevati al Teatro Greco di Taormina, verrà eseguita mediante la tecnica della termoluminescenza, presso il laboratorio di datazione del Dipartimento di Fisica e Tecnologie Relative (DiFTeR) dell'Università degli Studi di Palermo.

La termoluminescenza (TL) è l'emissione luminosa, emessa nell'infrarosso-vicino visibile, che si osserva durante il riscaldamento di un isolante o di un semiconduttore precedentemente irradiato con radiazioni ionizzanti.

Mediante questa tecnica, diversi sono i materiali e gli oggetti di interesse archeologico e storico che possono essere datati e di conseguenza anche i singoli strati (stratigrafia).

Una frazione dei costituenti la ceramica (come quarzo e feldspati) è termoluminescente: questi materiali immagazzinano stabilmente sotto forma di elettroni l'energia dovuta alle interazioni con le radiazioni  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma$  dell'irraggiamento naturale. La liberazione degli elettroni intrappolati avviene mediante riscaldamento a temperature elevate (fino a 450 °C) ed è caratterizzato da una emissione luminosa, la termoluminescenza appunto, che può essere acquisita mediante fotomoltiplicatore.

La cottura in fornace della ceramica elimina ogni termoluminescenza accumulata durante l'esistenza geologica dell'argilla (e degli eventuali costituenti aggiunti all'impasto), e ricomincia a crescere con il tempo (accumulo archeologico), tanto più rapidamente quanto maggiori sono le concentrazioni di radioattività nella ceramica e nell'ambiente. La quantità di termoluminescenza osservata è quindi un indicatore sia dell'età dell'oggetto che dell'irraggiamento cui è stato sottoposto. Le datazioni infatti si riferiscono all'ultima cottura subita dall'oggetto. Si pensi infatti alla possibilità di incendi o di riscaldamenti accidentali.

Esattamente come in campo dosimetrico tradizionale, per datare un oggetto mediante la tecnica TL, si deve misurare la dose che l'oggetto in esame ha assorbito a seguito dell'esposizione a un irraggiamento, in questo caso quello naturale. La radiazione naturale si compone

per una quota parte da radiazione proveniente dal cosmo (radiazione cosmica) e per una quota parte proveniente dalla terra stessa (i radionuclidi naturali). Questi ultimi sono principalmente  $^{40}\text{K}$ ,  $^{238}\text{U}$  e  $^{232}\text{Th}$ . La dose assorbita da un oggetto per effetto di questo irraggiamento sarà proporzionale alla durata dell'irraggiamento stesso. Questa dose viene chiamata dose archeologica e l'età si ricava utilizzando la relazione:

$$\text{Età (anni)} = \left( \frac{\text{Dose archeologica}}{\text{Dose annua}} \right)$$

dove la dose annua viene misurata attraverso dosimetri a termoluminescenza posizionati nel luogo dove è presente l'oggetto da datare, con periodo di accumulo della dose ambientale di alcuni mesi.

Il laboratorio di datazione del DiFTeR è dotato di due unità di lettura per termoluminescenza, HARSHAW Mod. 3500-TLD e 3500 QS.

Due sono essenzialmente le tecniche di datazione per termoluminescenza, e cioè la tecnica "inclusion" e la tecnica "fine-grain". La prima richiede una quantità di campione prelevato di 5-10 g, invece la tecnica "fine-grain" circa 200 mg. Per minimizzare la quantità di materiale da campionare, è stata scelta la tecnica "fine grain".

Asportata i primi millimetri del campione (eliminazione del contributo a della radiazione naturale), il campione viene frantumato attraverso una morsa e ridotto delicatamente in polvere con un mortaio di agata. Mediante un processo di separazione chimica e successiva setacciatura, vengono isolati i grani con diametro di 1-8  $\mu\text{m}$ . Le polveri così ottenute, vengono poste su-dischetti di alluminio e posizionate nella camera porta campioni del fornetto delle unità di lettura a termoluminescenza. La luce di fluorescenza stimolata termicamente viene raccolta da un fotomoltiplicatore ed il segnale viene campionato mediante un convertitore A/D. Alla viene si ottiene una "glow-curve", in cui l'area è proporzionale alla quantità di dose assorbita.

Mediante spettrometria e dosimetri TL posizionati nelle vicinanze dell'oggetto da datare è possibile determinare i contributi alla dose annua derivanti da radia-

zioni  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma$  provenienti dal suolo e rocce circostanti ed il contributo della radiazione cosmica.

Infine l'età è misurata attraverso la relazione

$$Età \text{ (anni)} = \left( \frac{\text{Dose assorbita}}{aD_{\alpha} + D_{\beta} + D_{\gamma} + D_{CR}} \right)$$

in cui  $D_{\alpha}$ ,  $D_{\beta}$ ,  $D_{\gamma}$  e  $D_{CR}$  rappresentano i contributi  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma$ , e dei raggi cosmici alla dose annua ed  $a$  è un fattore che tiene conto della minore efficienza delle particelle  $\alpha$  nel produrre termoluminescenza.

Nel teatro greco di Taormina sono già stati posizionati dei dosimetri per la stima della dose annua.

I dosimetri posti in campo sono i TLD-100H della Bicron (LiF: Cu, Mg,P), e saranno lasciati per un periodo di alcuni mesi, in modo da poter registrare un segnale dosimetrico statisticamente significativo e tale da ottimizzare il rapporto segnale/rumore.

Campioni ambientali sono stati sottoposti a misure di spettrometria  $\alpha$  e  $\gamma$  in laboratorio, al fine di determinare i contributi alla dose annua dei singoli componenti la radiazione naturale.

# Note preliminari sulla caratterizzazione di alcuni materiali

G. RIZZO, L. ERCOLI, G. ALGOZZINI, B. MEGNA, F. D'AGOSTINO, M. PARLAPIANO, M.C. SUNSERI

Al fine di studiare lo stato di conservazione di alcuni elementi strutturali e di alcuni materiali di finitura del teatro greco romano di Taormina, il Centro Regionale per la Progettazione e il Restauro ha da tempo individuato alcune aree campione significative per il prelievo dei materiali costitutivi e per effettuare la diagnostica delle forme di degrado.

In questa iniziativa è stato coinvolto il Laboratorio di Ingegneria Chimica per i Beni Culturali del DICPM, cui sono state affidate le analisi volte alla caratterizzazione mineralogica e tessiturale, mediante la diffrazione di raggi X, e l'osservazione in microscopia ottica di sezioni sottili; la composizione elementale, necessaria per una completa identificazione di alcuni litotipi, è in corso di esecuzione mediante microanalisi ESEM/EDX.

Lo studio, in corso di svolgimento, viene affrontato in collaborazione con il laboratorio chimico del Centro Regionale, che ha effettuato analisi chimiche attraverso l'uso della cromatografia ionica per l'individuazione dei sali solubili e analisi elementale in fluorescenza dei Raggi X.

Le aree di prelievo sono: il Colonnato, il Crepidoma, la Galleria nella summa cavea, la versura.

La specifica provenienza e la tipologia dei campioni è riportata nelle schede di campionamento allegate.

A titolo di esempio dell'impostazione dello studio presentiamo i risultati delle analisi effettuate sulle colonne del *frons scenae* (campioni TT11, TT12, TT13), la rimanente parte dei campioni è ancora in fase di caratterizzazione.

## CAMPIONE TT11

*Oggetto:* Scheggia di marmo cipollino

*Localizzazione:* Seconda Colonna ovest

*Caratteristiche area prelievo:* fusto

*Finalità:* Caratterizzazione e studio del degrado

*Analisi:* XRD – M.O. in L.T. – M.O. in L.R.

L'osservazione in M.O della sezione sottile evidenzia che la roccia sotto l'aspetto tessiturale si presenta come un mosaico eteroblastico di cristalli anedrali di calcite, le interfacce cristalline hanno andamento lobato, sono

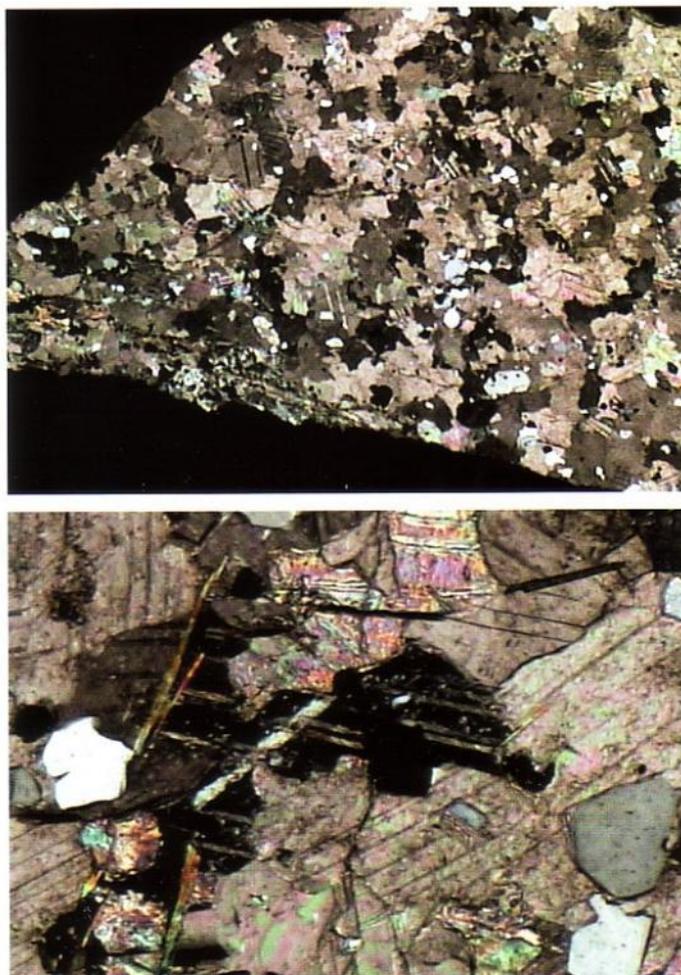


Fig.1 - Microfotografia TT11 in XPL 10x (sopra); particolare all'ingrandimento di 90x (sotto)

presenti laminazioni di muscovite e clorite e sporadici granuli di quarzo (Fig.1)

Le venature di muscovite presentano andamento flesso.

Le dimensioni dei grani, variano: da 250  $\mu\text{m}$  a 300  $\mu\text{m}$  per la Calcite; da 50  $\mu\text{m}$  a 270  $\mu\text{m}$  per la Muscovi-

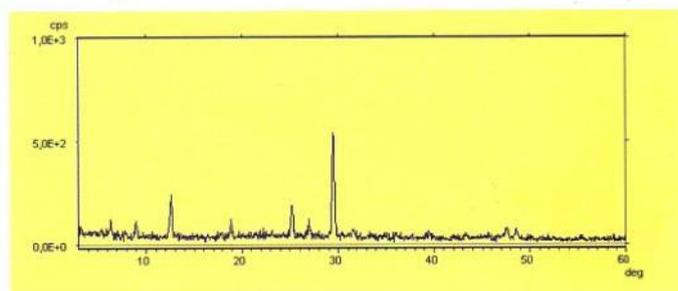


Fig 2 - Diffrattogramma del campione TT11

te; da 46  $\mu\text{m}$  a 160  $\mu\text{m}$  per il Quarzo.

La diffrattometria dei Raggi X (Fig. 2) rileva la presenza delle seguenti fasi, in ordine di abbondanza decrescente: calcite, clorite, muscovite; la quantità di quarzo è al di sotto del livello di rilevabilità dello strumento.

### CAMPIONE TT12

*Oggetto:* Marmo basamento prima colonna

*Localizzazione:* Basamento della prima colonna ovest

*Caratteristiche campione:* frammento

*Finalità:* Caratterizzazione e studio del degrado

*Analisi:* XRD – M.O. in L.T. – M.O. in L.R.

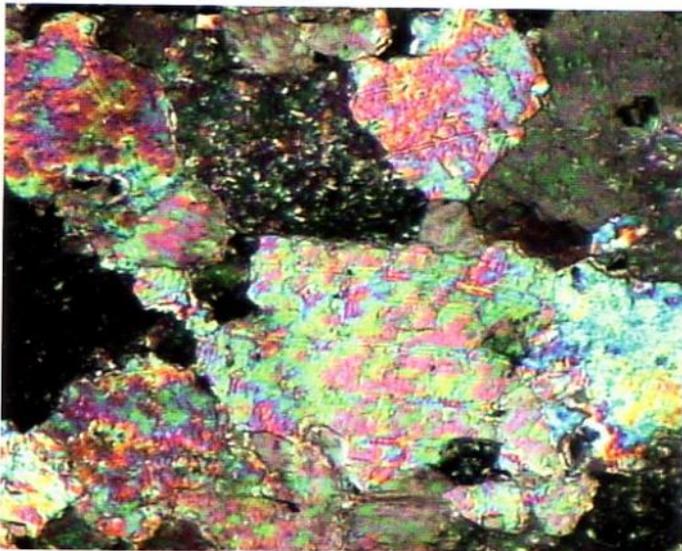
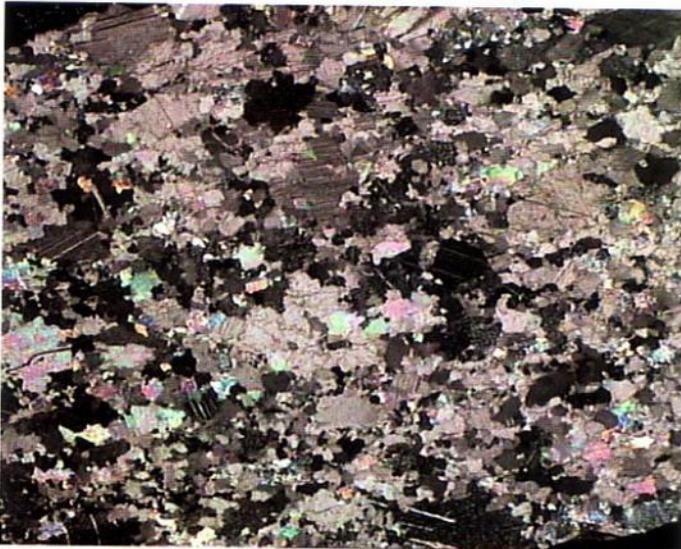


Fig 3 - Microfotografia TT12 in XPL 10x (sopra); particolare all'ingrandimento di 90x (sotto)

Si tratta di un marmo saccharoide a tessitura eteroblastica con interfacce cristalline suturate o lobate, molto raramente piane. La fabric non è orientata.

La dimensione massima del grano (MGS) è di 452.5 mm

Si nota una patina di alterazione (Fig 4) spessa da 0.05 mm a 0.25 mm di colore verdastro, presumibilmente dovuta all'infiltrazione di tessuti vegetali.

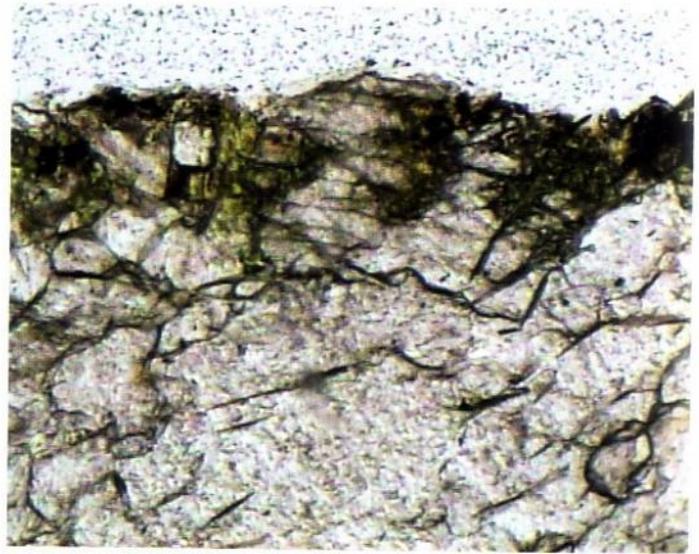


Fig 4 - Microfotografia TT12 in PPL 90x

I cristalli sono tutti di calcite così come evidenzia anche la diffrattometria ai Raggi X (Fig 5)

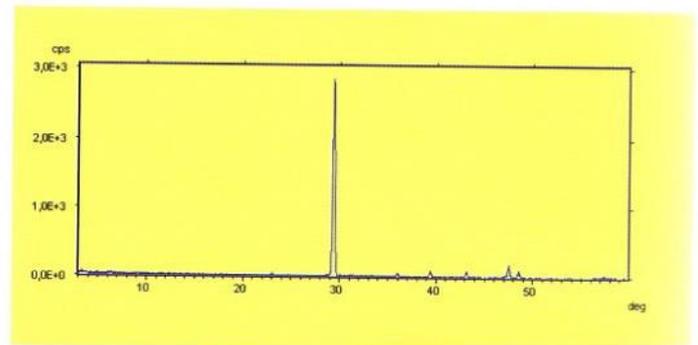


Fig 5 - diffrattogramma del campione TT12

### CAMPIONE TT13

*Oggetto:* Scheggia di colonna di "Granito"

*Localizzazione:* Terza colonna ovest

*Caratteristiche area prelievo:* fusto

*Caratteristiche campione:* frammento

*Finalità:* Riconoscimento del litotipo e studio del degrado superficiale

*Osservazioni:* La superficie esterna presenta una patina probabilmente legata ad un trattamento di restauro precedente. Superficie interna : presenza di una esilissima patina di materiale limoso originato, probabilmente da alterazione dei minerali costituenti

*Analisi:* XRD– M.O. in L.T. – M.O. in L.R.

Si tratta di una roccia ignea intrusiva di tipo granitoide; la tessitura è olocristallina. Si riconoscono feldspati, in cristalli euedrali e subedrali e subordinatamente biotite, anfiboli, e quarzo in cristalli anedrali.

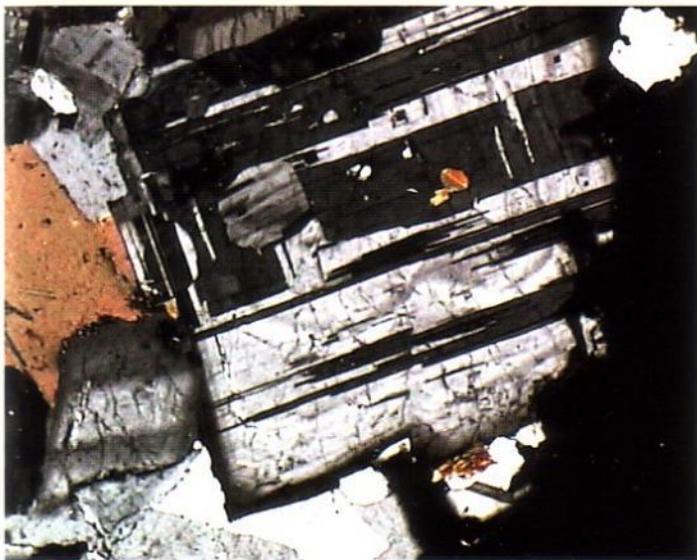


Fig. 6 - Microfotografia TT13 in XPL 10x (sopra); particolare all'ingrandimento di 25x (sotto)

Nel tracciato XRD (Fig.7) sono stati identificati in ordine decrescente: feldspati (albite), quarzo, biotite, tracce di anfiboli

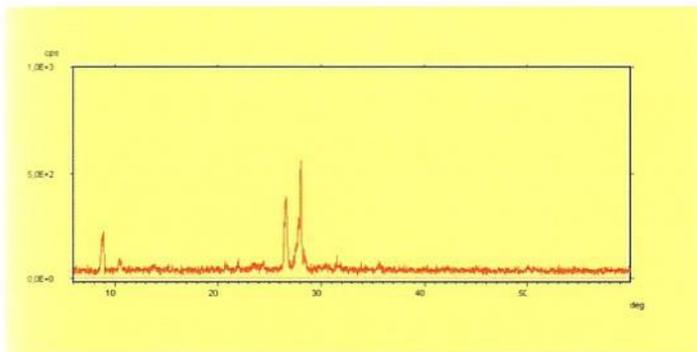


Fig. 7 - Diffratogramma relativo al campione TT13

I risultati delle analisi EDS per la determinazione delle quantità relative di metalli alcalini sono in corso di interpretazione al pari dei diffratogrammi dei rimanenti campioni.

## SCHEDE DI CAMPIONAMENTO

### Campione: TT1

*Oggetto:* Frammento di roccia

*Localizzazione:* Cuneo della cavea a destra dell'orchestra in direzione sud-est

*Caratteristiche area prelievo:*

*Caratteristiche campione:*

*Finalità:*

*Caratterizzazione*

*Osservazioni:*

*Foto della zona del prelievo ed analisi da effettuare:*



XRD – IC – SEM – EDS – M.O. in L.T. – M.O. in L.R.  
– FTIR – Altro.....

### CAMPIONE TT2

*Oggetto:* Frammento di roccia campione di grigio

*Localizzazione:* pavimentazione cavea

*Caratteristiche area prelievo:*

*Caratteristiche campione:* affioramento (?) di grigio di Taormina

*Finalità:* Caratterizzazione

*Osservazioni:*

*Foto della zona del prelievo ed analisi da effettuare:*



XRD – IC – SEM – EDS – M.O. in L.T. – M.O. in L.R.  
– FTIR – Altro.....

**Campione: TT3**

*Oggetto:* Frammento lapideo naturale

*Localizzazione:* Pavimento cavea

*Caratteristiche area prelievo:* piano sterrato con diversi frammenti di colonna tortile.

*Caratteristiche campione:* scheggie

*Finalità:* riconoscimento

*Osservazioni:* inclusioni argillose fortemente degradate

*Foto della zona del prelievo ed analisi da effettuare*



XRD – IC – SEM – EDS – M.O. in L.T. – M.O. in L.R.  
– FTIR – Altro.....

**Campione: TT4 (strato A+B+C, strato esterno)**

*Oggetto:* lapideo artificiale

*Localizzazione:* basamento crepidoma

*Caratteristiche area prelievo:*

*Caratteristiche campione:* frammento

*Finalità:* caratterizzazione

*Osservazioni:*

*Foto della zona del prelievo ed analisi da effettuare:*



XRD – IC – SEM – EDS – M.O. in L.T. – M.O. in L.R.  
– FTIR – Altro.....

**Campione: TT5**

*Oggetto:* Frammento erratico malta a cocciopesto

*Localizzazione:* Crepidoma

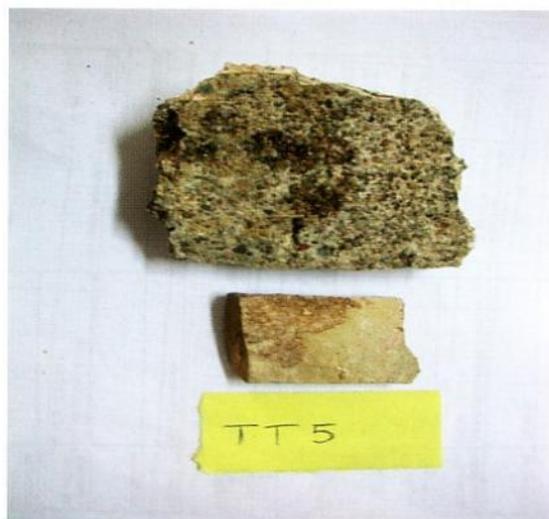
*Caratteristiche area prelievo:* superficie con stratigrafia di intonaci e marmo

*Caratteristiche campione:* frammenti

*Finalità:* caratterizzazione

*Osservazioni:*

*Foto della zona del prelievo ed analisi da effettuare:*



XRD – IC – SEM – EDS – M.O. in L.T. – M.O. in L.R.  
– FTIR – Altro.....

**Campione: TT6**

*Oggetto:* scialbatiura su marmo

*Localizzazione:* Crepidoma

*Caratteristiche area prelievo:*

*Caratteristiche campione:*

*Finalità:*

*Osservazioni:*

*Foto della zona del prelievo ed analisi da effettuare*



XRD – IC – SEM – EDS – M.O. in L.T. – M.O. in L.R.  
– FTIR – Altro.....

**Campione: TT7**

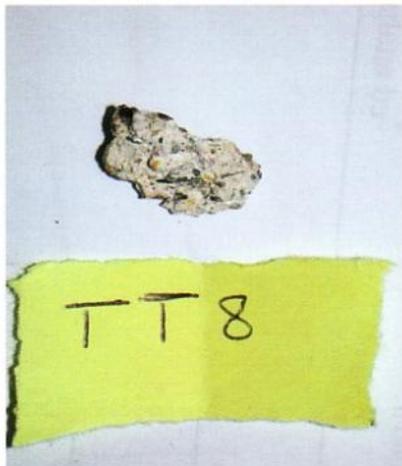
Oggetto: malta sotto lastre e marmo sotto il coc-  
ciopesto di finitura  
Localizzazione: crepidoma  
Caratteristiche area prelievo: superficie con strati-  
grafia di intonaci e marmo  
Caratteristiche campione:  
Finalità:  
Caratterizzazione  
Osservazioni:  
Foto della zona del prelievo ed analisi da effettuare



XRD – IC – SEM – EDS – M.O. in L.T. – M.O. in L.R.  
– FTIR – Altro.....

**Campione: TT8**

Oggetto: Malta di collegamento mattoni sotto “TT7”  
Localizzazione: Crepidoma  
Caratteristiche area prelievo: superficie con strati-  
grafia di intonaci e marmo  
Caratteristiche campione: frammento  
Finalità: Caratterizzazione  
Osservazioni:  
Foto della zona del prelievo ed analisi da effettuare



XRD – IC – SEM – EDS – M.O. in L.T. – M.O. in L.R.  
– FTIR – Altro.....

**Campione: TT9**

Oggetto: Scheggia di marmo cipollino  
Localizzazione: Quarta colonna ovest  
Caratteristiche area prelievo: fusto  
Caratteristiche campione:  
Finalità: Caratterizzazione  
Osservazioni:  
Foto della zona del prelievo ed analisi da effettuare:



XRD – IC – SEM – EDS – M.O. in L.T. – M.O. in L.R.  
– FTIR – Altro.....

**Campione: TT10**

Oggetto: Granito  
Localizzazione: Prima colonna ovest  
Caratteristiche area prelievo: fusto  
Caratteristiche campione: frammenti  
Finalità: Caratterizzazione, e confronto col campione  
“TT13”  
Osservazioni:  
Foto della zona del prelievo ed analisi da effettuare

XRD – IC – SEM – EDS – M.O. in L.T. – M.O. in L.R.



– FTIR – Altro.....

**Campione: TT11**

*Oggetto:* Scheggia di marmo cipollino  
*Localizzazione:* Seconda Colonna ovest  
*Caratteristiche area prelievo:* fusto  
*Caratteristiche campione:*  
*Finalità:* Caratterizzazione e studio del degrado  
*Osservazioni:*  
*Foto della zona del prelievo ed analisi da effettuare*



XRD – IC – SEM – EDS – M.O. in L.T. – M.O. in L.R.  
– FTIR – Altro.....

**Campione: TT12**

*Oggetto:* Marmo basamento prima colonna  
*Localizzazione:* Basamento della prima colonna ovest  
*Caratteristiche area prelievo:*  
*Caratteristiche campione:* frammento  
*Finalità:* Caratterizzazione  
*Osservazioni:*

*Foto della zona del prelievo ed analisi da effettuare*



XRD – IC – SEM – EDS – M.O. in L.T. – M.O. in L.R.  
– FTIR – Altro.....

**Campione: TT13**

*Oggetto:* Granito  
*Localizzazione:* Terza colonna ovest  
*Caratteristiche area prelievo:* fusto  
*Caratteristiche campione:* frammento  
*Finalità:* Riconoscimento e studio del degrado superficiale  
*Osservazioni:* Superficie esterna presenta una patina probabilmente legata ad un precedente trattamento. Superficie interna :Argillificazione dei feldspati, o degrado (?), percolamento della terra dovuta alle piogge  
*Foto della zona del prelievo ed analisi da effettuare*

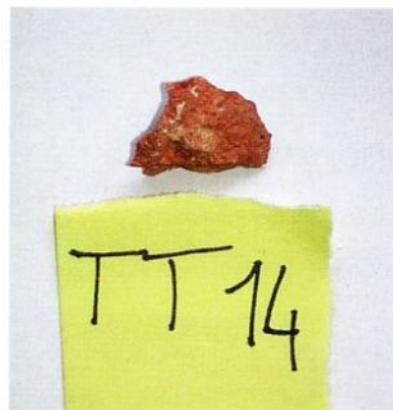


XRD – IC – SEM – EDS – M.O. in L.T. – M.O. in L.R.  
– FTIR – Altro.....

**Campione: TT14**

*Oggetto:* Mattone da muratura  
*Localizzazione:* Crepidoma  
*Caratteristiche area prelievo:*  
*Caratteristiche campione:* frammenti  
*Finalità:* riconoscimento e caratterizzazione  
*Osservazioni:*

*Foto della zona del prelievo ed analisi da effettuare*



XRD – IC – SEM – EDS – M.O. in L.T. – M.O. in L.R.  
– FTIR – Altro.....

**Campione: TT15**

*Oggetto:* Mattone

*Localizzazione:* crepidoma

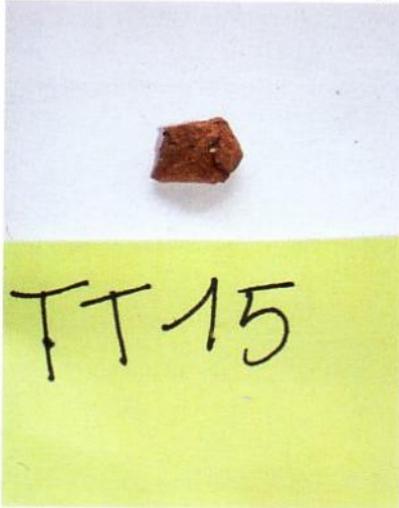
*Caratteristiche area prelievo:*

*Caratteristiche campione:* frammenti

*Finalità:* caratterizzazione

*Osservazioni:* stesse caratteristiche macroscopiche del "TT14"

*Foto della zona del prelievo ed analisi da effettuare*



XRD – IC – SEM – EDS – M.O. in L.T. – M.O. in L.R.  
– FTIR – Altro.....

**Campione: TT16**

*Oggetto:* Lapideo naturale Grigio di taormina?

*Localizzazione:* pavimentazione cavea

*Caratteristiche area prelievo:* zona inferiore di elemento semiellittico

*Caratteristiche campione:* scheggie

*Finalità:* riconoscimento

*Osservazioni:*

*Foto della zona del prelievo ed analisi da effettuare*



XRD – IC – SEM – EDS – M.O. in L.T. – M.O. in L.R.  
– FTIR – Altro.....

**Campione: TT17 Bianco- rosso-rosa**

*Oggetto:* Lapideo naturale Rosso di taormina?

*Localizzazione:* pavimentazione cavea , frammento di colonna

*Caratteristiche area prelievo:* sezione della colonna

*Caratteristiche campione:* scheggie

*Finalità:* riconoscimento

*Osservazioni:*

*Foto della zona del prelievo ed analisi da effettuare*



XRD – IC – SEM – EDS – M.O. in L.T. – M.O. in L.R.  
– FTIR – Altro.....

**Campione: TT18**

*Oggetto:* Mattone

*Localizzazione:* Versura sud-ovest

*Caratteristiche area prelievo:* frammento tra conci di grigio di taormina

*Caratteristiche campione:* frammento

*Finalità:* Caratterizzazione

*Osservazioni:* zeppatura romana nella muratura greca

*Foto della zona del prelievo ed analisi da effettuare*



XRD – IC – SEM – EDS – M.O. in L.T. – M.O. in L.R.  
– FTIR – Altro.....

### Campione: TT 19

Oggetto: Mattone elevazione romana  
Localizzazione: Versura sud-ovest  
Caratteristiche area prelievo: sopra conci di grigio di taormina  
Caratteristiche campione: frammento  
Finalità: Caratterizzazione  
Osservazioni:  
*Foto della zona del prelievo ed analisi da effettuare*



XRD – IC – SEM – EDS – M.O. in L.T. – M.O. in L.R.  
– FTIR – Altro.....

### Campione: TT20

Oggetto: Tufo giallo  
Localizzazione: Galleria summa cavea  
Caratteristiche area prelievo: base della volta della galleria superiore  
Caratteristiche campione:  
Finalità: Caratterizzazione  
Osservazioni:  
*Foto della zona del prelievo ed analisi da effettuare*



XRD – IC – SEM – EDS – M.O. in L.T. – M.O. in L.R.  
– FTIR – Altro.....

### Campione: TT21

Oggetto: Malta della volta con blocchetti di tufo  
Localizzazione: Galleria summa cavea  
Caratteristiche area prelievo:  
Caratteristiche campione:  
*Foto della zona del prelievo ed analisi da effettuare*  
XRD – IC – SEM – EDS – M.O. in L.T. – M.O. in L.R.  
– FTIR – Altro.....  
Finalità: caratterizzazione malta [malta alleggerita (?)]  
Osservazioni: si riscontra la presenza di volte con blocchetti di basalto (vedi foto sotto).



### Campione: TT22

Oggetto: Malta tra mattoni della volta  
Localizzazione: Galleria summa cavea  
Caratteristiche area prelievo: Volta crollata  
Caratteristiche campione:  
Finalità: Caratterizzazione  
Osservazioni:  
*Foto della zona del prelievo ed analisi da effettuare*



XRD – IC – SEM – EDS – M.O. in L.T. – M.O. in L.R.  
– FTIR – Altro.....

**Campione: TT23**

Oggetto: frammento giallo muratura a secco

Localizzazione: scala sud ovest

Caratteristiche area prelievo:

Caratteristiche campione: frammento

Finalità: caratterizzazione

Osservazioni:

Foto della zona del prelievo ed analisi da effettuare



XRD – IC – SEM – EDS – M.O. in L.T. – M.O. in L.R.  
– FTIR – Altro.....

**Campione: TT24**

Oggetto: mattone

Localizzazione: versura sud-ovest

Caratteristiche area prelievo:

Caratteristiche campione: frammento

Finalità: confronto laterizi

Osservazioni:

Foto della zona del prelievo ed analisi da effettuare



XRD – IC – SEM – EDS – M.O. in L.T. – M.O. in L.R.  
– FTIR – Altro.....

# Analisi polliniche e microantracologiche al Teatro Antico di Taormina: primi dati

CARLA ALBERTA ACCORSI, MARTA BANDINI MOZZANTI, GIOVANNA BOSI, ANNA MARIA MERCURI, FRANCESCA TERRANOVA, PAOLA TORRI, GIULIANA TREVISAN GRANDI, ARCANGELA VALENTI

## INTRODUZIONE

Nel quadro delle ricerche interdisciplinari avviate dal Centro Regionale Progettazione e Restauro sul Teatro Antico di Taormina (fig. 1), è nato, tra il laboratorio di Bioarcheologia del Centro ed il laboratorio di Palinologia e Paleobotanica dell'Università di Modena e Reggio Emilia, un rapporto di collaborazione finalizzato allo studio archeovegetazionale nell'area del teatro greco-romano.

Lo studio si basa sull'analisi dei granuli pollinici e dei reperti di carbone microscopico presenti in carote di sedimento prelevate in occasione dei sondaggi geognostici eseguiti all'interno del teatro e nell'area immediatamente circostante.

Scopo dello studio è la ricerca di informazioni sui caratteri e la storia della flora/vegetazione e degli incendi nell'area del Teatro, per dare un contributo a ricostruire l'evoluzione naturale e culturale del paesaggio di cui il teatro è diventato elemento protagonista.

La ricerca è comunque apparsa meritevole di essere affrontata, per l'importanza del Teatro Antico quale Bene Culturale, e perché non sono state ancora svolte indagini palinologiche nell'area in questione, per quanto ci è noto.

La palinologia, studio di pollini e spore e altri sporumorfi che testimoniano la vegetazione e l'ambiente del sito e dintorni, è il mezzo più esauriente per avere informazioni sul paesaggio vegetale del passato e dell'impatto antropico su di esso; la microantracologia, studio delle particelle carboniose che sono testimonianza di incendi locali o distanti, aggiunge informazioni preziose, data l'importanza degli incendi in particolare in area mediterranea, nel determinare il paesaggio vegetale.

I dati qui presentati sono provvisori, essendo basati sull'analisi preliminare di una dozzina di campioni per quanto riguarda i pollini e solo su qualche saggio per quanto riguarda le particelle di carbone.

## MATERIALI E METODI

Sono stati fino ad ora esaminati 20 campioni prelevati dai tecnici del Laboratorio di Bioarcheologia del CRPR nel novembre del 2003 dalle carote relative a due sondaggi (Sondaggio 1, al centro dell'*orchestra*, prof. da 0,20 a 9,60 m e Sondaggio 2, nel *porticus post scaenam*, prof. da 0,80 a 9,80 m (Figg. 2, 3, 4).

I subcampioni sono stati trattati con i metodi di routine in uso nel laboratorio di Palinologia e Paleobotanica dell'Università di Modena e Reggio Emilia (Fa'egri et al., 1989; Moore et al., 1991). Le concentrazioni sia dei pollini che dei microcarboni (numero per grammo di sedimento) sono state valutate con il metodo delle spore di *Lycopodium*.

L'analisi pollinica preliminare (ca. 50 pollini per campione) è stata effettuata su 12 campioni risultati idonei. L'analisi preliminare dei carboni, risultati presenti in tutti i campioni, è stata effettuata su 5 campioni di saggio, contando il numero delle particelle carboniose presenti su 100 spore di *Lycopodium*, negli stessi vetrini analizzati per i pollini, e suddividendoli, in base al loro diametro maggiore, nelle seguenti 3 classi di taglia: piccola: >10-50  $\mu\text{m}$ ; media: >50 - 125  $\mu\text{m}$ ; grande: >125  $\mu\text{m}$ .



Fig. 1 Il Teatro di Taormina

Nell'affrontare lo studio, dopo l'analisi di campioni di saggio, si è stati consapevoli della notevole complessità di esso, per l'affiancarsi dei problemi usuali dell'archeopalinoologia, specie quella in ambienti aridi (Dimbley, 1985; Horowitz, 1992; Caramello e Arobba, 2003), con evidenze di disturbi nella biostratigrafia dati dalla presenza in taluni campioni di assemblaggi pollinici di età apparentemente diversa.

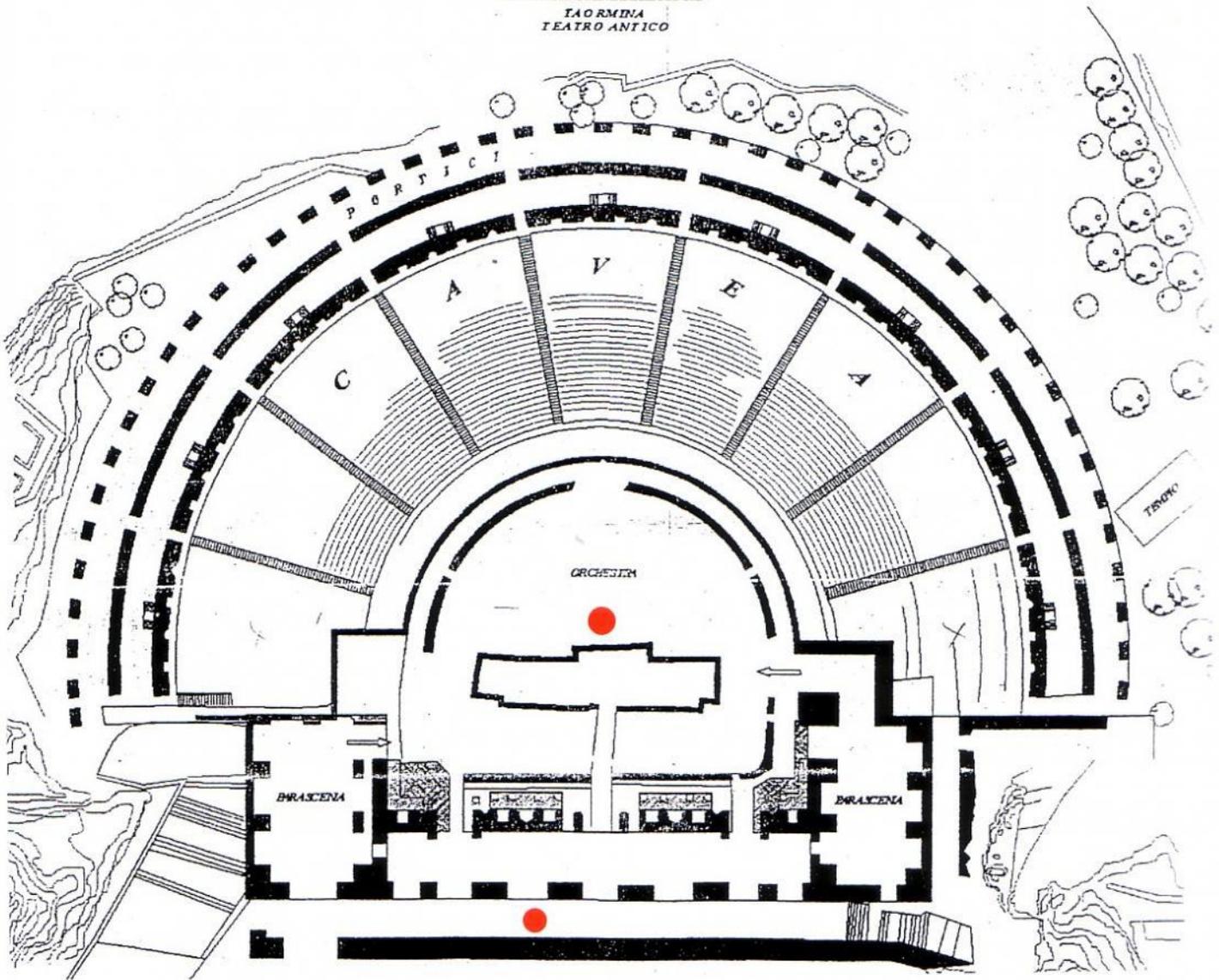


Fig. 2 - Planimetria del teatro (Soprintendenza BB.CCAA.di Messina) in rosso il luogo dei sondaggi

## RISULTATI

### Polline

I campioni hanno rivelato concentrazioni polliniche basse o molto basse, anche inferiori a 100 pollini/g. Lo stato dei granuli è variabile, da cattivo a buono. In taluni campioni è sospetta la presenza di due assemblaggi pollinici di età diversa. Questo aspetto è oggetto di un esame accurato, in corso, sullo stato di conservazione dei granuli. E' stato comunque possibile isolare, in tutti i campioni con sufficiente sicurezza, assemblaggi di pollini giudicati coevi tra loro e utili per la ricostruzione archeovegetazionale.

In ambedue i sondaggi gli spettri pollinici delineano un paesaggio vegetale piuttosto deforestato, con episodi di maggior forestazione, presenti solo nei campioni al fondo delle sequenze. Tra le piante legnose sono pre-

senti sia piante probabilmente coltivate: Olivo-*Olea*, Vite-*Vitis*, Noce-*Juglans*, Castagno-*Castanea*, sia piante della vegetazione spontanea: Leccio-*Quercus ilex*, Cisto-*Cistus*, Querce-*Quercus* decidue, Carpino orientale-*Carpinus orientalis*, Betulla-*Betula*, Pino-*Pinus*, Ginepro-*Juniperus*, Platano-*Platanus*, Frassino-*Fraxinus*. *Cedrus* potrebbe essere coltivato o connesso ad apporti da lunga distanza. La vegetazione erbacea è in genere prevalente ed è caratterizzata dalle Cichoroidae, presenti con varie specie. Seguono le Gramineae, soprattutto specie spontanee e alcuni granuli attribuibili a cereali (orzo-*Hordeum*, frumento-*Triticum*, panicco-*Panicum*), Cruciferae, Labiatae, Leguminosae, Chenopodiaceae, malva-*Malva*, ortica-*Urtica* ecc. In alcuni campioni sono presenti piante acquatiche e telmatofite, quali ninfea-*Nymphaea*, liscia-*Typha* e cannuccia di palude-*Phragmites*, che suggeriscono la presenza di specchi di acqua in prossimità del sito.



Fig. 3 - Sondaggio interno: carotatore



Fig. 4 - Sondaggio esterno: carota appena estratta

### Carboni

I campioni esaminati hanno rivelato variazioni nella concentrazione delle particelle carboniose, con picchi evidenti sia nella classe di maggiore taglia, indicante incendi locali, che nelle due classi inferiori, indicanti incendi a maggior distanza.

### CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

A questo stadio delle analisi, le considerazioni che si possono fare sono prevalentemente previsioni. Si prevede di poter ottenere una ricostruzione archeo-floristico/vegetazionale esauriente, terminando l'analisi dei presenti campioni e integrandoli con altri sia per infittire le sequenze polliniche nei tratti indisturbati delle stratigrafie, ottenendo così una migliore risoluzione temporale, sia per stimare, con l'esame di campioni di superficie che danno l'immagine pollinica della vegetazione di oggi, quanto il paesaggio vegetale attuale sia diverso da quelli del passato. I risultati della ricerca, nei suoi stadi di avanzamento, saranno consultabili anche sul sito web del laboratorio di Palinologia e Paleobotanica di Modena ([www.palinopaleobot.unimo.it](http://www.palinopaleobot.unimo.it)) ed in quello del Centro Restauro ([www.centrorestauro.it](http://www.centrorestauro.it))

Si può aggiungere, in merito alla sostanza della ricerca, che già da questi primi dati sembrano essersi verificati mutamenti significativi nel paesaggio vegetale testimoniato nelle sequenze polliniche: ad esempio si ha una maggiore testimonianza di latifoglie decidue

nei campioni inferiori e una maggior diffusione di coltivazioni (cereali e olivo) e prati/pascoli nella parte superiore delle sequenze. In queste trasformazioni hanno avuto un ruolo gli incendi, anche locali. Un altro aspetto su cui forse si potranno fornire informazioni attraverso un esame accurato dello stato di conservazione dei granuli, è la traccia pollinica di disturbi nella biostratigrafia evidenziata da mescolanze di pollini non coevi. Questa traccia potrebbe essere testimonianza di eventi naturali, ad esempio il terremoto a cui è ascritta la distruzione del Teatro, o antropici, quali riempimenti con materiali di riporto di avvallamenti

presenti sul sito in momenti vari della storia del Teatro (Bernabò Brea, 2000).

#### BIBLIOGRAFIA

- L. BERNABÒ BREA (2000), *Restauri del teatro antico di Taormina*, in Quaderni di archeologia, Università di Messina, 1,1.
- R. CARAMIELLO, D. AROBBA (2003), *Manuale di archeobotanica. Metodiche di ricerca e studio*, Franco Angeli, Milano.
- G.W. DIMBLEBY (1985), *The Palynology of Archaeological Sites*, London.
- K. FAEGRI, J. IVERSEN (1989), *Textbook of Pollen Analysis*, 4<sup>th</sup> edn, by Faegri & Kaland PE, Krzywinski K. Wiley, Chichester.
- A. HOROWITZ (1992), *Palynology of Arid Lands*, Amsterdam.
- P.D. MOORE, J.A. WEBB, M.E. COLLINSON (1991), *Pollen Analysis*, Blackwell Scientific publications.

*A cura di:* Laboratorio di Bioarcheologia del Centro Regionale Progettazione e Restauro  
*Responsabile:* Francesca Terranova  
*Collaboratore:* Arcangela Valenti  
Laboratorio di Palinologia e Paleobotanica, Università di Modena e Reggio Emilia  
*Responsabile scientifico:* Carla Alberta Accorsi  
*Prof. Associato:* Marta Bandini Mozzanti  
*Ricercatori:* Anna Maria Mercuri, Giuliana Trvisan Grandi  
*Tecnico:* Paola Torri  
*Collaboratrice:* Giovanna Bosi

# Monitoraggio dei consorzi microbici e conservazione di Beni Culturali

FRANCO PALLA, LETIZIA ANELLO, SANDRA MARINEO

Il teatro di Taormina giunto dal III sec. a.C. ai nostri giorni è il risultato di adattamenti strutturali, lunghe fasi di abbandono con vasti crolli causati anche da calamità naturali, interventi di restauro, e dell'attuale utilizzazione per svariate manifestazioni con un'elevata presenza di visitatori. Da queste considerazioni e da un'attenta analisi macroscopica si evince che il monumento risulta ad alto rischio antropico, strutturale, oltre che ambientale, riconducibile a processi di tipo fisico, chimico e biologico. Nell'ambito di questo studio è stato operato il prelievo dei campioni dalle cinque aree ritenute rappresentative, sia per i materiali costitutivi sia per le diverse tipologie di degrado: A) parascenia a destra della scena, B) parascenia destro con orientamento a Sud-Ovest, C) crepidoma del prospetto monumentale con orientamento Nord-Ovest; D) colonnato monumentale del primo ordine a destra; E) struttura muraria dell'edificio scenico.

In questa fase, la nostra attenzione è stata rivolta: al crepidoma, sito (A), che nel rivestimento della parte basale presenta delle porzioni di lastre di marmo con evidenti zone pigmentate; al colonnato monumentale, sito (B), le cui colonne a fusto liscio presentano diverse alterazioni del substrato come fratture, sfaldature, annerimenti e decoesione superficiale; alla malta e al mattone in cotto di epoca romana, sito (E).

Tra i microrganismi causa di degrado di un manufatto artistico ritroviamo quelli denominati *biodeteriogeni*, capaci di colonizzare un substrato e innescare i processi di *biodeterioramento*, che contribuiscono ad aggravare i fenomeni di degrado imputabili a fattori di tipo chimico e fisico. In funzione del tipo di metabolismo adottato, i microrganismi si classificano in autotrofi ed eterotrofi. I primi sono capaci di sintetizzare i composti organici necessari al loro metabolismo a partire dall'anidride carbonica dell'aria, per mezzo dell'energia luminosa (fotoautotrofi) o dell'energia chimica che si sviluppa in particolari reazioni di ossido-riduzione (chemioautotrofi). I secondi invece utilizzano sostanze organiche già disponibili, poiché sono incapaci di sintetizzarle. I biodeteriogeni sia autotrofi (solfosidanti e nitrificanti) sia eterotrofi sono in grado di deteriorare la pietra, per via chimica attraverso processi di solubilizzazione microbica, sempre accompagnati

da acidificazione del mezzo e perdita di peso del materiale lapideo. Se sul substrato è presente materiale organico, anche i batteri eterotrofi possono giocare un ruolo importante nel degrado dei lapidei agendo soprattutto attraverso la produzione di sostanze chelanti, acidi organici ed inorganici, alcali.

## MATERIALI E METODI

### Metodologie di campionamento

I prelievi sono stati eseguiti in superficie mediante tamponi sterili, inumiditi con soluzione di NaCl-Tween, (0.9% Cloruro di sodio in presenza di 0.02% Tween-80, polyoxyethylene sorbitan monooleate), o mediante piastre a contatto. Quando possibile, sono state prelevate minime quantità di materiale lapideo.

### Semina e Colture

Nel caso in cui il prelievo è stato effettuato mediante tamponi umidi, la soluzione in cui era stato immerso il tampone è stata diluita (1:10) con soluzione fisiologica sterile, e un volume pari a 2,5 ml è stato utilizzato per inoculare una piastra di Nutrient Agar. Le piastre sono state quindi incubate a 30° C per almeno 16 ore. Terreno di coltura = Nutrient Agar costituito da brodo di coltura (Nutrient broth - Difco 25 g/ litro) con l'aggiunta di 2% Agar - Difco. Dopo controllo del pH=7,2, il terreno di coltura è stato sterilizzato in autoclave a 121° C (1Atm di pressione) per 20 min. Se il prelievo è stato eseguito con piastre a contatto contenenti Nutrient Agar, queste sono state direttamente incubate a 30° C per 16 ore.

### Estrazione del DNA genomico batterico

DIRETTAMENTE DA CAMPIONE LAPIDEO. 0.2-0.5 g di campione è stato immerso in 500 microlitri di 1XTE (10 mM Tris-HCl pH 8.0/ 1mM EDTA) e sottoposti a tre cicli di congelamento (-80°C) e scongelamento (+55°C). Il volume della reazione è stato quindi portato a 1.4 ml e si è proceduto per l'estrazione con il kit QIAmp DNA stool, seguendo il protocollo fornito dalla



Fig. 1 – Inoculo di piastre Nutrient Agar da tamponi

casa produttrice Qiagen.

**DA COLONIE BATTERICHE.** Una singola colonia è stata prelevata, mediante anse sterili e disciolta in 100 microlitri di 1XTE (10 mM Tris-HCl pH 8.0/ 1mM EDTA) incubata 3 minuti a 90°C e utilizzata direttamente nelle reazioni di PCR.

### Elettroforesi su gel di agarosio

La concentrazione di agarosio (0.8-2%) e le modalità di migrazione sono state scelte in base alle dimensioni delle molecole di DNA da analizzare, utilizzando come tampone di scorrimento 1X TBE (0.090M Trisborato/0.002 M EDTA).

### Reazione a Catena della Polimerasi (PCR)

Seguendo i protocolli elaborati nel nostro laboratorio, piccole aliquote di DNA genomico batterico sono state utilizzate come molecole stampo nelle reazioni di PCR, scegliendo le condizioni di reazione e gli inneschi molecolari specifici per ciascun genere o specie batterica ricercata.

### RISULTATI

L'osservazione diretta al microscopio ottico, come mostrato in Fig. 1, ha evidenziato la crescita di colonie batteriche con diversa morfologia e pigmentazione, oltre a funghi (fig. 1).

La caratterizzazione morfologica sarà completata dall'analisi al microscopio elettronico a scansione, SEM Leica Cambridge-Leo 420, attualmente è in corso.

Per l'analisi molecolare il DNA batterico, ottenuto sia dai campioni lapidei sia dalle singole colonie, è stato utilizzato come molecola stampo per le reazioni di amplificazione *in vitro* (PCR). Le sequenze bersaglio dei genomi batterici sono state amplificate scegliendo le condizioni di reazione e gli inneschi molecolari specifici per ciascun genere o specie batterica ricercata. I

prodotti dell'amplificazione delle porzioni di DNA bersaglio (rDNA 16S), sono stati separati mediante elettroforesi su gel di agarosio al 2%, e ricorrendo ad un opportuni marcatori di peso molecolare è stato possibile determinare le dimensioni dei frammenti di DNA ottenuti.

La determinazione della sequenza nucleotidica dei frammenti del gene il 16S rDNA mediante la metodologia di Sanger, e l'analisi dell'omologia con le analoghe porzioni di genoma delle specie batteriche depositate nelle Banche dati NCBI-NHI—USA e EMBL—Germania, ha permesso di identificare le diverse specie batteriche presenti nei siti analizzati.

In Tabella 1 sono riassunti i risultati dell'analisi morfologica e molecolare dei campioni prelevati dalle aree (A), (B) ed (E) del teatro.

I risultati, seppure preliminari, mostrano la presenza di almeno quattro differenti generi batterici nelle aree di campionatura prese in esame, che la caratterizzazione molecolare ha permesso di classificare come *Arthrobacter*, *Acinetobacter*, *Micrococcus*, *Pseudomonas*. Dalla letteratura si evince che questi generi batterici sono in grado di produrre diverse tipologie di degrado delle opere d'arte come pigmentazione o perdita di colore, efflorescenze, patine.

Batteri oligotrofici facoltativi, come *Arthrobacter* sono in grado di resistere anche per lungo tempo a condizioni ambientali sfavorevoli, mentre batteri appartenenti al genere *Acinetobacter*, sono in grado di produrre aggregati cristallini di carbonato e fosfato, che contribuiscono ai processi di degrado. Batteri del genere *Micrococcus* sono in grado di pigmentare le superfici marmoree.

Infine, è risultato evidente che i batteri non sono gli unici microrganismi evidenziati nei campioni analizzati, ma si deve senz'altro tenere conto delle diverse specie di funghi e muffe che compongono i consorzi microbici presenti.

Sito	colonie Incolori	colonie Pigmentate	Direttamente dai campioni lapidei
A	PCR/Sequenziamento= Acinetobacter	PCR = Arthrobacter Micrococcus	
B	PCR/Sequenziamento= Arthrobacter	PCR/Sequenziamento= Arthrobacter	PCR=Arthrobacter
E	D9 (prima colonna da sin.) PCR = Arthrobacter Acinetobacter Pseudomonas	D12 (terza colonna da sin.)	

Tab. 1

## CONCLUSIONI

Per l'analisi della colonizzazione microbica ci siamo avvalsi delle tecniche classiche di microbiologia (colture *in vitro*) e delle tecniche molecolari che forniscono risultati più completi e affidabili. Le tecniche di biologia molecolare utilizzate in questo lavoro sono solo alcune di quelle potenzialmente applicabili nel campo dei beni culturali, e si sono basate sull'analisi delle sequenze specie-specifiche del DNA ribosomale (rDNA 16S) di genomi batterici. Per la caratterizzazione dei generi e delle specie batteriche che colonizzano un'opera d'arte è possibile ricorrere ad altre tecniche che prevedono l'analisi mediante DGGE (*Denaturing Gradient Gel Electrophoresis*), SSCP (*Single Strand Conformation Polymorphism*), FISH (*Fluorescent In Situ Hybridization*), o la costruzione di genoteche di cloni del rDNA 16S batterico. Anche lo studio della molecole dell' RNA (Genomica funzionale) e delle Proteine (Proteomica) che caratterizzano le popolazioni batteriche dal punto di vista funzionale, potranno fornire delle strategie sempre più precise applicabili nel campo dei beni culturali. Inoltre, in questi ultimi anni un notevole apporto alle biotecnologie è stato fornito dalla Bioinformatica che ha permesso la realizzazione delle Banche dati internazionali ed ha fornito i software e la metodologia per consultare quest'enorme numero di informazioni sul DNA genomico di numerosi microrganismi, permettendo la realizzazione degli allineamenti genomici e numerosi studi di filogenesi.

In conclusione possiamo affermare che rispetto alle classiche metodologie microbiologiche di coltura, le biotecnologie molecolari forniscono una visione più realistica delle popolazioni microbiche presenti in un'opera d'arte, permettendo la rivelazione anche delle specie che non possono essere identificate mediante colture *in vitro*; e possono essere applicate anche quan-

do il degrado non è ancora visibile. Sotto questa luce, le biotecnologie molecolari si rivelano essenziali anche per una diagnosi preventiva del processo di biodeterioramento indotto da microrganismi ancor prima che il degrado del substrato sia evidente e l'eventuale danno irreparabile.

Questo studio mostra, in modo non certamente esaustivo, come le biotecnologie molecolari utilizzate devono essere considerate come strumento di analisi nel progetto di manutenzione, conservazione e restauro del Teatro di Taormina, in quanto sono in grado di indicare in maniera puntuale e specifica i generi batterici che colonizzano questo particolare sito.

## RINGRAZIAMENTI

Particolari ringraziamenti vanno al Centro Regionale per la Progettazione e il Restauro della Regione Siciliana, per la continua e proficua collaborazione e per avere fornito i campioni utilizzati in questo studio.

## BIBLIOGRAFIA

- Carta del Rischio del Patrimonio Culturale e Ambientale I Quaderni di Palazzo Montalto n.2, CRPR Sicilia.
- Ward, D.M, Weller, R. & Bateson, M.M. 1990. 16S rRNA sequences reveal numerous uncultured microorganisms in a natural community. *Nature* 345: 63-65.
- Degrange, V., & Bardin, R. 1995 Detection and counting *Nitrobacter* population in soil by PCR. *Appl Environ Microbiol* 61: 2093-2098.
- Federico, C., Russo, R., Anello, L., & Palla, F. 1999. Biotechnologies tools to test biodeteriogens in stone specimens. In *Of Microbes and Art. The Role of Microbial Communities in the Degradation and Protection of Cultural Heritage*: 82-84. Florence: CNR.
- Gonzalez J.M. 2003. Overview on existing molecular techniques with potential interest in cultural heritage. C. Saiz-Jimenez (ed), *Molecular Biology and Cultural Heritage*: 3-13. Lisse/Abingdon/Exton (PA)/Tokyo: A.A: Balkema Publishers.
- Smalla, K., Cresswell, N., Mendoca-Hagler, L.C., Wolters, A. & van Elsas, J.D. 1993. Rapid DNA extraction protocol from soil for polymerase chain reaction-mediated amplification. *J Appl Bacteriol* 74: 78-85.
- Palla, F., Federico C., Russo R. & Anello L. 2002. Identification of *Nocardia restricta* in biodegraded sandstone monuments by PCR and nested-PCR DNA amplification. *FEMS Microbiol Ecol* 39: 85-89.
- Gurtner C., Lubitz, W. & Rölleke, S. 1999. Advanced strategies in the identification of potential biodeteriorating microorganisms by molecular means. In *Of Microbes and Art. The Role of Microbial Communities in the Degradation and Protection of Cultural Heritage*: 32-34. Florence: CNR.

- Sambrook, J., Fritsch, E. & Maniatis, T. 1989. *Molecular Cloning: Laboratory Manual*. Cold Spring Harbor: Cold Spring Harbor Laboratory Press.
- Weinburg, W.G., Barns, S.M., Pelletier, D.A. & Lane, D.J. 1991. 16S ribosomal DNA amplification for phylogenetic study. *J. Bacteriol* 173: 697-703.
- Palla F., Anello L., Pecorella S., Russo R. & Damiani F. 2003. Characterisation of bacterial communities on stone monuments by molecular biology tools. C. Saiz-Jimenez (ed), *Molecular Biology and Cultural Heritage*: 115-118. Lisse/Abingdon/Exton (PA)/Tokyo: A.A: Balkema Publishers.
- Southern, E.M. 1975. Detection of specific sequences among DNA fragments separated by gel electrophoresis. *J Mol Biol* 98: 503
- Laiz L., Pinar G, Lubitz W. & Saiz-Jimenez C. 2003. The colonisation of building by microorganisms as revealed by culturing and molecular methods. C. Saiz-Jimenez (ed), *Molecular Biology and Cultural Heritage*: 23-28. Lisse/Abingdon/Exton (PA)/Tokyo: A.A: Balkema Publishers
- Urzi C., De Leo F., Donato P. & La Cono V. 2003. Multiple approach to study the structure and diversity of microbial communities colonizing artistic surface. C. Saiz-Jimenez (ed), *Molecular Biology and Cultural Heritage*: 187-193. Lisse/Abingdon/Exton (PA)/Tokyo: A.A: Balkema Publishers
- Strauss, E.J. & Falkow. S. 1997. Microbial pathogenesis: Genomics and beyond. *Science* 276: 707-712.
- Luscombe N.M., Greenbaum D. & Gerstein M. 2001. What is bioinformatics? A proposed definition and overview of the field. *Meth Inf Med* 40: 346-358
- Sanchez-Moral S., Bedoya J., Luque L, Canaveras J.C., Jurado V, Laiz L & Saiz-Jimenez C. 2003. Biomineralization of different crystalline phases by bacteria isolated from catacombs. C. Saiz-Jimenez (ed), *Molecular Biology and Cultural Heritage*: 187-193. Lisse/Abingdon/Exton (PA)/Tokyo: A.A: Balkema Publishers

Ricerche e studi condotti nell'ambito della collaborazione scientifica con il Centro Regionale per la Progettazione e il Restauro di Palermo  
 A cura di: Dipartimento di Scienze botaniche laboratorio Biologia molecolare, Università di Palermo  
 Franco Palla  
 Collaboratori: I.B.I.M., Area Ricerca CNR Palermo  
 Letizia Anello  
 Dipartimento di Biologia Cellulare e dello Sviluppo Università di Palermo  
 Sandra Marineo

# Progetto test esplorativi

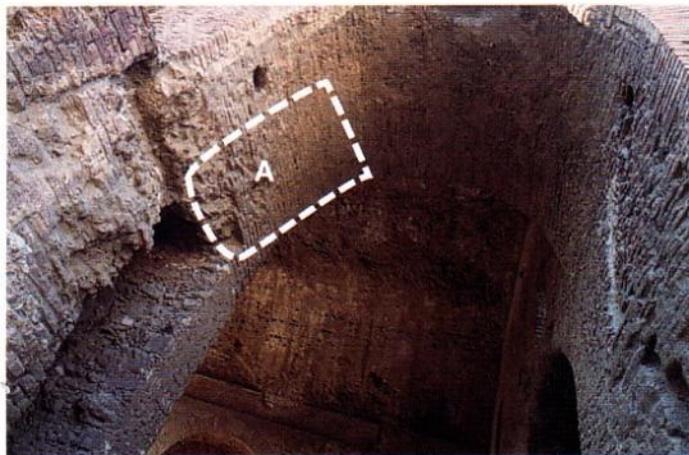
LORELLA PELLEGRINO

La particolare condizione di degrado di questo monumento architettonico, rilevata attraverso una prima analisi macroscopica, ha portato alla progettazione di un'imprescindibile fase propedeutica di conoscenza, mirata alla determinazione delle cause di degrado e delle caratteristiche dei materiali costitutivi nonché al rilevamento dei precedenti interventi restaurativi. Questo primo approccio tecnico-scientifico e filologico, consono alle peculiarità che presenta una così complessa struttura architettonica, ha condotto la scelta delle aree di studio limitandola all'edificio scenico monumentale; significativo perché conserva ancora le tracce delle diverse fasi costruttive sia di epoca greca che romana. Il progetto dello studio pilota prevede n. 5 test analitici diversificati ed individuati su altrettante aree campione ritenute significative e rappresentative del diverso materiale costitutivo, delle diverse tipologie di degrado, anche in funzione del differente orientamento ed esposizione agli agenti atmosferici o di altri deterioranti di origine antropica, da esplorare attraverso test pilota su limitate porzioni di superfici, con l'ausilio di differenziati metodi d'indagine fisico-chimica, biologica e tecnica. Lo specialistico studio analitico avviato, associato alle risultanze delle analisi di laboratorio, permetterà la determinazione di un'ideale tecnologia di intervento finalizzata alla redazione di un progetto di restauro definitivo del manufatto architettonico, teso al recupero e alla tutela dei dati materici e storici che ne connotano e denotano la specificità storico-culturale. La programmazione delle indagini scientifiche sulle aree di studio prevede: sui materiali litici, le *analisi diffrattometriche ed efflorescenza a raggi X*, su malte ed intonaci, le *indagini microscopiche e stereometriche e/o al SEM* e la *ricerca dei sali solubili*, sui laterizi la *caratterizzazione e provenienza dell'argilla* e la *ricerca dei sali solubili*. Le cinque aree campione, riassunte su un grafico in cui oltre alla localizzazione sono rappresentate le diverse fasi costruttive del teatro, sono così articolate: test A di consolidamento, particolarmente interessante poiché mirato all'intercettazione della finitura superficiale e la comprensione della tecnica costruttiva romana; test B C -D di restauro completo, sui quali è prevista l'applicazione di un piano di prove per i trattamenti di pulitura, disinfestazione,

consolidamento, riconfigurazione e protezione; test E di studio conoscitivo, che permetterà di approfondire quesiti, la cui soluzione si prospetta particolarmente complessa per la difficile lettura delle stratificazioni architettoniche succedutesi nel tempo e delle scelte adottate negli interventi di restauro precedenti.

## A -TEST DI CONSOLIDAMENTO

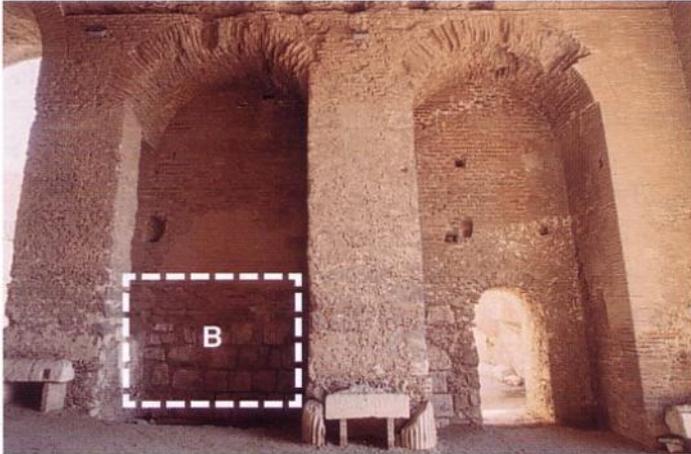
Parascenia a destra della scena. Porta d'ingresso alla scena, con volta a botte nell'intradosso, dove si evidenzia la presenza di una malta con l'impronta di una intelaiatura costituita da materiale leggero (incannucciato). L'area campione selezionata riguarda una porzione localizzata in prossimità del piano d'imposta della volta.



Impronta di uno strato di canne che copriva la centina utilizzata per la costruzione di una volta in muratura (Pompei; foto tratta da "L'arte di costruire presso i Romani - materiali e tecniche", Adam J.P. editore Longanesi, pag. 196).

## B -TEST DI RESTAURO COMPLETO

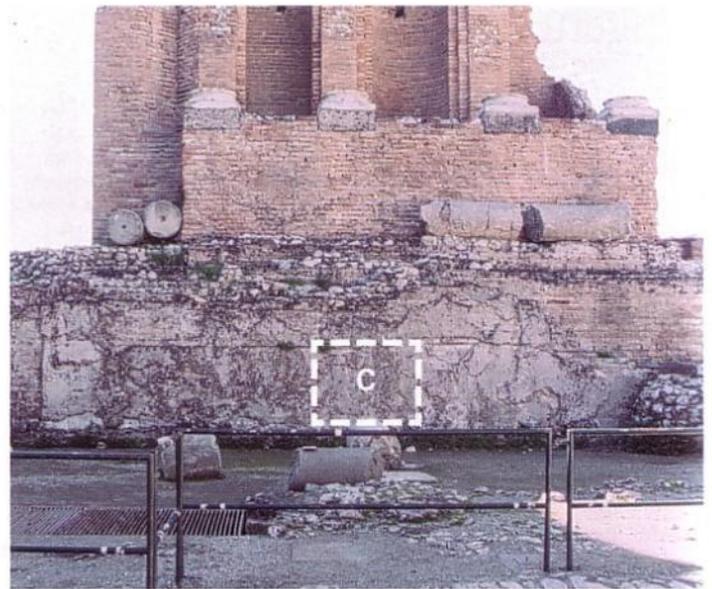
Parascenia destro con orientamento a Sud-Ovest. L'area campione selezionata ricade su muratura portante, in ambiente semiconfinato, risalente all'impianto più antico del III sec. a.C., costituita da conci litici in pietra calcarea compatta, squadrati ed allettati con ricorsi in malta. Trattasi di fronte interno di muro perimetrale inglobato all'impianto romano della prima metà del II sec. d.C.



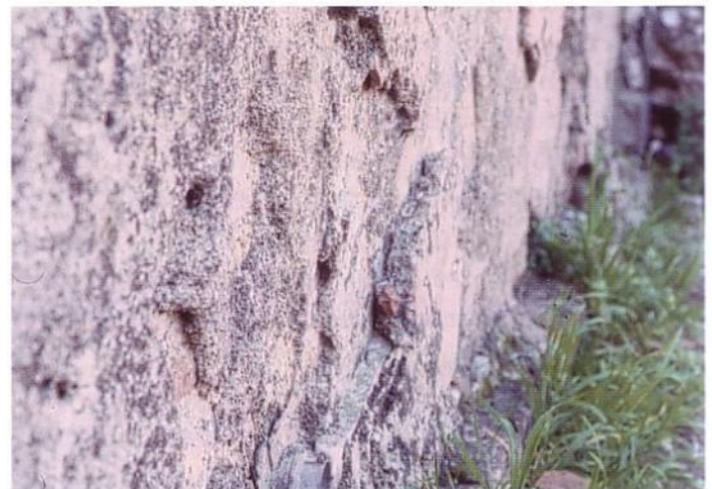
Muratura di stratificazione risalente all'impianto del II sec. d.C. La superficie litica, appartenente all'impianto greco, annerita in modo quasi omogeneo, è compromessa da vistose fratture e scheggiature.

## C -TEST DI RESTAURO COMPLETO

Crepidoma del prospetto monumentale della scena, con orientamento a Nord-Ovest, scarsamente soleggiato ed esposto all'azione deteriorante degli agenti atmosferici. L'area campione selezionata ricade sul fronte murario risalente alla IV fase (II, III sec. d.C.); muratura, con zocchetto lungo il piede, realizzata secondo la tecnica romana in opus lateritium, con lacerti d'intonaco e porzioni di lastre di marmo di rivestimento nella parte basamentale.



Le superfici architettoniche, subiscono traumi fisico-meccanici nelle fasi di movimentazione, montaggio e smontaggio per l'allestimento delle manifestazioni canore.



Lettura stratigrafica dei lacerti di intonaco; in basso, la lastra di marmo parietale è ricoperta da uno strato di intonaco di superfettazione.



La muratura presenta soluzioni di continuità, oltre a vistosi annerimenti diffusi ed il distacco con perdita totale degli strati di intonaco.

## D - TEST DI RESTAURO COMPLETO

Colonnato monumentale del primo ordine a destra della scena composto da cinque colonne, con orientamento a Nord-Ovest ed esposto all'azione deteriorante degli agenti atmosferici. La parte del colonnato presa in esame è formata da quattro colonne a fusto liscio con capitelli Corinzi di marmo bianco microcristallino, tre delle quali poggiano direttamente su un alto stilobate costituito da una muratura in opus testaceum, la quarta, sorretta da un alto plinto costituito da conci squadrati di pietra, poggia sul piano del crepidoma. Le quattro colonne sono ancorate alla muratura retrostante, mediante staffe metalliche, inserite alla base del capitello. Tale sistemazione risale ad un intervento restaurativo del passato. Le aree campione, selezionate su porzioni di materiale litico di diversa natura, rappresentativo delle differenti tipologie di degrado, sono state così articolate:



Colonna n. 1  
Test di pulitura e disinfestazione



Colonna n. 2  
Test di preconsolidamento e rimozione meccanica



Colonna n. 3  
Test di consolidamento corticale e sigillatura



Colonna n. 4  
Test di protezione superficiale

## E - TEST DI STUDIO CONOSCITIVO

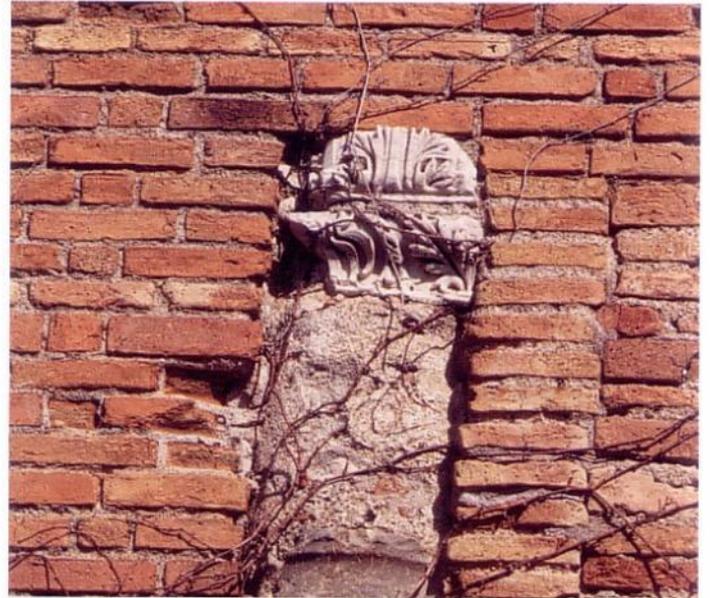
Struttura muraria dell'edificio scenico, risalente all'impianto romano della prima metà del II sec. d.C.; esposto all'azione aggressiva degli agenti atmosferici. La muratura, costruita secondo la tecnica romana in opus caementitium e paramento esterno in opus testaceum, con grandi archi di scarico, ingloba, nella parte basamentale, l'antica muratura in conci di pietra squadrata risalente al primo impianto del III sec. a.C. Tale manufatto rappresenta sul fronte esposto a Nord-Ovest la quinta muraria del prospetto monumentale della scena, ritmato da nicchie, sul fronte esposto a Sud-Est il prospetto retrostante dell'edificio scenico. L'area selezionata comprende una porzione di paramento murario che

presenta particolari peculiarità costituite dall'inglobamento di elementi architettonici che da una prima indagine visiva sembrerebbe arbitrario.



*In basso a sinistra:* assemblaggio anomalo con malta cementizia di un fusto di colonna e di un frammento di cornice.

*In basso a destra:* inglobamento arbitrario nella muratura di due frammenti di colonna e di porzioni di capitello e cornice.



*Laboratorio di Restauro dei manufatti di origine inorganica*

*Responsabile:* Lorella Pellegrino

*Collaboratori:* Daniela Coco, Angela La Placa, Alessandro Longo, Provvidenza Lupo, Rossella Pomilla, Lucia Ventura Bordenca

# Indice

- 5 *Premessa*  
Alessandro Pagano
- 7 *Presentazione*  
Guido Meli - G. Maria Spanò
- 9 *La Carta del Rischio e il progetto pilota del Teatro Antico di Taormina*  
Roberto Garufi
- 15 *Ricerche bibliografiche ed archivistiche sui Teatri antichi di Sicilia. Sintesi della ricerca*  
Rita Di Natale
- 17 *Contributo geologico e geotecnico alla Carta del Rischio*  
F. Cafiso, P. Pratini, U. Piacentini, E. Scalone
- 27 *Appendice A*  
*Documentazione fotografica*
- 35 *Appendice B*  
*Colonne stratigrafiche dei sondaggi con i valori di RQD*
- 41 *Appendice C*  
*Definizione delle caratteristiche delle discontinuità nelle rocce lapidee*
- 45 *Monitoraggio vibrometrico eseguito durante la manifestazione canora Festivalbar 2002*  
Lucio Amato - Giovanni Antonucci  
Vincenzo Calabrese
- 107 *Caratterizzazione dei materiali costitutivi e valutazione del loro stato di degrado*  
Cosimo Di Stefano
- 109 *Caratterizzazione di materiali lapidei*  
Antonio Bartolotta, Stefano Bellia, Mariella Brai, Cinzia Casieri, Francesco De Luca, Paola Fantazzini, Antonella Maccotta, Filippa Morreale, Tiziano Schillaci, Giuseppe Raso
- 113 *Materiali porosi d'interesse per i beni culturali: studio di campioni lapidei*  
Mariella Brai, Mara Camaiti, Cinzia Casieri, Francesco De Luca, Paola Fantazzini, Antonella Maccotta, C. Terenzi
- 117 *Datazione mediante la tecnica della Termoluminescenza*  
Mariella Brai, Giuseppe Raso, Tiziano Schillaci, Antonio Bartolotta
- 119 *Note preliminari sulla caratterizzazione di alcuni materiali*  
G. Rizzo, L. Ercoli, G. Algozzini, B. Megna, F. D'Agostino, M. Parlapiano, M.C. Sunseri
- 129 *Analisi polliniche e microantracologiche al Teatro Antico di Taormina: primi dati*  
Carla Alberta Accorsi, Marta Bandini Mozzanti, Giovanna Bosi, Anna Maria Mercuri, Francesca Terranova, Paola Torri, Giuliana Trevisan Grandi, Arcangela Valenti
- 133 *Monitoraggio dei consorzi microbici e conservazione di Beni Culturali*  
Franco Palla, Letizia Anello, Sandra Marineo
- 137 *Progetto test esplorativi*  
Lorella Pellegrino

Finito di stampare nel mese di ottobre 2004  
presso le Officine Tipografiche Aiello & Provenzano  
Bagheria (Palermo)

Nell'ambito dell'autonomia amministrativa della Regione Siciliana, con competenze esclusive in materia di beni culturali, il *Centro Regionale per la Progettazione e il Restauro* (C.R.P.R.) è l'Istituto di ricerca dell'Assessorato Regionale BB.CC.AA. preposto agli studi ed alle indagini per la conservazione e fruizione sostenibile del patrimonio culturale siciliano, analogamente al ruolo assunto in ambito nazionale dall'Istituto Centrale per il Restauro.

Il C.R.P.R., che gode di autonomia gestionale, svolge la sua attività in collegamento con le Soprintendenze e gli Istituti Centrali dello Stato aventi le stesse attribuzioni.

Tra le sue attività svolge indagini sistematiche sull'influenza dei fattori ambientali ed antropici nei processi di deterioramento e sui mezzi di prevenzione ed inibizione degli effetti; per conservare, restaurare e utilizzare correttamente il patrimonio e tramandare testimonianze di legami culturali.

Le architetture teatrali antiche sono esempi di beni caratterizzanti le identità culturali regionali per i quali l'Istituto ha concentrato in questi ultimi anni la sua attenzione e il suo impegno. Un'attività che nella sua globalità valuta correttezza ed efficacia delle tecniche, storiche e sperimentali, di restauro e mitigazione della vulnerabilità, per indirizzare la definizione dei protocolli conservativi specifici.

