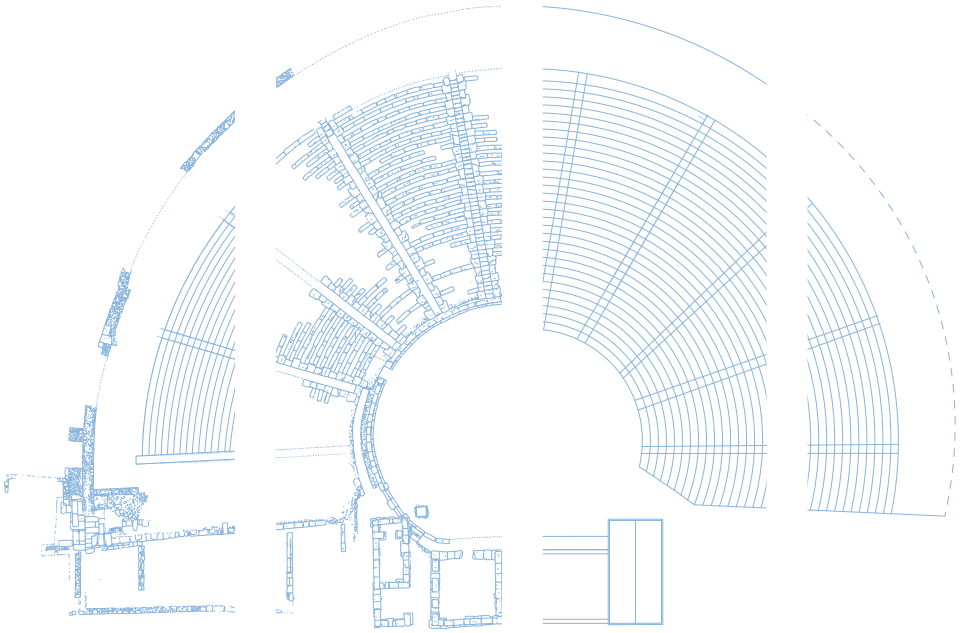
POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in

Architettura per il Restauro e la Valorizzazione del Patrimonio

Tesi di Laurea Magistrale

Il teatro antico di Tindari
ricostruzione virtuale dell'evoluzione acustica



Relatrici
Prof. Louena Shtrepi
Prof. Arianna Astolfi

Candidata
Giulia Benvenuto

Anno Accademico 2019/2020

Ringraziamenti:

Desidero ringraziare le professoresse Shtrepi e Astolfi per il costante supporto in ogni fase di questo lavoro, dalle prime ricerche e simulazioni alla stesura finale. Ringrazio inoltre l'Ente Parco Archeologico di Tindari per avermi fornito alcuni materiali necessari per comprendere meglio lo stato di fatto del teatro e per ricostruirne la storia, vista l'impossibilità di effettuare un sopralluogo a causa dell'emergenza sanitaria. Sono stati fondamentali anche i testi forniti dalla Biblioteca di Storia dell'Arte di Genova e da quella della Soprintendenza Archeologia, Belle Arti e Paesaggio per le province di Sassari, Olbia Tempio e Nuoro di Sassari. Ringrazio inoltre la dott.ssa Bo per il materiale fornitomi a proposito dei teatri di Tindari e Siracusa, utile per l'analisi acustica dello stato di fatto e per i paragoni con altri teatri antichi, che sono stati realizzati grazie alle misurazioni fornitemi anche dai proff. Iannace e Dragonetti.

Ringrazio inoltre la mia famiglia che ha fatto in modo che potessi raggiungere questo obiettivo, con ogni tipo di sostegno.

Abstract

Il tema della valorizzazioni dei teatri antichi negli ultimi anni ha trovato un rinnovato interesse, volto a ricostruire virtualmente l'acustica di spazi grandiosi ormai cancellati dal tempo, di cui sopravvivono attualmente resti spesso parziali. I teatri antichi sono stati costruiti tenendo in considerazione una serie di esigenze dello spettatore e dell'attore, che hanno portato a determinare equazioni necessarie alla progettazione ottimale di questi spazi, un esempio ne è la stima dell'inclinazione limite che la cavea può avere, in modo da permettere una visione e un ascolto agevole. Negli ultimi tempi è stato infatti ripreso lo studio dei teatri antichi, un esempio sono le 10 leggi matematiche che ne regolano la progettazione individuate da François Canac (1886- 1969) intorno alla metà del secolo scorso: anche recentemente sono state condotte diverse ricerche scientifiche su questo tema in diversi paesi europei, sfruttando inoltre il progresso tecnologico. L'obiettivo di questa tesi è ripercorrere la storia finora conosciuta del teatro di Tindari, e ricostruire l'acustica che questo offriva ai suoi spettatori, sia quando lo spettacolo era composto in prevalenza da dialoghi parlati, sia quando invece venivano proposti brani musicali. Il teatro infatti non è solo un edificio che svolge la funzione di ospitare gli attori e il pubblico, ma svolge un ruolo attivo nella propagazione dell'acustica passiva. Per ottenere questo risultato è stato necessario documentarsi sui requisiti dell'acustica in base alla norma ISO 3382-1:2009, analizzare a fondo le misurazioni e simulazioni già effettuate su questo caso studio, e successivamente dopo diversi tentativi, trovare la giusta calibrazione del modello virtuale che permettesse di avvicinarsi di più in termini di tempo di riverberazione, robustezza e chiarezza alle misurazioni acustiche effettuate, in modo da soddisfare per T20 e G i valori di Just Noticeable Difference determinati dalla normativa. Una volta ottenuto il modello di simulazione dello stato di conservazione nel 2015, l'anno a cui le misurazioni fanno riferimento, è stato possibile simulare anche le condizioni del passato apportando modifiche alla geometria e alla disposizione dei materiali a seconda delle variazioni necessarie. Questo tipo di ricerca è stata svolta in passato a livello europeo, ad esempio per progetto ERATO, e i dati raccolti sono stati poi presentati a diverse conferenze sull'acustica dei teatri antichi. È stato perciò possibile confrontare i dati acquisiti dalle simulazioni con alcuni di quelli trattati in questo tipo di incontri. I dati ottenuti dalle simulazioni delle diverse epoche del teatro di Tindari sono stati poi utilizzati per realizzare un tour virtuale online, in modo da mostrare in maniera più chiara le differenze percettive tra i diversi file audio ottenuti dopo le convoluzioni.

Indice **Pag.**

Capitolo 1: Introduzione: la percezione del suono 1
1.1 Architettura e corpo umano 1
1.1.1 L'emissione vocale 3
1.1.2 La struttura anatomica dell'orecchio e i requisiti fisici 5
1.2Origine e funzione del teatro 7
1.2.1Struttura e terminologia 8

Capitolo 2: Acustica Geometrica 9
2.1 Le grandezze fisiche per la valutazione dell'acustica 9
2.1.1 Le leggi di Canac 11

Capitolo 3 I progetti europei 18
3.1 Progetto JPI CH 18
3.2 ERATO 19
3.2.1 I parametri considerati 19
3.2.2 Le misurazioni nei teatri all'aperto 20
3.2.3 Le misurazioni negli Odea 21
3.3: La conferenza di Patrasso 21
3.3.1 Le Origini e le caratteristiche acustiche 22
3.3.2 Lo sviluppo della skené 23
3.3.3 La conoscenza dell'acustica in antichità: Vitruvio 23
3.3.4 Il rumore di fondo in 20 casi studio 25
3.3.5 Le condizioni attuali e le ipotesi di riuso 27
3.3.6 I casi presentati alla conferenza 28
3.4: La norma ISO 3382-1:2009 29
3.5: Il progetto ATHENA 30
3.6: La Carta di Siracusa 33

Capitolo 4: Il Teatro di Tindari 34
4.1 Inquadramento territoriale e storico 34
4.1.1 Descrizione del teatro attuale 36
4.1.2 Gli scavi nell'area archeologica: le fasi storiche del teatro 36
4.2 Materiali attualmente presenti 49
4.2.1 Pietra arenaria 49
4.2.2 Legno 50
4.2.3 Laterizio 52

Capitolo 5: Le analisi già svolte sul Teatro di Tindari 53
5.1 International Congress on Sound and Vibration ICSV23 53
5.1.1 Analisi Geometrica 54
5.2 Misurazioni in situ 55
5.3 Simulazioni 59

Capitolo 6: La ricostruzione del passato 64
6.1 La simulazione dell'acustica del teatro di Tindari nel 2015 64
6.1.1 La calibrazione del modello 65
6.1.2 I risultati e il confronto con i dati misurati 70
6.1.3 La simulazione del teatro occupato 75
6.2 La progressione acustica del teatro di Tindari nel tempo 78
6.3 Il confronto con altri teatri antichi: i valori misurati 84
6.3.1 Misurazioni: Epoca greca - V - IV secolo a.C 85
6.3.2 Misurazioni: Epoca ellenistica - III secolo a.C 89
6.3.3 Misurazioni: Epoca romana - I secolo a.C - II secolo d.C. 91
6.4 Il confronto con i teatri simulati di Benevento e Siracusa 100
6.4.1 Simulazioni: Epoca greca - IV secolo a.C 101
6.4.2 Simulazioni: Epoca ellenistica - III secolo a.C 104
6.4.3 Simulazioni: Epoca romana - II secolo a.C - II secolo d.C 107
6.5 Il confronto con i Teatri simulati per il progetto ERATO 110

Capitolo 7: Auralizzazioni 113
7.1 Impostazione dei modelli di calcolo 113
7.2 Il tour virtuale 117
7.3 Conclusioni 119

Capitolo 1

Introduzione: la percezione del suono

1.1 Architettura e corpo umano

Il concetto di architettura come scienza legata all'anatomia dell'uomo influenza la progettazione in maniera cosciente a partire dal Rinascimento, tuttavia il corpo umano e il sistema proporzionale e modulare ad esso collegato, è il primo codice linguistico su cui anche le civiltà più antiche hanno costruito la grammatica dei loro manufatti. A partire da Platone e Aristotele, rispettivamente IV e III secolo a.C, il corpo e l'anima venivano considerati un'entità unitaria, e l'anima si pensava fosse collegata al cosmo; in questo contesto culturale il tema dell'esistenza umana è strettamente collegata al corpo, denotando un'affinità tra realtà umana, corporea e sensibile. Date tali condizioni, si considera il corpo umano come manifestazione della realtà globale, concetto che in epoca medievale verrà espresso con la formula *mundus minor exemplum est, maiores mundi odine.*

Nel pensiero aristotelico il corpo viene considerato come indissolubilmente legato al proprio spazio, e questo è inserito all'interno di una struttura cosmica unificata. Presupponendo la reciprocità tra luogo e corpo, ne deriva il concetto che la disposizione dei luoghi nel cosmo deve corrispondere a quella dei corpi e degli oggetti, e viceversa.

Tuttavia secondo le conoscenze attuali, è a partire dalla civiltà egizia che il corpo umano viene utilizzato come unità di misura per tutto ciò che è misurabile. Siccome tutto ciò che esiste è misurabile attraverso il corpo, questo diventa lo strumento fondamentale per il dimensionamento e la progettazione da secoli.

La concezione allegorica del corpo umano come codice funzionale alla rappresentazione dell'architettura si può trovare descritto da Vitruvio all'interno del racconto sulla nascita degli ordini architettonici: ciò che permette un collegamento più saldo tra l'anatomia e l'architettura è la proporzione. Il rapporto tra Dio, uomo e cosmo anche nei secoli seguenti è stato il tema centrale delle ricerche scientifiche, filosofiche e artistiche e si è cercato di potenziare sempre più la conoscenza di un campo cercando poi l'analogia che avrebbe permesso di estenderla agli altri; ciò è possibile perchè l'uomo è un microcosmo all'interno del mondo, in questo senso si può considerarlo *misura di tutte le cose* costruite per l'uomo. La proporzione tuttavia non deve essere solo visiva, ad esempio non deve solo riprendere la distribuzione delle funzioni seguendo le proporzioni del corpo umano, come accadeva per le prime ipotesi di Francesco di Giorgio Martini in merito al *corpo città, corpo piazza* e *corpo edificio,* dove a partire dal disegno di un corpo umano proporzionato era possibile ricavare un esempio progettuale di città, piazza o edificio. La proporzione deve inoltre rispettare determinati rapporti che derivano dalla misurazione dei componenti del corpo umano e delle sue potenzialità.

Dopo la diffusione delle unità di misura standardizzate è stato possibile dal XVIII secolo determinare esattamente le misure per cui un'abitazione risulta proporzionata al corpo e ai suoi movimenti convenzionali nello spazio. Queste misure inoltre non sono applicabili solo all'abitazione, ma anche ai luoghi pubblici; in generale è necessario analizzare quale funzione principale svolge il luogo in questione, quanti utenti può ospitare e quali sono le esigenze legate agli spostamenti delle persone che lo occupano in quel momento.

Approfondendo la tipologia architettonica dei teatri antichi come costruzioni per amplificare il suono in modo passivo è possibile notare che i costruttori avessero preso in considerazione la funzione principale che questo doveva svolgere e lo hanno dimensionato in base al numero massimo di spettatori che possono sentire e vedere con chiarezza l'attore che si trova nell'*orchestra*. I teatri antichi greci e successivamente romani nascono con l'obiettivo di riunire un'assemblea cittadina per lo svolgimento di un dibattito o uno spettacolo teatrale: la progettazione della struttura deve sfruttare al massimo la geometria, per permettere un ascolto gradevole anche nelle file più lontane con il minore sforzo vocale possibile. Attraverso questa struttura l'uomo è in grado di amplificare la propria voce e può plasmarla in modo da trasmettere tutte le sfumature di intensità e tono necessarie a veicolare il messaggio voluto. È possibile paragonarlo ad un meccanismo all'interno del quale l'uomo stesso diventa un ingranaggio funzionale ed essenziale, poichè senza l'uomo il solo manufatto non può produrre alcun suono. Allo stesso tempo l'essere umano non è solo un componente, ma è il fine ultimo dell'utilizzo di questa tipologia di struttura, l'utente per il quale la struttura è stata costruita in modi che ne sfrutti il funzionamento tramite la propria voce, che verrà amplificata dal teatro perchè questa possa raggiungere più persone possibili.

La ratio alla base della progettazione e costruzione dei teatri antichi viene descritta per la prima volta da Vitruvio nel quinto libro dell'opera *De Architectura* dove viene determinata la posizione ideale rispetto all'orientamento del Sole e dopo aver analizzato la tipologia di suoni emessi dal parlato, vengono forniti alcuni suggerimenti per la progettazione in modo da aumentare la chiarezza, e ridurre il tempo di riverberazione nelle frequenze centrali: questo argomento verrà trattato nello specifico nel paragrafo 3.3.3.

Dagli studi pubblicati da Canac all'inizio del XX secolo in merito ai teatri antichi emerge che queste strutture fossero state costruite in base ad alcune regole non solo relative all'acustica, ma anche alla visibilità; ad esempio la proporzione che regola l'angolo d'inclinazione della cavea consente ad ogni spettatore di vedere gli attori nell'orchestra senza essere ostacolato visivamente, e anche acusticamente, dallo spettatore seduto nella fila seguente: sono state prese in considerazione le dimensioni medie del corpo umano di una persona in posizione seduta in modo da ricavare un angolo minimo di inclinazione del terreno su cui sono addossate le sedute come meglio approfondito nel paragrafo 2.1.1.

1.1.1 L'emissione vocale

Viene definito *fonazione* il processo con il quale le corde vocali agiscono da trasduttore energetico, poichè trasformano il potere aerodinamico generato dalla muscolatura addominale e dal diaframma in energia acustica emessa poi dalla bocca. La chiave di questo processo è la trasformazione dell'energia, e questo passaggio avviene primariamente nella *glottide* la parte superiore della laringe posta tra le corde vocali. L'aria è il mezzo di trasmissione del suono e la relazione che intercorre tra lo sforzo con cui questa viene spinta e il suono emesso fa parte del cosiddetto sistema fonatorio. Il fatto che la vibrazione delle corde sia essenziale per produrre un suono vocalico è noto dal 1741, a seguito di ciò sono nate diverse teorie su come possa avvenire questo fenomeno: attualmente l'ipotesi più accreditata viene definita *Mioelastica Aeroodinamica*.

Questa teoria afferma il principio che l'energia aerodinamica generata dai polmoni in fase espiratoria, mantenendo la glottide chiusa, dà origine nella regione *sottoglottica* (quella sotto le corde vocali) ad una pressione in grado di vincere la resistenza di chiusura dei muscoli (detta *componente mioelastica*) con conseguente apertura della glottide: in seguito a ciò diminuisce la pressione *sottoglottica* e prevale la forza necessaria all'adduzione dei muscoli necessari alla chiusura, e il flusso d'aria attraverso l'apertura generatasi determina, per l'effetto Bernoulli, una spinta contro la mucosa che si propaga tramite onde che contribuiscono alla chiusura della glottide: il ciclo vibratorio si può esprimere in frequenze e mediamente una voce maschile viene emessa tra 70 e 150 Hz mentre quella femminile tra 150 e 250 Hz e per la voce di un bambino tra 250 e 350 Hz: tali differenze sono dovute alla diversa lunghezza e diverso spessore delle corde vocali.

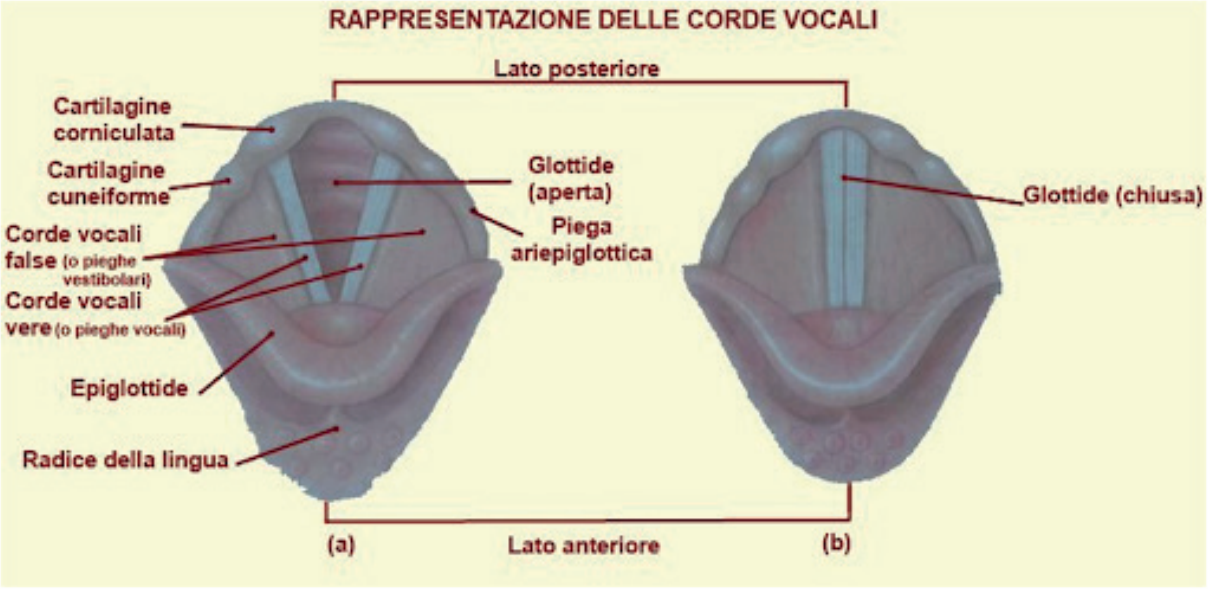


Fig. 1.1.1: vista dall'alto della sezione laringea

La voce prodotta è un'onda sonora le cui caratteristiche variano istante per istante in dipendenza dei movimenti articolatori; la forma primaria dell'articolazione fonetica sono le vocali, e per ognuna di queste si ha la percezione che vengano generate in un punto diverso della laringe. Sono suoni prodotti con un canale fonatorio libero, che non presenta chiusure né restringimenti. La loro produzione è quindi caratterizzata da una gran quantità di flusso d'aria espiratoria per tutta la loro durata e ciò, in termini acustici, corrisponde a un segnale molto intenso.

Inoltre l'assenza di impedimenti permette alle cavità sopra alla laringe di vibrare liberamente alle proprie frequenze di risonanza e dal punto di vista acustico risultano più chiare. Le consonanti invece possono essere viste come interruzioni di diverso tipo tra due vocali, possono essere sorde o sonore, dove queste ultime utilizzano in minima parte l'aria derivante dalla spinta della muscolatura intercostale o addominale.

Nella fonazione il flusso d'aria è influenzato dalla moderazione apportata dalle strutture *subglottiche*, *glottiche* e *sovraglottiche*: la prima tipologia è generata dalla parte inferiore del sistema respiratorio e il suono generato viene modificato con l'ausilio delle proprietà elastiche della cassa toracica e dalla contrazione muscolare attiva dei muscoli intercostali, diaframma e muscoli addominali.

Perchè venga emesso un suono, è necessario che la pressione *subglottica* superi la soglia della pressione necessaria alla fonazione; ciò richiede meno sforzo di quello normalmente richiesto, tuttavia la soglia non ha un valore definito ma varia in base al soggetto e in base al livello di idratazione delle corde vocali. Se la pressione è inferiore alla soglia significa che prevale la *resistenza glottica*, definita come il rapporto tra la *pressione transglottica* il *flusso d'aria transglottico.*

Il volume del suono prodotto può essere misurato in parametri acustici come livello di pressione sonora captato nel piano appena fuori la bocca; l'intensità vocale è un fattore molto importante nella comunicazione verbale e viene regolata nel livello *subglottico* dalla pressione dell'aria, mentre al livello *sovraglottico* dalla calibrazione del flusso d'aria che attraversa la trachea: il primo fattore influenza principalmente i suoni a bassa frequenza, mentre il secondo ha effetto maggiormente su quelli ad alta frequenza.

1.1.2 La struttura anatomica dell'orecchio e i requisiti fisici

L'orecchio umano è un organo dotato di un'incredibile sensibilità e complessità: una persona mediamente può percepire le frequenze contenute in 10 ottave, cioè da 20Hz a 20.000Hz: queste tradotte in termini di lunghezza d'onda corrispondono a un minimo di 1,7 cm a un massimo di 17 m. Per quanto riguarda invece il livello di intensità sonora, l'orecchio umano è in grado di captare i suoni emessi a 0 dB alla frequenza di 1000 Hz (che corrisponde alla pressione acustica di 20×10^{-6} Pa, mentre la soglia del dolore causato dalla pressione è intorno a 20 Pa.

Dal punto di vista anatomico l'orecchio è diviso in 3 parti, rispettivamente denominati parte interna, media e esteriore. La parte esterna comprende e il *padiglione auricolare*, che svolge la funzione di raccolta delle onde sonore, il *condotto uditivo* esterno che convoglia le onde verso l'*apparato mastoideo* e il timpano: la risonanza creatasi nel condotto aumenta il livello di circa 10 dB rispetto a quello all'ingresso del canale. L'orecchio medio invece è la cavità di dimensioni pari a 2 cm^3 che si trova dopo il *timpano*, e contiene gli organi funzionali alla trasmissione dei movimenti del timpano alla *coclea* nell'orecchio interno. Il movimento del *timpano* è trasmesso dalle 3 ossa più piccole del corpo umano, cioè il *martello*, l'*incudine* e la *staffa*: essi si muovono in base ai movimenti del *timpano* e stimolano così il liquido contenuto nella *coclea*. L'orecchio medio agisce da trasformatore, convertendo il movimento dovuto alla bassa pressione del timpano in un movimento ad alta pressione del fluido all'interno della *coclea*. La pressione atmosferica viene bilanciata nell'orecchio esterno nella parte appena oltre il *timpano*: questa allenta la pressione dovuta al cambio di pressione atmosferica in modo da scaricarla verso la gola, tramite le tube di Eustachio, che si aprono quando si sbadiglia o si deglutisce.

Nel caso in cui vengano trasmessi suoni di intensità sonora troppo elevata, i muscoli che circondano la *staffa* si contraggono per limitarne i movimenti, analogamente a quanto accade nell'occhio quando l'iride si dilata per proteggere la pupilla e la retina, da raggi luminosi troppo intensi e perciò dannosi. Il dolore all'interno dell'orecchio è causato da un eccessivo sforzo dei muscoli, che si irrigidiscono per proteggere le cellule nervose.

L'orecchio interno non contene solo gli organi relativi all'udito, ma anche quelli che riguardano l'equilibrio: si trova all'interno del cranio e contiene 5 organi ricettori, ognuno con una sensibilità diversa al tipo di movimento trasmesso alla *coclea* possono infatti decifrare il segnale derivante dalla variazione di accelerazione del fluido in ogni direzione nel piano. Nella parte antecedente la *coclea* si trova il *vestibolo* che contiene l'*utricolo* e il *sacculo*: il primo riceve i 5 segnali dei canali semicircolari membranosi, mentre il secondo è collegato direttamente al *condotto cocleare*: insieme contribuiscono a trasmettere alla *coclea* gli stimoli dovuti alla variazione dell'accelerazione del fluido in essi contenuto, perciò sono fondamentali per la sensazione di equilibrio. Quest'ultima invece contiene le ciglia sensoriali che si occupano della decodificazione del suono ricevuto, ed è avvolta su sè stessa ricordando nella forma una chiocciola: all'interno è rivestita da 2 tipi di membrane, la più spessa chiamata *membrana basiliare* divide la parte esteriore detta *scala vestibolare,* da quella interiore denominata *scala timpanica:* lungo questa membrana si trova il *nervo cocleare* che conduce gli impulsi elettrochimici all'encefalo. La seconda membrana denominata *finestra rotonda* agisce in controfase al movimento a pistone della staffa, per non alterare la pressione interna dell'orecchio.

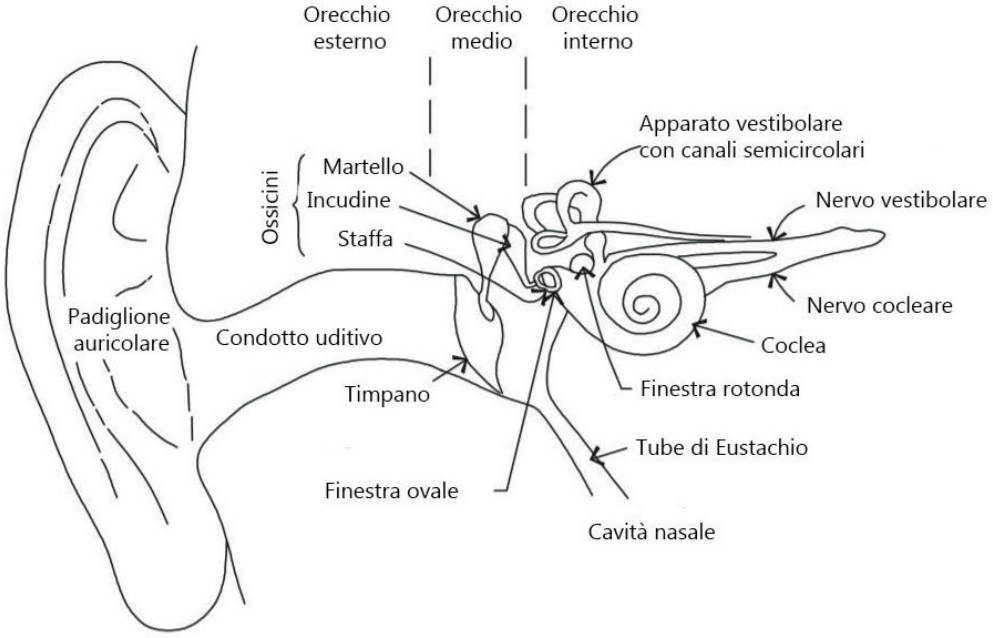


Fig. 1.1.2: La struttura anatomica dell'apparato uditivo (tratto da Long, M., 2006). Traduzione a cura dell'autrice.

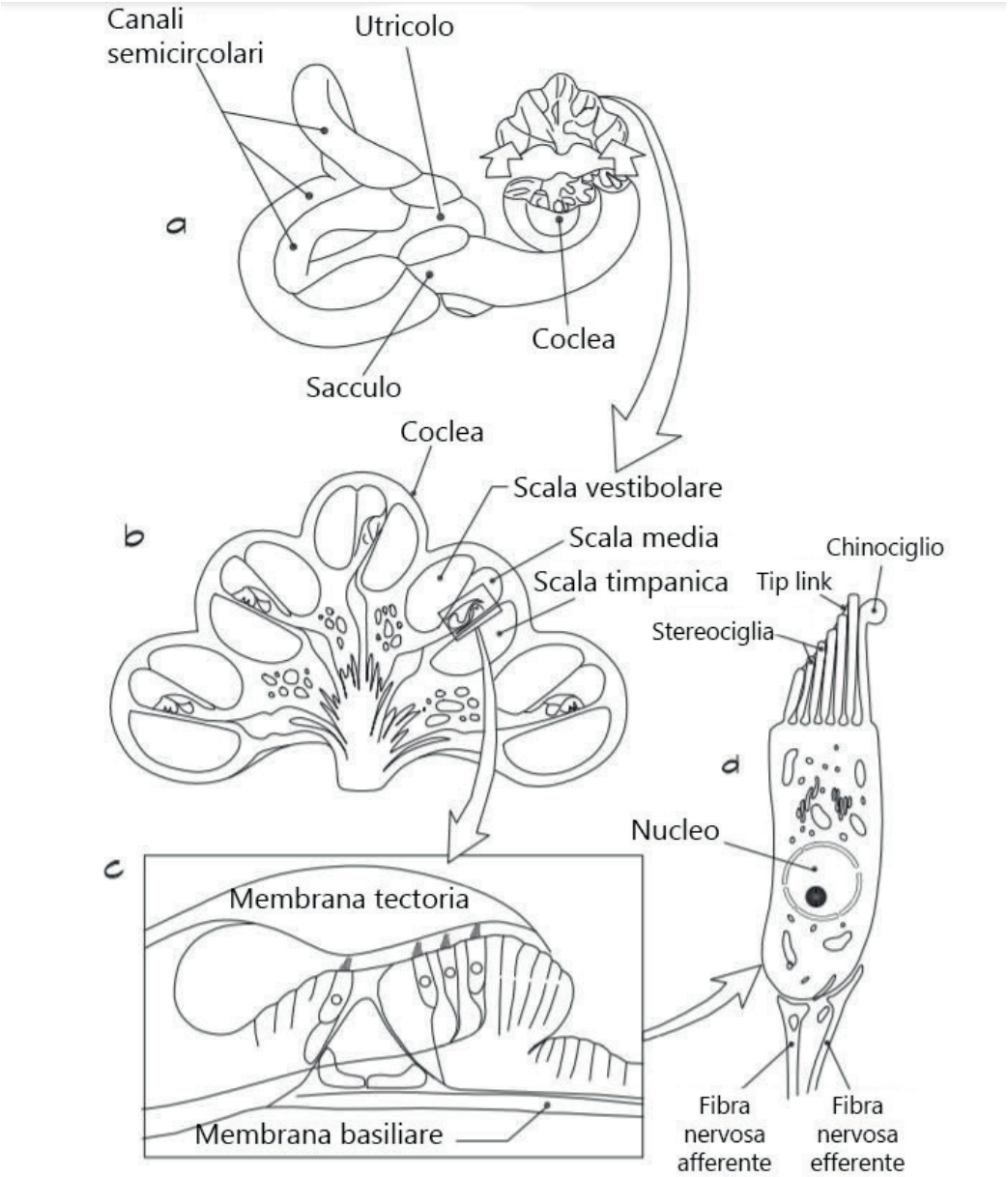


Fig. 1.1.3: Dettagli della struttura anatomica dell'apparato uditivo (tratto da Long, M., 2006). Traduzione a cura dell'autrice.

1.2Origine e funzione del teatro

La parola *teatro* deriva dal greco τεατρον (*théatron*) che indicava un luogo dove osservare, esaminare e contemplare. L'atto di guardare attentamente è anche correlato all'ascolto ed entrambi permettono agli spettatori di partecipare attivamente agli eventi teatrali, esercitando la democrazia. Era infatti uno degli edifici simbolici insieme all'agorà e al tempio dove la comunità si riuniva senza distinzione di classe sociale, e le funzioni che questo assumeva erano in funzione delle necessità della comunità.

L'importanza del teatro nella società greca si può riassumere in 3 valori:

- Sacro: venivano svolte celebrazioni in onore di Doniso, come le *Lenaia*
- Poetico: era usuale organizzare alcune giornate dove si volgevano gare di composizione poetica in occasione di una celebrazione religiosa: la manifestazione prendeva il nome di *Agone* (άλών): Questa celebrazione poteva avere carattere tragico o comico, e vi si sfidavano 3 poeti che recitavano composizioni appropriate al genere.
- Politico: i poeti venivano eletti dall'*arconte eponimo*, una figura che veniva eletta annualmente e che era incaricata di risolvere questioni civili, militari e religiose dello stato. Inoltre nel teatro avevano luogo i processi giudiziari e la giuria era composta dai membri delle 10 *phylé.*

Le opere teatrali greche sono state messe in scena per la prima volta nel VI secolo a.C Ad Atene, in occasione delle feste religiose. Ci sono due generi teatrali greci, diffusi in tutto il Mediterraneo che hanno influenzato anche il teatro romano e ellenistico, e grazie ad alcuni autori maggiori come Sofocle e Aristofane si è formata la base del teatro moderno.

L'origine della parola *tragedia* (τραγῳδία) è attica, ma l'etimologia è incerta: nella parola sono presenti gli elementi *ᾠδή* (canto) e *τράγος* (capro), e già in età greca pare che fosse già presente il dubbio se il senso della parola fosse *canto per un capro,* nel senso che il vincitore avrebbe ricevuto in premio un capro, oppure se si fa riferimento agli attori mascherati da capri. La seconda versione fa riferimento al dramma satiresco e dal *ditrambo,* antico canto corale dionisiaco. Secondo la tradizione la prima rappresentazione tragica ebbe luogo ad Atene durante la 61ª olimpiade(536-533 a.C), Ma la vera e propria tragedia attica inizia con Eschilo, con cui il dialogo si rendeva definitivamente indipendente dal coro , successivamente è stato introdotto anche un terzo attore. Della rappresentazione tragica si occupava lo Stato e aveva carattere sacro, le rappresentazioni erano ispirate alla mitologia greca: gli attori dovevano indossare una maschera per impersonare gli dei: gli attori dovevano essere solo di genere maschile, come anche gli spettatori, la presenza delle donne era spesso contestata.

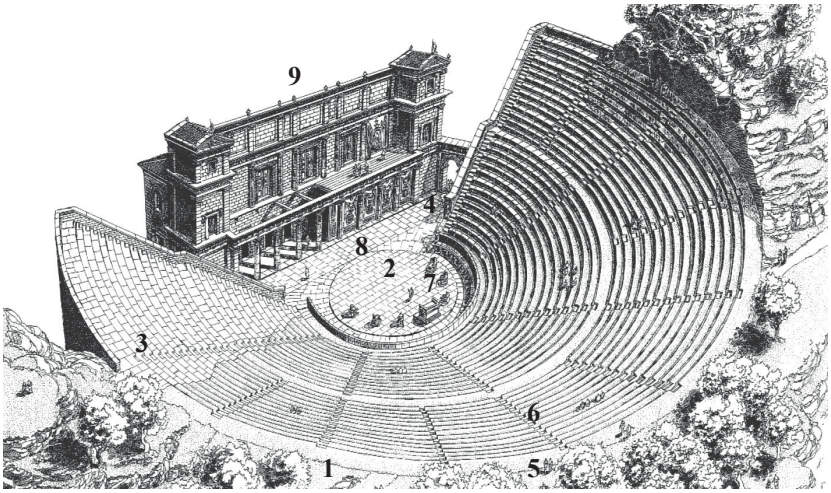
La parola commedia deriva dal greco *κωμῳδία* che indicava l'opera letteraria in versi o in prosa destinata alla rappresentazione scenica di tono leggero, caratterizzata da eventi lievi e tristi, la cui conclusione è però lieta: i principali autori di questo genere teatrale sono Aristofane e Menandro.

1.2.1Struttura e terminologia

I principali componenti del teatro antico sono l'*orchestra,* o *choròs,* lo spazio libero realizzato per le danze, per gli attori e il coro. Le sedute realizzate in pietra o legno sfruttando il dislivello della collina danno origine al *kòilon o théatron,* dove gli spettatori potevano assistere allo spettacolo.
L'accesso al teatro avveniva tramite percorsi all'aperto al livello dell'orchestra *(èisodoi* o *pàrodoi)* e le scalinate che prendono il nome di *klimakes,* che dividevano il *kòilon,* in più settori permettevano agli spettatori di raggiungere anche le sedute più distanti. Le varie zone delimitate dalle scale invece venivano chiamate *kerkides,* mentre i collegamenti orizzontali venivano garantiti da passaggi denominati *diazomata.*
La *skené* era invece un elemento tridimensionale realizzato con materiali leggeri come legno o stoffa, posizionato dietro all'orchestra, dalla parte opposta del *koilòn:* In origine veniva utilizzata per il deposito dei costumi di scena, e diventa solo successivamente un edificio più complesso, con un palco rialzato e un fondale più dettagliato denominato *episkenion.*

La cultura greca è stata assorbita da quella romana, e il periodo compreso tra tra il III e I secolo a.C si definisce *Ellenismo.* I teatri romani, pur riprendendo il modello di quelli greci, erano edifici differenti, inoltre in latino si utilizzava una terminologia diversa: si usava il termine *cavea* per indicare il *kòilon,* e i settori individuati dalle *scalae* prendevano il nome di *cunei,* mentre i collegamenti orizzontali si definivano *praecinctio. La skené* invece veniva chiamata *scenae frons,* e il palco *pulpitum:* questi due insieme formavano *il proscenium.*

Fig. 1.2.1 Ricostruzione del teatro greco nella seconda metà del IV secolo a.C., 2007. (tratto da Pappalardo, U., 2007). Elaborazione grafica dell'autrice.



	Greco	Latino
1	Kòilon	Cavea
2	Orchestra	Orchestra
3	Kérkida	Cuneus
4	Parodòs	Itinerum
5	Klimaka	Scalae
6	Diazoma	Praecintio
7	Proskenion	Pulpitum
8	Episkenion	Proscenio
9	Skené	Scenae frons

Capitolo 2

Acustica Geometrica

2.1 Le grandezze fisiche per la valutazione dell'acustica

Da un punto di vista fisico il suono può essere descritto come una variazione di pressione, più precisamente compressione e rarefazione, intorno al valore della pressione atmosferica in quel punto: perchè ciò accada, è necessaria una sorgente sonora che provochi direttamente o indirettamente delle variazioni di pressione tramite l'emissione di vibrazioni ad una determinata frequenza nell'aria (o altro fluido) in cui si trova. La porzione di spazio interessata da tale variazione di pressione viene denominata *campo sonoro.* Se le oscillazioni sonore hanno una *frequenza* compresa tra 20 e 20.000 Hz (definito campo di udibilità), e un'*ampiezza,* che corrisponde al contenuto energetico, superiore alla soglia di udibilità minima pari a $2x10^{-5}$ Pa sono allora percepite dall'orecchio umano. Possono inoltre essere classificate come suono oppure rumore, nel caso in cui risultino fastidiose o sgradevoli.

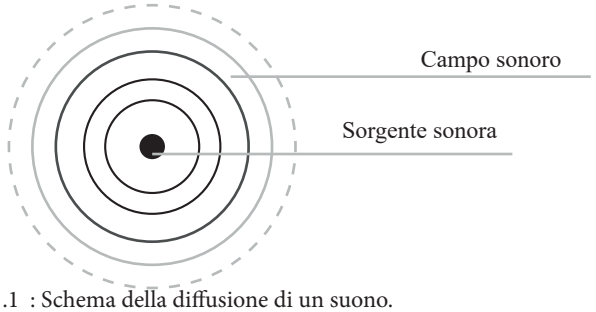


Fig.2.1.1 : Schema della diffusione di un suono.

L'architettura necessita della valutazione acustica degli spazi costruiti, e interviene direttamente per renderne la progettazione ancora più funzionale incrementando le prestazioni acustiche. L'analisi si concentra sostanzialmente sulle sorgenti e sulla modalità di risposta agli impulsi degli spazi costruiti, tenendo conto della geometria e del materiale: in particolare, ciò che si valuta è la riflessione e l'assorbimento delle superfici, e la trasmissione dell'energia incidente.

Le variazioni di pressione trasmesse come vibrazioni in frequenza seguono una legge sinusoidale, così lo strato d'aria adiacente alle particelle d'aria in movimento subiscono espansioni e contrazioni con la stessa frequenza delle particelle emesse, in tal modo si propaga la vibrazione nel fluido.

In sintesi le condizioni essenziali per la generazione, propagazione e udibilità del suono sono le seguenti:

- La presenza di un mezzo attraverso cui propagarsi (nel vuoto non avviene la propagazione);
- La variazione di pressione nel mezzo intorno a un valore di equilibrio, come la pressione atmosferica;
- Una frequenza compresa nel campo udibile;
- Un contenuto energetico al di sopra della soglia minima di udibilità.

Dato che il suono corrisponde a variazioni di pressione nell'aria, si può affermare che le proprietà di queste variazioni determino le proprietà del suono percepito: se i suoni prodotti presentano variazioni regolari di pressione, questa regolarità implica che un determinato andamento della pressione si ripeta in maniera ciclica e si definisce *forma d'onda* la ripetizione di tale andamento, e il suono viene definito *periodico.* In questo caso, la durata della singola forma d'onda si definisce *periodo*, indicato con *T* e misurato in secondi.

Nel caso in cui, al contrario, la curva che descrive l'andamento della pressione sia priva di qualsiasi regolarità, il segnale associato si percepisce come *rumore,* e questo si può suddividere in due categorie:

- *Rumore impulsivo:* viene determinato da rapide variazioni di pressione nell'arco di pochi millisecondi: ciò accade quando un oggetto viene colpito
- *Rumore stazionario:* la differenza rispetto al precedente è la durata di tempo in cui l'irregolarità della variazione di pressione si protrae. Un esempio di questo tipo di rumore è il fruscio del vento.
- Solitamente il suono viene rappresentato in termini di *frequenza (f)* misurata in *Hertz (Hz)* che corrisponde all'inverso del secondo *(s^{-1}),* infatti la frequenza *f* corrisponde all'inverso del periodo *T*.

Il teorema di Fourier stabilisce che ogni forma d'onda periodica può essere approssimata sommando alla sinusoide che rappresenta la frequenza fondamentale, o prima armonica, altre sinusoidi aventi frequenze multiple. La sinusoide di frequenza pari alla frequenza del suono periodico di partenza è detta *fondamentale,* mentre quelle con frequenze multiple vengono dette *parziali.*

Maggiore è la frequenza e più alto viene percepito il suono (*pitch*): il *pitch* viene percepito nella *membrana basiliare*, che è il luogo dove avviene l'analisi spettrale. Ci sono 24 aree all'interno della membrana con 1300 neuroni: questi agiscono come filtri che separano il suono che giunge all'orecchio nelle sue componenti principali. Quando due suoni sono abbastanza vicini da sovrapporsi, si dice che si trovano all'interno della stessa banda critica. Questa è importante per molti aspetti dell'udito, ad esempio per i suoni musicali, attraverso di essa, è possibile definire la consonanza e la dissonanza:

Hermann von Helmholtz ipotizzava che la dissonanza fosse causata da una diversa frequenza, e in seguito ulteriori esperimenti di Plomp e Levelt hanno aggiunto alcuni fattori a questa ipotesi. Questi infatti hanno rivelato che la massima dissonanza si ha quando i due suoni sono distanti circa un quarto di banda acritica, con la separazione a metà si raggiunge invece un grado di consonanza pari a 60%, e questa aumenta sempre più fino alla distanza massima pari a una banda critica.

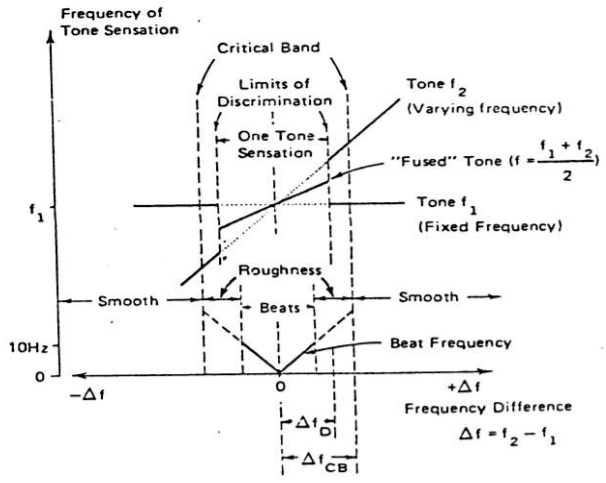


Fig. 2.1.2 : Drioli, C., Orio, N., Sensazioni uditive al variare della differenza della frequenza.

2.1.1 Le leggi di Canac

Francois Canac è stato il fondatore del centro della Ricerca industriale e marittima di Marsiglia, ed è strato in grado di far convergere diversi interessi, come la storia, l'acustica e l'archeologia in un'unica opera. Dal 1921 ha fatto alcune ricerche sui teatri antichi, per poi pubblicare nel 1967 nel libro *L'acoustique des théâtres antiques, ses enseignements*. Bisogna inoltre considerare la scarsità di strumenti adatti ad analizzare temi così complessi, infatti lo studio si basa sulla geometria dei teatri antichi, e fornisce alcune equazioni in grado di regolarne le proporzioni per massimizzare le potenzialità di queste strutture per l'ascolto.

Inizialmente egli rivolge l'attenzione alla scena e alla propagazione delle onde sonore attraverso gli elementi architettonici, osservando come queste si comportano sulla superficie dell'acqua. Per quanto riguarda la scena invece, ha realizzato un modello in scala 1:1000 del teatro di Orange, inserendo alcune fonti sonore impostate su una frequenza pari a 800 Hz e alcuni ricevitori sulle sedute della *cavea*. Per quanto riguarda invece la propagazione delle onde sonore, il loro comportamento è stato ipotizzato pari a quello delle onde in acqua, in modo da analizzare il comportamento delle onde quando vanno ad incidere su una superficie riflettente, come la *scenae frons.*

In particolare, sono state simulate 3 condizioni (a,b,c): nella prima, le onde sonore vengono riflesse da una superficie continua, nella seconda da una superficie alveolare, mentre nella terza è stata utilizzata la scena del teatro di Orange, caratterizzata da nicchie, colonne decorazioni nella parte superiore. È stato osservato nel terzo caso che la parte inferiore della scena era funzionale alla riflessione delle onde sonore verso le sedute più alte della cavea, mentre la parte più alta era in grado di ridurre molto l'eco, svolgendo la funzione degli attuali diffusori.

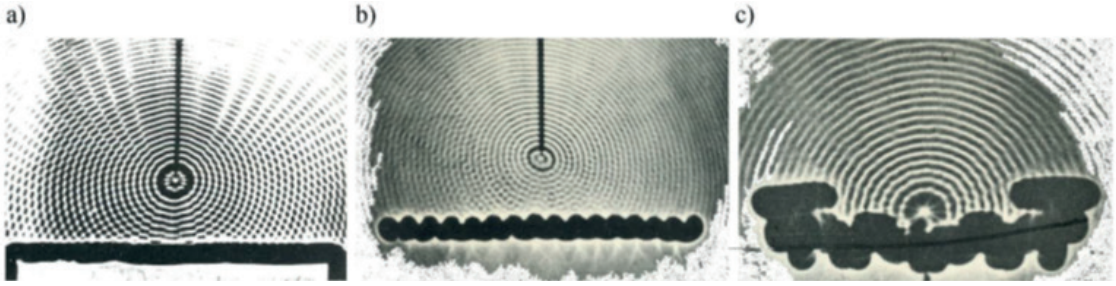


Fig. 2.1.3: Studio della propagazione del suono, riflessioni ottenute da un muro piano (a), un muro alveolare (b), e con la riproduzione dell'antica scenae frons del teatro di Orange (c), (tratto da Canac F.,, 1967).

Questo esperimento in seguito è stato ripetuto anche su casi reali, e i dati raccolti hanno dimostrato la presenza di alcune affermazioni sempre valide, ad esempio il fatto che posizionando due fonti sonore della stessa intensità il livello della potenza sonora aumenta di 3 dB, ma anche il fatto che i raggi dell'energia riflessa coprono una distanza doppia rispetto a quelli dell'energia diretta. Tuttavia il principale contributo di Canac è stato quello di definire l'equazione canonica dei teatri antichi, che permette di identificare le relazioni che legano le dimensioni dei principali elementi de teatro, quindi *cavea, scenae frons* e *orchestra*. Questa relazione ha permesso di descrivere in maniera geometrica quello che in antichità è stato desunto in maniera empirica, considerando che ogni elemento è in grado di influenzare il panorama acustico.

Considerando la sezione longitudinale del teatro, egli ha catalogato 7 leggi utilizzando i seguenti parametri:

- α, angolo compreso tra la pendenza della collina e il pavimento dell'orchestra
- D_0, distanza tra il basamento del proscenio e il primo gradino della cavea, che corrisponde anche al diametro dell'orchestra.
- H, Altezza dell'ascoltatore
- h_o, altezza de *proscenium* rispetto al pavimento dell'orchestra.
- H, h_0 più l'altezza della bocca dell'attore, è pari a 1,60 m

Prima legge: equazione canonica dei teatri antichi

Nella prima legge l'attore, cioè la fonte sonora è collocato sul *pulpitum*, e si ipotizza che il pubblico non assorba le onde sonore: L'angolo di ascolto considerato è pertanto quello compreso tra il raggio emesso dalla fonte sonora e l'inclinazione della cavea: per ridurre l'assorbimento da parte delle persone sedute di fronte in maniera consequenziale, l'angolo deve essere più ampio possibile, e in ogni caso, mai inferiore a 4°.

L'equazione canonica viene ottenuta tramite il seguente procedimento:

- H, pari all'altezza dello spettatore C in base alla distanza dal pavimento dell'orchestra
- SC, raggio diretto
- S', sorgente immagine dovuta al pavimento dell'orchestra
- SIC, raggio riflesso dall'orchestra in I

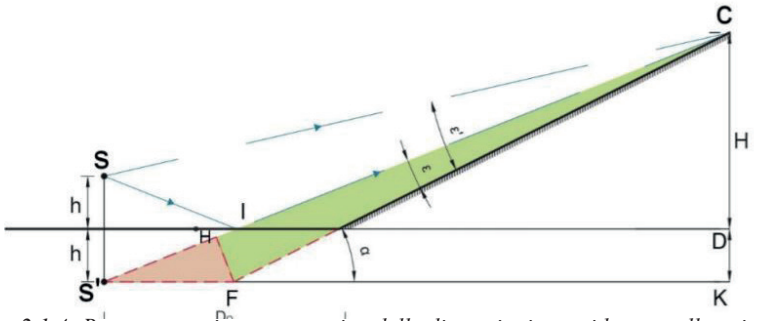


Fig. 2.1.4: Rappresentazione geometrica delle dimensioni considerate nella prima legge di Canac (tratto da Bo, E., 2017).

$$FC = h\ cotg\alpha$$
$$S'F = D_0 - cotg\alpha$$

$$S'C = \frac{D_0 + H\ cotg\alpha}{cos\ (\alpha - \varepsilon)} \qquad (2.1)$$

Considerando poi il triangolo S'FC:

$$\frac{S'F}{sin\varepsilon} = \frac{S'C}{sin\alpha} \qquad (2.2)$$

Infine, l'equazione seguente mette in relazione le quantità geometriche dell'architettura e la posizione di un ipotetico ascoltatore

$$\frac{D_0 - h\ cotg\alpha}{sin\varepsilon} = \frac{D_0 + H\ cotg\ \alpha}{cos\ (\alpha - \varepsilon)\ sin\alpha} \qquad (2.3)$$

Per quanto riguarda i dati geometrici del Teatro di Tindari, sono state rilevate le seguenti dimensioni nel testo di Bo, E., 2017.

Dimensioni del teatro di Tindari:

- $\alpha = 27°$
- $D0 = 18{,}5$ m
- $H = 12{,}5$ m
- $h = 5{,}7$ m
- $h0 = 4{,}1$

Seconda legge: il ruolo dell'orchestra

Nella seconda legge si considera l'ipotetico ascoltatore C localizzato all'altezza H, la fonte sonora localizzata sul margine del pulpito, e l'angolo β compreso tra la proiezione verticale del punto dove si trova l'ascoltatore e il segmento che congiunge l'ascoltatore alla proiezione a terra della fonte sonora, come indicato nella figura.

La differenza d tra il raggio diretto e riflesso è pari a:

$$d = (S'C - SC) = 2h \sin\beta \tag{2.4}$$

Quindi in base alla posizione dell'ascoltatore, il ritardo nella riflessione è determinata dall'angolo ß. In base ai triangoli presenti nella figura, è possibile ottenere la seguente funzione:

$$\frac{d}{2h} = \frac{H}{D^2 + H^2} = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{D}{H}\right)^2 + 1}} \tag{2.5}$$

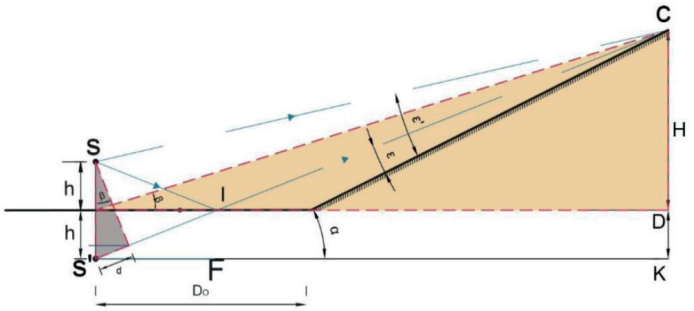


Fig. 2.1.5: Rappresentazione geometrica delle dimensioni considerate nella seconda legge di Canac (tratto da Bo, E., 2017).

Questa equazione descrive gli spettatori seduti alla stessa quota ma in posizioni diverse. Inoltre la differenza tra i raggi diretti e riflessi è minore al centro della cavea nelle file inferiori, difatti è dove il suono viene percepito più chiaramente.

Inoltre è molto importante il contributo dell'orchestra poiché permette alle onde sonore dirette di essere riflesse velocemente e percepite anche nelle ultime file: tramite questo accorgimento il suono viene rinforzato di circa 3 dB. La differenza Δi tra il suono diretto d e quello riflesso r, viene calcolata tramite la seguente equazione:

$$\Delta i = 20 \log \frac{d + r}{r} \tag{2.6}$$

Applicando questa equazione ai casi reali, si nota che $\Delta i < 1$ dB, per cui è possibile desumere che il suono riflesso viene raddoppiato rispetto a quello diretto.

Terza legge: Lo spazio per il movimento degli attori

Un ascoltatore seduto in ultima fila riceve le seguenti tipologie di impulsi sonori: il suono diretto, quello riflesso dall'orchestra e quello riflesso dalla *scenae frons*. Nella seguente figura è possibile visualizzare le posizioni degli attori in 3 condizioni differenti:

- S, nell'*orchestra.*
- S1, per avere una piena riflessione da parte del piano dell'orchestra in C.
- S2,situato sulla posizione limite perché l'ascoltatore seduto in ultima fila percepisca le riflessioni provenienti dalla *scenae frons*.

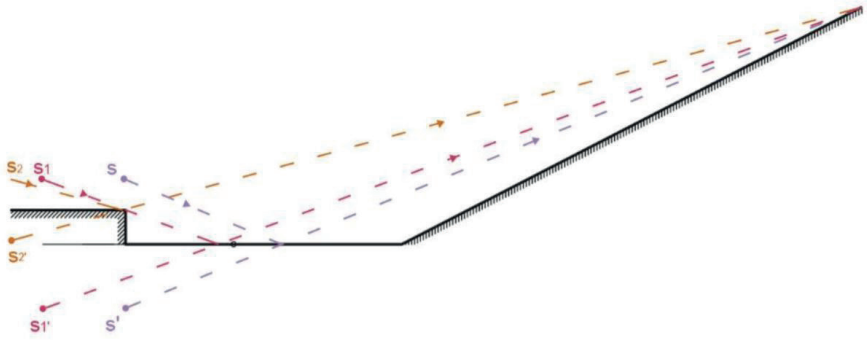


Fig. 2.1.6: Rappresentazione geometrica delle dimensioni considerate nella terza legge di Canac (tratto da Bo, E., 2017).

È possibile inoltre calcolare il contributo dell'orchestra e del pavimento del *pulpitum* in base alle posizioni S1 e S2 degli attori, che risulta molto utile in quanto è poi possibile determinare la massima distanza utile che gli attori possono sfruttare.

Considerando le riflessioni dal pavimento dell'orchestra, lo spessore del palco SS1 può essere descritto dalla seguente equazione:

$$\frac{SS_1}{t} = \frac{AI_1}{h_0} \tag{2.7}$$

in seguito è possibile ottenere la seguente equazione:

$$SS_1 = \frac{D0 + H\,cotg\alpha}{H + h_0} \tag{2.8}$$

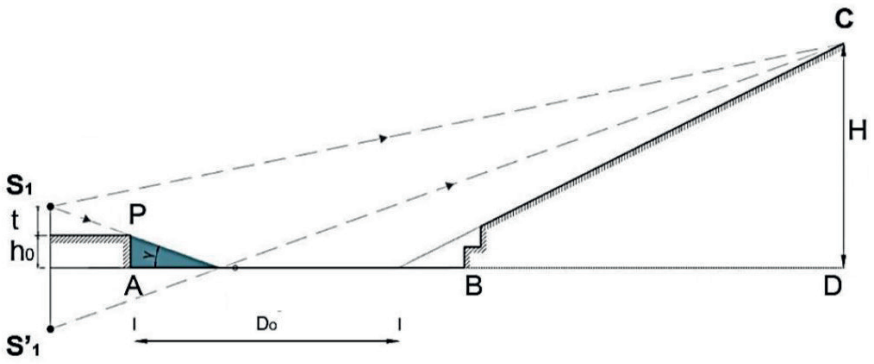


Fig. 2.1.7: Rappresentazione geometrica delle dimensioni considerate nella terza legge di Canac per il contributo dell'orchestra (tratto da Bo, E., 2017).

L'attore può quindi muoversi dalla *scenae frons* per una distanza non superiore al valore di SS1, poiché solo in questo modo le riflessioni dovute al pavimento dell'orchestra interessano tutti gli ascoltatori. Oltre questo limite, il numero degli ascoltatori che ricevono queste riflessioni diminuisce fino a quando la sorgente si troverà nella posizione R che corrisponde al limite massimo per lo sfruttamento del pavimento dell'orchestra, oltre a questa posizione l'orchestra non riflette. È possibile inoltre dimensionare il diametro dell'orchestra tramite la seguente disequazione.

$$D_0 \quad < \quad \frac{H \, cotg\alpha}{H - 2h_0} \tag{2.9}$$

È possibile anche calcolare SS2 considerando il contributo del pavimento del *pulpitum*

$$SS_2 = t \, cotg \, \delta = t \, \frac{D0 \;\; H \, cotg \, \alpha}{H - h_0} \tag{2.10}$$

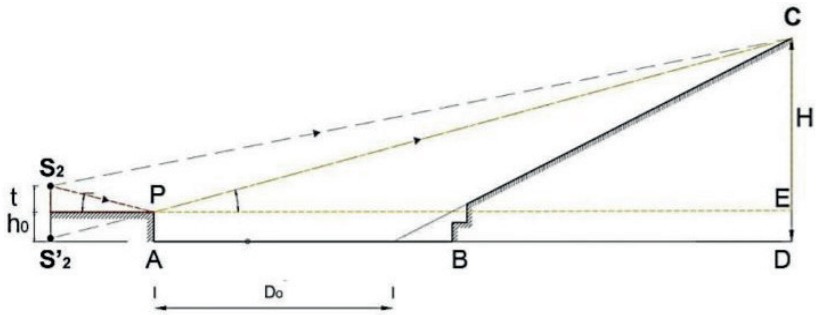


Fig. 2.1.8: Rappresentazione geometrica delle dimensioni considerate nella terza legge di Canac per il contributo del pavimento del pulpitum (tratto da Bo, E., 2017).

Quarta legge: Punti limite delle riflessioni sull'orchestra

La quarta legge riguarda l'effettiva area del pavimento dell'orchestra che contribuisce alla riflessione. Per accentuare questa potenzialità, Canac aveva evidenziato che sul pavimento dell'orchestra di alcuni teatri era stato realizzato un mosaico al centro. Un esempio di questo è il teatro di Dioniso di Atene: nel pavimento di marmo bianco dell'orchestra era stato inserito un disegno romboidale con l'asse principale parallelo alla scena , mentre l'asse secondario era 2/3 del primo, quindi 2/3 D_0. È possibile ipotizzare che il rombo rappresentasse l'area in cui il coro poteva muoversi senza ostruire i raggi diretti verso la cavea.

Quinta legge: Variazione dell'intensità in base alla distanza

L'intensità percepita, I, è in relazione all'inverso della radice quadrata della distanza tra sorgente e ricevitore. Considerando due ascoltatori rispettivamente collocati alle distanze D, e D+e , questi possono essere collegati dall'equazione (2.11): È possibile assumere che l'ascoltatore nelle prime file sia più sensibile alla variazione acustica della posizione della fonte, in confronto all'ascoltatore seduto in ultima fila.

$$log \, (D + e)^2 - log \, D^2 = log \, 1{,}25 \tag{2.11}$$

Dove

$$\frac{D+ e}{D} = \sqrt{1{,}25} = 1{,}12 \tag{2.12}$$

e infine

$$\frac{e}{D} = \; 0{,}12 \approx \frac{1}{10} \tag{2.13}$$

Sesta legge : Amplificazione del suono dovuta agli elementi scenici

Attraverso la sesta legge è possibile individuare il massimo spessore del pulpito, lo spessore è definito in base alla riflessione proveniente dalla *scenae frons* : questa infatti funge da specchio e rivolge le riflessioni verso a cavea. Il ritardo delle riflessioni Δt, viene calcolato in base al suono diretto come di seguito:

$$\Delta t = \frac{d}{c} \approx \frac{2\,(P\text{-}X)\cos\beta}{c} \tag{2.14}$$

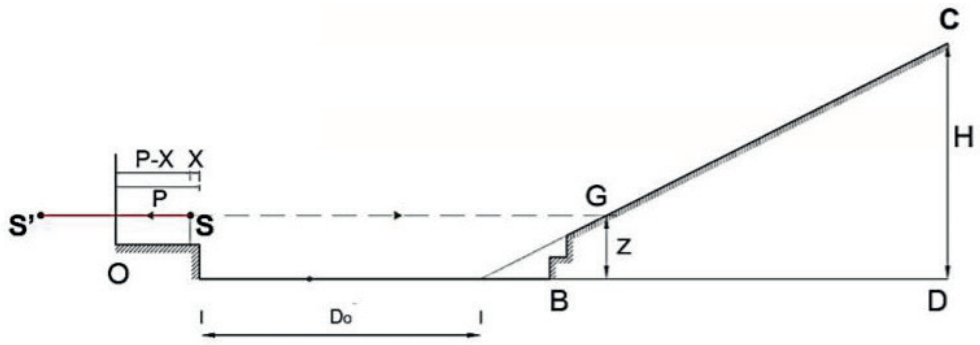


Fig. 2.1.9: Rappresentazione geometrica delle dimensioni considerate nella terza legge di Canac per il contributo dell'orchestra (tratto da Bo, E., 2017).

Canac inoltre aggiunge che Δt non deve superare 35 ms per non compromettere l'intelligibilità del parlato. Per definire lo spessore del pulpito si utilizza la seguente disequazione:

$$P < X + \frac{340 \;\; 0{,}035}{\cos\beta} \tag{2.15}$$

Settima legge: Unione del contributo del pavimento dell'*orchestra* e della *scenae frons*.

È stato precedentemente dimostrato che l'attore deve avere il supporto sia del pavimento dell'orchestra che della *scenae frons*: sono state allora considerate due ipotesi:

- Nella prima si considera che il pavimento dell'orchestra sia assorbente e quello della *scenae frons* sia riflettente. In seguito è stato dimostrato che in queste condizioni solo la posizione vicina al margine del pulpitum risulta più vantaggiosa
- Nella seconda ipotesi all'opposto si considera il piano dell'orchestra riflettente e la scena costituita da materiale assorbente
- Nella terza ipotesi si considerano entrambe riflettenti e la relazione tra le grandezze viene descritta tramite la seguente disequazione.

$$\frac{2}{(D - e)^2} + \frac{1}{(D + e)^2} > \frac{3}{D^2} \tag{2.16}$$

Siccome la terza condizione è più plausibile, la condizione ottimale sarebbe posizionare la sorgente del suono sul bordo del *pulpitum*, e mantenere libera la superficie dell'orchestra per ottimizzare le riflessioni.

2.1.2 Precisazioni sulle leggi di Canac

Canac pur avendo fornito le regole che sono state la base per lo studio dell'acustica dei teatri antichi, non ha considerato il teatro nella sua configurazione tridimensionale, ma solo in base al disegno geometrico in sezione.

Sono state in seguito osservate alcune situazioni ricorrenti che hanno contribuito allo sviluppo di questa disciplina:

Nelle parti laterali della cavea, le riflessioni ottenute dalla scena sono lievemente percepite, è allora necessario aumentare le dimensioni in larghezza sia della scena che dell'orchestra, tuttavia neanche in questa maniera è possibile raggiungere tutti gli ascoltatori.

Inoltre, il modello di Canac considera solo quattro contributi: suono diretto, suono indiretto proveniente dal pavimento del palco e dell'orchestra e una riflessione del suono proveniente dalla scena, e ciò che determina i risultati è la distanza e infine non vengono considerati i parametri che descrivono la direzione della sorgente sonora, si considera infatti una fonte omnidirezionale.

Capitolo 3

I progetti europei

3.1 Progetto JPI CH

Nel 2010 il Consiglio dell'Unione Europea ha avviato un'iniziativa di programmazione congiunta sul tema del patrimonio culturale denominata JPI CH (Joint Programming Initiatives on Cultural Heritage). Il Patrimonio culturale europeo è tra i più variegati al mondo ed è una componente considerevole dell'identità individuale e collettiva sia nella forma materiale che in quella immateriale. Oltre al degrado fisiologico, il patrimonio culturale europeo è esposto a molte minacce, tra cui i cambiamenti climatici, l'inquinamento, la crescente urbanizzazione, il turismo di massa e la negligenza umana, per cui la sua tutela attualmente viene rivendicata sempre più frequentemente dai cittadini Europei e dai rispettivi rappresentanti dei Ministeri e del Consiglio dell'Unione Europea.
È perciò necessario che venga supportata la ricerca di strategie, metodologie e strumenti condivisi per la salvaguardia del patrimonio culturale, contro il decadimento a cui è sottoposto.
Gli obbiettivi della JPI CH possono perciò essere sintetizzati nei seguenti punti:

- Sviluppare una società consapevole del proprio patrimonio e in grado di interrogarsi sulla salvaguardia dello stesso.
- Connettere le persone al patrimonio facendo in modo che questo venga tutelato e fruito.
- Estendere la conoscenza non solo al singolo manufatto, ma anche al contesto in cui si trova.
- Supportare la ricerca dei metodi utili alla tutela e alla valorizzazione.

Riflettendo sulle grandi opere del patrimonio culturale europeo, spesso si considerano costruzioni dove la loro importanza è fortemente legata all'acustica, poiché questa è una conseguenza intangibile dovuta alla loro forma tangibile. Nel 2020 è stato perciò attivato all'interno dell'iniziativa JPI CH un progetto che si concluderà nel 2023, intitolato The Past Has Ears (PHE) guidato dal professore Brian FG Katz dell'Università Sorbonne di Parigi: verranno proposti alcuni strumenti per la ricostruzione digitale dell'acustica originaria della Cattedrale di Notre Dame a Parigi, del Teatro La Fenice a Venezia, delle Houses of Parliament a Londra e del Teatro Greco a Tindari. Per quanto riguarda quest'ultimo, sono previsti due obiettivi:

- Permettere una totale caratterizzazione dello scenario acustico, in modo da sfruttarne al meglio le caratteristiche durante gli spettacoli odierni.
- Creare delle ricostruzioni virtuali del comportamento acustico nelle sue diverse configurazioni storiche, rendendo possibile l'ascolto nei diversi casi utilizzando i sistemi VR o AR, sia in laboratorio che in situ anche per i visitatori del sito archeologico.

In questo documento verrà trattata la tematica del restauro e della valorizzazione dei teatri antichi, in particolare applicata al caso del Teatro Greco di Tindari. Si tratta infatti dell'eredità di un'epoca passata dove già si realizzavano strutture in base alla funzione che dovevano svolgere. Nel caso dei teatri antichi infatti, sono stati svolti numerosi studi a partire da Vitruvio fino all'epoca contemporanea per identificare le formule che ne descrivono la geometria e come questa ha effetto sull'acustica che viene prodotta al suo interno. Sono infatti architetture che sfruttano al meglio le condizioni naturali come la luce, e ne amplificano altre generate dall'uomo, ossia la voce e il suono.

3.2 ERATO

Lo scopo del progetto svolto dal 2003 al 2006 della Commissione Europea denominato ERATO, che riprende il nome della musa del canto corale e della poesia amorosa, è stato quello di investigare l'acustica dei teatri antichi all'aperto e compararla con quelli al chiuso, denominati *odea.* Il metodo realizzato prevedeva la creazione di modelli 3D e inserire i dati relativi alle superfici dei materiali. Una volta ricostruito lo spazio digitale è stato possibile effettuare delle simulazioni.
La differenza tra l'*odeon* e il teatro all'aperto, oltre alla presenza o assenza della copertura, consisteva nella diversa tipologia di spettacolo che era grado di ospitare e nelle dimensioni: all'interno dell'*odeon* si svolgevano esibizioni musicali, mentre nel teatro all'aperto prevaleva il parlato.

Sono stati scelti 5 spazi, suddivisi rispettivamente in 3 teatri e 2 *odea:* i teatri di Aspendos e Gerasa presentano un buono stato di conservazione, mentre quello del teatro di Siracusa è stato giudicato con un grado inferiore. Per quanto riguarda gli *odea,* sono state scelti quelli di Aosta e Aphrodisias.

3.2.1 I parametri considerati

Le misurazioni dei casi studio presentati all'interno del progetto ERATO sono state valutate in base ai parametri presenti nella norma ISO 3382: 2000 *Acoustics. Measurement of the reverberation time of rooms with reference to other acoustical parameters* e nello specifico si tratta di:

- T_{30}, Tempo di riverberazione |s|: fornisce un'indicazione sul riverbero dell'ambiente in base ai secondi necessari al suono perchè la su intensità si riduca di 30 dB. Rappresenta un problema maggiore nel caso di uno spettacolo teatrale parlato, rispetto al caso di un'esibizione musicale. Il tempo di riverberazione ottimale alle medie frequenze in una sala da concerto è tra 1,7e 2,3 s. In base alla successiva norma ISO 3382-1, 2009 il pedice 30 indica la differenza pari o inferiore a 30 dB tra le onde emesse e quelle riflesse, per ciò questo parametro descrive quanto tempo è necessario perchè l'intensità sonora diminuisca di 30 dB al cessare dell'impulso sonoro.
- *G*, Indice di robustezza |dB|: rappresenta il livello del suono percepito in uno spazio, comparato con il livello percepito in campo aperto ad una distanza pari a 10 m dalla sorgente. Viene definito come il rapporto logaritmico tra l'energia sonora (che corrisponde all'integrale della radice quadrata della pressione sonora) dell'impulso misurato con quello dell'impulso misurato alla distanza di 10 m come espressione nell'equazione (3.1).

p(t)=pressione istantanea del suono nel punto di misurazione

p10(t)=Pressione istantanea del suono a 10 m dalla sorgente

L_{pE}=Livello di pressione sonora prodotto dalla sorgente nel punto dove viene misurato *p(t)*

LpE,10= Livello di pressione sonora prodotto dalla sorgente nel punto dove viene misurato $p_{10}(t)$

$$G = 10 \lg \frac{\int_0^\infty p^2(t)\, dt}{\int_0^\infty p^2{}_{10}(t)\, dt} = L_{pE} - L_{pE,10} \quad |dB| \qquad (3.1)$$

- *C80*, Chiarezza |dB|: rappresenta la differenza tra l'energia che incide primariamente e quella che segue dopo 80 ms. All'aumentare del valore l'audio risulta più distinto e diminuisce la diffusione delle onde sonore prodotte dalla musica.
- STI, Speech Transmission Index, adimensionale: indica l'intelligibilità del parlato che può essere compromessa dalle riverberazioni, e il valore è compreso tra 0 e 1: si considera accettabile un valore maggiore di 0,5

3.2.2 Le misurazioni nei teatri all'aperto

L'analisi ha preso in considerazione i teatri nella condizione attuale e in quella del periodo Romano. Per quanto riguarda i teatri all'aperto, nella tabella 3.1.1 vengono riportate le misurazioni nelle due condizioni del teatro occupato dagli spettatori e non occupato: vengono illustrati di seguito i parametri relativi al tempo di riverberazione, l'indice di intensità, la chiarezza e l'intelligibilità del parlato. Sono stati misurati considerando le medie frequenze.

Considerando i casi dei teatri occupati e non occupati, mediamente si ha una differenza pari a 0,3 - 0,4 s nel tempo di riverberazione: questi infatti risultano più adeguati quando sono presenti gli spettatori che impediscono a una parte delle onde sonore di essere riflesse, accade soprattutto nel caso di Gerasa.

Per quanto riguarda l'indice di intensità, essendo il teatro di Siracusa molto più ampio di Gerasa ad esempio, di riscontra una minore intensità del suono. La valutazione della chiarezza e dello STI invece hanno dato esiti soddisfacenti, poichè l'assenza della copertura permette alle onde di disperdersi e senza generare sovrapposizione.

Tab. 3.1.1: I parametri calcolati nelle diverse configurazioni, (tratto da Rindel, J.H., Lisa, M., 2006).

	T_{30} [s]		G [dB]		C_{80} [dB]		STI		Diametro della cavea (m)
	Non occupato	Occupato	Non occupato	Occupato	Non occupato	Occupato	Non occupato	Occupato	
Aspendo epoca Romana	1,95	1,59	-2,34	-4,36	1,17	4,08	0,53	0,61	95,5
Aspendo attuale	1,89	1,53	-4,37	-6,09	2,68	6,53	0,6	0,7	95,5
Aspendo attuale (palco)	1,77	1,43	-4,49	-6,05	4,42	8,27	0,63	0,71	95,5
Gerasa epoca Romana	1,54	1,06	-0,72	-3,05	3,46	6,88	0,62	0,7	87,8
Gerasa attuale	1,21	0,86	-1,18	-3,29	5,98	9,85	0,67	0,75	87,8
Siracusa epoca Romana	1,81	1,67	-6,69	-8,24	4,07	8,25	0,62	0,7	138,6
Siracusa attuale	1,25	0,97	-10,6	-11,61	12,88	18,12	0,88	0,93	138,6

3.2.3 Le misurazioni negli Odea

Si tratta di strutture dotate di una copertura generalmente in legno utilizzate per l'esecuzione di brani musicali e spesso per un pubblico esclusivo e più ristretto: il materiale solitamente impiegato è la pietra nelle sue molteplici tipologie. Erano presenti finestre sulle finestre laterali per l'illuminazione e la ventilazione: queste insieme alla componente del pubblico rappresentavano i maggiori fattori di assorbimento delle onde sonore. Tra gli esempi scelti è stato scelto di paragonare i risultati ottenuti dalle simulazioni basate sulle ricostruzioni in epoca Romana, tuttavia sono state aggiunte anche le misurazioni effettuate sull'attuale teatro di Afrodisia.

Sono stati scelti due esempi che differiscono tra loro per dimensione e forma: l*'odeon* di Aosta era rettangolare e più grande, mentre quello di Afrodisia era semicircolare e d dimensioni più ridotte.

Comparando i risultati, si nota che il tempo di riverberazione è maggiore nel caso di Aosta, causato dal fatto di avere un volume superiore. Tuttavia la condizione attuale del teatro di Afrodisia presenta un numero ridotto di superfici riflettenti, di conseguenza il tempo di riverberazione è notevolmente inferiore in confronto ai modelli simulati. Nel modello simulato tuttavia, il tempo di riverberazione di Afrodisia è migliore rispetto all*'odeon* di Aosta, mentre l'intensità in entrambi i casi studio risulta soddisfacente. Il parametro della chiarezza e dello STI nel caso di Aosta descrivono un caso non adatto alle esibizioni teatrali, tuttavia risulta accettabile per la musica, mentre quello di Aphrodisias permette delle prestazioni migliori in entrambi i casi. Nella tab. 3.1.2 si trovano i valori nel dettaglio misurati in base alle medie frequenze.

Tab. 3.1.2: I parametri calcolati nelle diverse configurazioni (tratto da Rindel, J.H., Lisa, M., 2006).

	T_{30} [s]		G [dB]		C_{80} [dB]		STI		Diametro della cavea (m)
	Non occupato	Occupato	Non occupato	Occupato	Non occupato	Occupato	Non occupato	Occupato	
Aosta epoca Romana	5,97	3,49	7,14	4,26	-5,28	-2,41	0,36	0,43	59,6
Afrodisia epoca Romana	4,02	1,62	10,45	5,45	-4,21	1,86	0,38	0,55	45,6
Afrodisia attuale	0,37	0,24	6,42	3,95	15,19	23,21	0,85	0,9	22,5

3.3: La conferenza di Patrasso

Nel 2011 si è svolta una conferenza a Patrasso, organizzata dall'European Acoustics Association (E.A.A.) e dall' Hellenic Institute of Acoustics (HEL.IN.A.), con l'assistenza di E.A.A. Technical Committee on Room and Building Acoustics e dell'Associazione Italiana Acustica (AIA).

L'obbiettivo della conferenza era riunire gli esperti sull'argomento in modo da condividere le ricerche svolte e discutere gli aspetti collegati alle proprietà acustiche di questi antichi monumenti collocati nell'area del Mediterraneo e che vengono ancora usati per spettacoli di teatro o concerti.

Sono stati affrontati diversi aspetti di questa tematica, da quelli più legato alla cultura a quelli più tecnico-scientifici. I primi interventi sono stati l'esito di ricerche storiche e antropologiche sull'utilizzo di questi manufatti, prestando però particolare attenzione anche al contributo acustico che alcune scelte apparentemente formali potevano generare, mentre in seguito sono state descritte le misurazioni effettuate su alcuni casi studio, e infine sono state proposte delle soluzioni per la valorizzazione e il riuso: di seguito, verranno riportati i principali argomenti che sono stati affrontati.

3.3.1 Le Origini e le caratteristiche acustiche

All'inizio del V secolo a.C ad Atene è stato eretto un santuario dedicato a Dioniso ai piedi dell'Acropoli e nelle vicinanze è stato creato uno spazio circolare per le esibizioni devozionali.
Inizialmente gli spettatori si riunivano intorno a questa superficie, seduti su panche di legno disposte ai piedi della collina.
In seguito a un episodio avvenuto tra il 499 e il 496 a.C, in cui si è verificato un crollo delle sedute durante i giochi, e che ha causato la perdita di molte vite, la città di Atene ha creato un teatro sicuro e permanente all'interno del santuario di Dioniso.
Questo modello è stato poi ripreso in altre zone della Grecia, in Sicilia e nell'area Mediterranea in generale e veniva utilizzato per i giochi e per la rappresentazione di scene teatrali.
La buona qualità dell'acustica all'interno dei teatri antichi è dovuta alla forma dettata dalle proporzioni corrette: Le voci degli attori venivano amplificate sfruttando in maniera passiva la struttura, che compensava la progressiva diminuzione dell'intensità con l'aumentare della distanza poichè non erano presenti soluzioni elettroniche alternative.
Sono state usate varie soluzioni per accentuare questa caratteristica: alcune delle accortezze utilizzate sono la costruzione dell'orchestra e della *skené* con materiali riflettenti e l'utilizzo di elementi irregolari di fronte ai muri di sostegno.
A partire dalle ricerche di François Canac negli anni 50 del Novecento e considerando anche gli studi successivi, viene evidenziato che i teatri antichi presentano delle caratteristiche ricorrenti e che anche in seguito al degrado alcune di queste rimangono inalterate:

Si tratta nello specifico di:

- basso livello del rumore di fondo dovuto all'esterno
- disposizione armoniosa degli spettatori in uno spazio determinato dalle capacità e dai limiti della voce umana
-trasmissione regolare del suono rinforzato dalle riflessioni dovute all'*orchestra* e alla *skené*
- tempo di riverberazione ridotto e buona intelligibilità del parlato dovuta alla riduzione delle onde riflesse e attenuazione dell'eco.

L'unione delle onde sonore dirette e riflesse a in modo che queste si propaghino in uno spazio maggiore: per quanto riguarda il livello del suono, questo può aumentare di un valore compreso tra 2,5 a 5,5 dB, in relazione alla posizione della sorgente sonora. Di conseguenza si ha un buon livello di comfort acustico tra gli spettatori con un incremento medio di 1,5 dB tra le sedute comprese tra la parte centrale e quella superiore.

Canac considera il teatro antico come un manufatto geometrico complesso e lo descrive attraverso equazioni geometriche complesse: è possibile descrivere le proporzioni che legano le varie parti, ad esempio per il dimensionamento delle *Paraskenia*, in particolare l'ampiezza, si otteneva dalla derivata dal raggio dell'orchestra.

3.3.2 Lo sviluppo della skené

Gli antichi teatri greci, a differenza di quelli romani, utilizzavano il pendio della collina per creare delle file di sedute per gli spettatori intorno all'orchestra. A differenza di quanto affermato da Vitruvio non erano tutti rivolti verso sud, (ad esempio quello di Tindari è rivolto a nord e quello di Taormina a est): le cause che più probabilmente determinavano l'orientamento dell'asse principale del teatro sono la direzione prevalente dei venti e la direzione prevalente dei rumori di fondo.

L'utilizzo di un palco di legno, ha portato a una serie di convenzioni che hanno focalizzato l'attenzione del pubblico dietro all'orchestra: intorno al III e IV secolo a.C le strutture ellenistiche prevedevano che la *skené* fosse costruita in pietra, e questo aveva un impatto notevole sull'acustica essendo questo materiale più riflettente del legno usato in epoca Classica.
In seguito in età tardo ellenistica si è diffusa l'usanza di costruire la *skené* su 2 o 3 piani e questo contribuiva alla riflessione delle onde sonore favorendo il fenomeno dell'eco.
Per risolvere questo problema, la facciata della *skené* è stata decorata con elementi la cui volumetria era funzionale ad assorbire il suono con lo stesso principio degli attuali diffusori: in seguito, per massimizzare l'effetto, sono stati aggiunti elementi come tende e superfici in legno, che grazie alle proprietà dei loro materiali erano in grado di attenuare ulteriormente la creazione di onde riflesse.

Oltre alla *skené,* anche la superficie piana dell'orchestra contribuiva alla riflessione delle onde sonore. L'utilizzo di queste superfici riflettenti condizionava i movimenti degli attori: nel *proskénion*, la parte di orchestra immediatamente di fronte alle sedute, era più accentuato il riverbero, ossia si percepiva oltre all'onda sonora emessa dall'oratore la riflessione dovuta alla presenza della *skené* e della superficie dell'orchestra, e questo ostacolava l'intelligibilità del parlato.

3.3.3 La conoscenza dell'acustica in antichità: Vitruvio

Vitruvio nel quinto dei dieci libri scritti nell'opera De Architectura, analizza nello specifico i teatri costruiti in epoca greca e romana. Specifica inizialmente la collocazione ottimale per un teatro, che deve sorgere in un luogo salubre, dove la luce solare può illuminare totalmente la cavea durante il giorno, quindi questa deve essere rivolta a sud, per evitare il ristagno dell'aria umida. Suggerisce l'ubicazione in un luogo montuoso e la costruzione in pietra, e sostiene che ogni fila deve avere altezza inferiore alla propria estensione in lunghezza, per consentire un ascolto non difficoltoso anche nelle ultime file.

Successivamente distingue 3 tipologie di scena: tragica, comica e satirica. La prima è composta da colonne, frontespizi e statue, mentre nella seconda vengono rappresentati edifici privati con logge sporgenti e bucature, infine nel terzo caso sono presenti alberi e montagne, ad imitazione degli ambienti naturali.

Suddivide poi anche le tipologie di riflessione del suono che si creano all'interno del teatro in 4 categorie: *Dissonanti, Circonsonanti, Risonanti* e *Consonanti*. Nel primo caso si ha la sensazione che la voce venga respinta verso il basso, nel secondo caso la dissipazione del suono avviene in maniera troppo rapida, nel terzo caso l'onda viene riflessa e si percepisce il suono come duplicato, mentre nell'ultimo caso questo giunge chiaramente agli ascoltatori.

Il terzo caso fa riferimento all'eco, e nel 1986 questo è stato approfondito da L. Dietsch e W. Kraak, i quali hanno proposto un criterio per descrivere il fenomeno sia nel caso in cui la sorgente emetta della musica, sia nel caso di un discorso parlato. Si considera costante la relazione $|p_v|^n t_v$, dove p_v è l'ampiezza della pressione del suono, t_v corrisponde al ritardo in secondi, e n è un esponente costante. Si descrive così il tempo baricentrico t_s (3.2) che è un valore di riferimento per l'impressione spaziale e la chiarezza.

$$t_s = \frac{\int_{t=0}^{\tau} t|p(t)|^n \, dt}{\int_{t=0}^{\tau} |p(t)|^n \, dt} \qquad (3.2)$$

Prima di Dietsch e Kraak, t_s è stato descritto da Kürer nel 1996 come la sommatoria del prodotto delle componenti dell'energia dell'onda sonora riflessa moltiplicate per il corrispondente ritardo, in relazione all'energia totale (3.3).

$$t_s = \frac{\sum_i t_i E_i}{E_{ges}} \qquad (3.3)$$

All'aumentare del tempo baricentrico, maggiore è la percezione spaziale dell'ascoltatore: J. Hoffmeier sostiene che ci sia una correlazione tra il tempo baricentrico e l'intelligibilità del discorso alle ottave comprese tra 500 Hz, 1000 Hz, 2000Hz e 4000Hz.

Per la musica il tempo baricentrico ottimale è compreso tra 70 e 150 ms considerata l'ottava che ha come frequenza centrale 1000 Hz, mentre per il discorso parlato ts ottimale dovrebbe essere compreso tra 60 e 80 ms nelle 4 ottave comprese tra le frequenze centrali 500 Hz e 4000 Hz. Vitruvio inoltre afferma che fossero presenti dei vasi in rame all'interno della struttura, che avevano la funzione degli attuali risuonatori acustici, con lo scopo di aumentare la chiarezza del parlato, e non l'intensità della voce. È perciò probabile che fossero collocati sotto le sedute e che attenuassero le riflessioni responsabili dell'eco, e che fossero dimensionati in modo da assorbire le frequenze comprese tra 220 Hz e 880 Hz.

Oggi questo concetto in edilizia viene applicato tramite i risuonatori di Helmholtz, che sono efficaci alle basse frequenze: si tratta di un sistema composto da una massa cava dove avviene la risonanza (*V)*, una sezione di ingresso per le onde sonore (*S*), e collo che collega (*S*) a (*V*).

Si calcola perciò la frequenza di risonanza f_R, cioè la frequenza specifica che il risuonatore assorbe con efficienza massima (3.4):

$$f_R = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{V\,(l + 1{,}6a}} \quad |Hz| \qquad (3.4)$$

c = velocità del suono |m/s|
S = area della sezione d'ingresso |m²|
V = volume della cavità | m³|
l = lunghezza del collo |m|
a = raggio del collo |m|

Vitruvio sosteneva che i vasi dovessero essere installati nel *diazoma*, cioè il corridoio anulare che divide le gradinate in più settori, come precisato in precedenza, sotto le sedute: si tratta perciò di una grande intuizione, considerando che sono stati ritrovati manufatti risalenti al IV secolo a.C, anche se con le conoscenze odierne è di dubbia efficacia l'inserimento di risuonatori in rame nella muratura. Tuttavia sono stati ritrovati solo pochi casi relativi all'installazione dei vasi, non era infatti una pratica comune nella costruzione dei teatri greci e romani.

3.3.4 Il rumore di fondo in 20 casi studio

In seguito alle analisi presentato alla conferenza di Patrasso è stato osservato che bisogna anche considerare la componente dei rumori di fondo e per la valutazione si prendono in considerazione allora i seguenti criteri: densità spettrale, intensità totale, attenuazione del suono e tempo di riverberazione, che sono collegati al concetto di comfort acustico, e vanno a definire i concetti di timbro, chiarezza e intelligibilità del discorso.
Nelle esibizioni all'aperto il rumore di fondo copre una parte del suono proveniente dalla sorgente principale: alcuni esempi sono i rumori prodotti dagli spettatori che mormorano e si muovono, ma anche i rumori del traffico se nelle vicinanze è presente una strada.
Se questi sono presenti per la maggior parte del tempo, possono arrivare a ridurre drasticamente l'intelligibilità del discorso a causa della diminuzione dell'intensità del suono.
Sono stati stabiliti dei valori per classificare l'intensità acustica nei teatri all'aperto, e questi definiscono il comfort acustico *AC*:

- >25 dB = eccellente
- 20-25 dB = buono
- 15-20 dB = accettabile
- <15 dB = non accettabile

Nella ricerca condotta da Barkas, N., 2019, sono stati selezionati 20 teatri antichi ed è stato misurato il livello di pressione sonora SPL minimo del rumore di fondo totale e sono state specificate le cause del rumore di fondo con la relativa acquisizione del livello di pressione sonora anche di queste.
Si può notare che la fonti di rumore più significative siano la presenza di traffico nelle vicinanze e lo svolgimento di attività legate all'agricoltura.

Tab 3.3.1: Il caso dei 20 teatri greci antichi,(dati di Barkas, N., 2019).

Indice	Teatro	Collocazione attuale	Tipo di rumore	Fonti del rumore [dB]	SPL min [dB]
1	Anf. Oropos	Naturale	Occasionale	Traffico 37/Uccelli 41	32
2	Argos	Naturale	Permanente	Attività urbane 43/Traffico 46	37
3	Delphi	Semi urbana	Occasionale	Traffico46/Attività turistiche 50	34
4	Dilos	Naturale	Occasionale	Vento 40	27
5	Dion	Naturale	Occasionale	Uccelli 36/Agricoltura 39	31
6	Dioniso (Atene)	Urbana	Permanente	Traffico 45/Attività turistiche 54	38
7	Dodoni	Naturale	Occasionale	Vento34/Attività turistiche 36	27
8	Epidauro	Naturale	Occasionale	Vento 36/Attività turistiche 46	27
9	Eretria	Semi urbana	Permanente	Attività urbane 41/Traffico 47	39
10	Larisa	Urbana	Permanente	Attività urbane 45/ Traffico 62	43
11	Mantineia	Naturale	Occasionale	Ristorazione 41/Aeroplani 48	32
12	Maroneia	Naturale	Occasionale	Vento 45/Agricoltura 68	37
13	Megalopolis	Naturale	Occasionale	Ristorazione 35/Vento 41	32
14	Messini	Naturale	Occasionale	Vento 40/Agricoltura 46	35
15	Orchomenos	Semi urbana	Permanente	Attività religiose 46/Traffico 57	38
16	Philippi	Semi urbana	Permanente	Vento 44/Traffico 52	40
17	Thasos	Naturale	Occasionale	Vento 38/Attività costiera 44	36
18	Thira	Naturale	Occasionale	Vento 38/Aeroplani 58	29
19	Thorikos	Naturale	Occasionale	Uccelli 37/ Vento 48	34
20	Zea Piraeus	Urbana	Permanente	Traffico 52/Aeroplani 67	44

All'interno della ricerca è stato in seguito valutato il comfort acustico *AC* basato sulle seguenti ipotesi:

- L'attore si trova nella parte retrostante dell'orchestra
- *Lo,* che corrisponde al livello del suono della voce emesso dell'attore è pari a 82 dB quando lo sforzo vocale è normale e 87 dB quando lo sforzo vocale è più elevato e non sono presenti strumenti elettrici per potenziarlo. Non si tratta i livelli tratti presi dalla normativa ISO, ma sono stati acquisiti empiricamente.
- *Ld,* cioè l'attenuazione del suono dovuta alla distanza tra l'attore e le sedute
- *R,* che corrisponde all'incremento del livello sonoro dovuto all'amplificazione passiva dell'orchestra, pari a 3 dB, oppure la combinazione dell'effetto passivo dell'orchestra e della scena che provocano un aumento pari a 6,5 dB del livello di pressione sonora.
- *Nbn* corrisponde al rumore di fondo medio, maggiorato di 5 dB per comprendere la presenza degli spettatori durante la performance.

Si può allora descrivere il comfort acustico nei teatri antichi attraverso la formula (3.5) e valutarlo secondo il criterio precedentemente descritto.

$$AC = Lo - Ld + R - (Nbn + 5) \quad |dB| \tag{3.5}$$

3.3.5 Le condizioni attuali e le ipotesi di riuso

Le simulazioni e le registrazioni effettuate con i mezzi odierni tuttavia non descrivono esattamente le prestazioni che il teatro aveva in epoca greca, poichè in seguito a varie cause di tipo naturale, le condizioni attuali di conservazione potrebbero essere diverse da quelle in origine: le principali modifiche sono legate alla forma, ad esempio quasi nessun teatro antico conserva ancora il palco in legno che era presente nell'età Classica, e la scena spesso ha subito crolli parziali o totali delle strutture murarie. Inoltre anche i materiali che si sono conservati fino a oggi hanno subito modifiche, anche se non sono visibili ad occhio nudo: le pietre utilizzate per costruire le sedute e la scena conservati tutt'oggi, presentano indubbiamente vari degradi dovuti alla costante esposizione agli agenti atmosferici. In ogni caso ci si trova di fronte a dei palinsesti, delle strutture che portano i segni delle modifiche che sono state fatte nelle varie epoche e che spesso non sono documentate attraverso fonti scritte.

Ne subisce l'influenza anche il tema del riuso, come affrontare il restauro di una struttura simile: a seconda delle condizioni di conservazione, l'esibizione potrebbe svolta tra le rovine o all'interno di una costruzione stratificata spesso uno dei segni dell'intervento della civiltà Romana è l'estensione dell'orchestra e l'eliminazione di alcune file per trasformare il teatro in arena.

Essendo beni culturali, una delle strade percorribili secondo le linee guida attuali del restauro, potrebbe essere quella di non compiere una scelta tra le epoche storiche da valorizzare, ma inserire elementi odierni per riprendere la forma originaria. Non è consigliabile utilizzare materiali che non permettono facilmente di distinguere l'intervento odierno dall'eredità storica, siccome si perderebbe il limite che li distingue, come può essere la tipologia di materiali.

Dagli studi che sono stati effettuati sui teatri antichi emerge che il palco, che si trovava compreso tra la scena e l'orchestra, veniva costruito in legno, e in nessun teatro si è conservato intatto fino alla nostra epoca. Per tentare di avvicinarsi alla prestazione acustica del teatro in epoca antica viene suggerito da Barkas che potrebbe essere utile aggiungere una superficie riflettente removibile dove questo anticamente era presente: questa trovandosi più vicina alla sorgente rispetto alla scena riflette più efficacemente verso gli spettatori le onde sonore emesse dagli attori.

3.3.6 I casi presentati alla conferenza

Sono stati confrontate le analisi già effettuate sui teatri antichi, in particolare quelli trattati alla conferenza di Patrasso con le misurazioni relative ai teatri di Tindari e Siracusa. È stato quindi possibile confrontare le diverse prestazioni di questi e prendere visione dei materiali che li compongono, e quali caratteristiche presentano.

Tab. 3.3.2: Alcuni teatri antichi già analizzati in precedenza nell'ambito di diverse ricerche scientifiche

Fonti		Teatro	Simulato/misurato	Dettagli sulle misure	Parametri oggettivi misurati o simulati											Informazioni sui materiali	Distribuzione	Coefficienti di assorbimento acustico in frequenza									Scattering in frequenza									Diffusione in Frequenza (Hz)							
					T30 (s)	T20 (s)	EDT (s)	G (dB)	SPL	C80 (dB)	C50 (dB)	D50 %	STI	RASTI %	DRR			63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	8000 Hz	Medio (Hz)	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	8000 Hz	Medio (Hz)	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	8000 Hz
Rindel, JH., Lisa, M., Christensen,C.L.,Predicting the acoustics of ancient open-air theatres [...] Rindel, JH., Lisa, M., The ERATO project and its contribution to our understanding[...]	1	Aspendo Turchia	Misurato	Diametro della cavea=98 m	Vuoto= 1,89 Pieno=1,5 3			Vuoto=-4,37 Pieno=-6-09		Vuoto=2,68 Pieno=6			Vuoto=0,6 Pieno=0,7			Mattoni, pietra e macerie calcinate	Sedute: Pietra dura								0,05								0,7							
																	Proscenio: Pietra porosa								0,2								0,4							
																	Colonnato: Pietra porosa								0,2								0,2							
																	Palco: Legno								0,2								0,2							
Sánchez-Rivera, J.J., Vallejo Ortega, G.,Simulación acústica de un teatro romano: la Colonia Clunia Sulpicia	2	Clunia Sulpicia	Simulato	Diametro della cavea: 102 m	Medio: 2,13				50-60 dB			Medio ~63		62		Marmo, Legno	Orchestra, pareti divisorie nella cavea: Marmo riflettente		0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02												0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	
																	Pavimenti: Marmo a diffusione moderata		0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02												0,15	0,2	0,25	0,3	0,35	0,35	
																	Scale e scena: Marmo a diffusione elevata		0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02												0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,7	
																	Aperture:		0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99												0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	
																	Palco: Legno		0,19	0,14	0,09	0,06	0,06	0,05												0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,7	
																	Pubblico ad alta densità		0,52	0,68	0,85	0,97	0,93	0,85												0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,7	
Berardi, U., Iannace, G., The acoustic of Roman theatres in Southern Italy and some reflections for their modern uses	3	Benevento	Misurato	Diametro della cavea=93 m	(500-1000Hz): 0,91		(500-1000Hz): 0,76			(500-1000Hz): 9		78				Mattoni	Sedute		0,48	0,4	0,3	0,4	0,54	0,72											0,7							
	4	Cassino	Misurato	Diametro della cavea=53 m	(500-1000Hz): 0,55		(500-1000Hz): 0,34			(500-1000Hz): 19		91				Pietre e malta	Sedute		0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01																			
	5	Taormina	Misurato	Diametro della cavea=120 m	(500-1000Hz): 1,05		(500-1000Hz): 0,72			(500-1000Hz): 9		83				Terreno e mattoni	Cavea		0,4	0,25	0,35	0,4	0,4	0,16																			
	6	Pompei teatro grande	Misurato	Diametro della cavea= 60 m	(500-1000Hz): 0,85		(500-1000Hz): 0,83			(500-1000Hz): 8		70	0,62			Tufo	Cavea		0,15	0,18	0,2	0,35	0,35	0,4																			
Hatziantoniou, P., Kountouras, M., Tsiflas, N.A., Measurements and Analysis of the Epidaurus Ancient Theatre Acoustics	7	Epidauro	Simulato	Diametro della cavea=119 m	Medio: 1								80																												
Gounaris, C., Chourmouziadou K., Tsitiltzi N., Kalliris, G., The Roman odeion of Nicopolis [...]	8	Nikopolis	Misurato	Diametro della cavea= 92 m	Medio: 0,5 - 0,6							80 - 85				Mattoni, pietra, Legno, Velarium	Mattoni		0,09	0,07	0,05	0,05	0,05	0,05																			
																	Pietra		0,04	0,05	0,06	0,06	0,07	0,09																			
																	Legno		0,15	0,11	0,1	0,07	0,06	0,07																			
																	Velarium		0,05	0,03	0,35	0,4	0,5	0,5																			
Berardi, U., Iannace, G., Maffei, L., Virtual reconstruction of the historical acoustics of the Odeon of Pompeii	9	Pompei (odeon)	simulato	Diametro della cavea= 34 m	(500-1000Hz): 0,7					(500-1000Hz): 9			76			Pietra, Legno	Scena		0,41	0,41	0,41	0,41	0,5	0,7																			
																	Orchestra		0,05	0,06	0,1	0,11	0,12	0,14											Sedute: 0,7 Scena e Orchestra: 0,5							
																	Cavea		0,2	0,2	0,28	0,28	0,28	0,28																			
																	Tetto		0,19	0,14	0,09	0,06	0,06	0,02																			
Bo Elena, Archaeoacoustics, from antiquity to nowadays Contemporary use of the classical ancient architecture for performing arts	10	Teatro di Tindari	Misurato: fonte dodecaedro	Diametro della cavea= 76m	Medio: 0,55	Medio: 0,58		-4,7			12,6				0,1	Pietra, Terreno , legno	Cavea/scenae frons/podium: pietra		0,36	0,39	0,43	0,5	0,52	0,49	0,47			0,1	0,1	0,46	0,65	0,77	0,83	0,85								
																	Podio inferiore:pietra		0,19	0,23	0,28	0,37	0,37	0,37	0,36			0,1	0,1	0,21	0,39	0,5	0,56	0,58								
			Misurato: fonte petardo	Diametro della cavea= 76m	Medio: 0,56	0,58		-5,8			12				2,1		aperture nel podio		0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9			0	0	0	0	0	0	0								
																	cunei non conservati/Pavimento: terreno		0,4	0,54	0,65	0,7	0,68	0,62	0,62			0,1	0,3	0,73	0,87	0,9	0,92	0,95								
																	Nuove sedute: legno		0,1	0,08	0,05	0,04	0,05	0,05	0,05			0,1	0,1	0,14	0,26	0,38	0,45	0,48								
			Simulato	Diametro della cavea= 76 m		Medio: 0,48					9,57						Nuovo palco: legno		0,12	0,09	0,05	0,04	0,03	0,03	0,03			0,1	0,1	0,14	0,26	0,38	0,45	0,48								
Lopez, F.,Kostara-Kestantinou, E., Ancient Theatres, Machines designed for listenig, a scenary proposed for the ancient theatre of Tyndaris, p. 215	11		Misurato: dodecaedro	Diametro della cavea: 76 m		0,53	0,12	-4,9			12,6				2,42	Pietra, Terreno , legno	Cavea/resti/podium	0,36	0,36	0,39	0,43	0,5	0,52	0,49											0,55							
																	aperture nel podio	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9											0,05							
																	Nuove alzate	0,4	0,4	0,54	0,63	0,67	0,66	63											0,5							
																	Nuove sedute	0,1	0,1	0,08	0,05	0,04	0,05	0,05											0,2							
																	Cunei non conservati/Pavimento	0,4	0,4	0,54	0,65	0,7	0,68	0,62											0,8							
																	Pannello vibrante	0,12	0,12	0,09	0,05	0,03	0,03	0,03											0,2							
Bo E., Archaeoacoustics, from antiquity to nowadays Contemporary use of the classical ancient architecture for performing arts	12	Teatro di Siracusa	Misurato: petardo in SI	Diametro della cavea= 105m		0,81		-5,5			14,9				0	Pietra dura, Pietra porosa																										
			Simulato	Diametro della cavea= 105m		Medio: 0,78					Medio: 14						Gradini della Cavea		0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1			0,1	0,1	0,46	0,65	0,77	0,83	0,85								
																	Aditii maximi		0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9			0	0	0	0	0	0	0								
																	Pavimento dell'orchestra		0,05	0,05	0,06	0,07	0,09	0,08	0,08			0,1	0,1	0,14	0,26	0,38	0,45	0,47								
																	Pavimento della scena frons		0,48	0,64	0,77	0,83	0,8	0,74	0,74			0,1	0	0,73	0,87	0,9	0,92	0,95								
																	Pavimento della scena frons: pietra porosa		0,48	0,64	0,77	0,83	0,8	0,74	0,74			0,1	0	0,73	0,87	0,9	0,92	0,95								
Farnetani, A., Investigation on the Acoustics of Ancient Theatres [...]	13	Teatro di Delphi	Misurato	Diametro della cavea=50m		Medio: 0,55										Pietra dura																										

3.4: La norma ISO 3382-1:2009

Il progetto ERATO essendo stato sviluppato tra il 2003 e il 2006 ha utilizzato come riferimento la norma ISO 3382:2000, ma successivamente sono state apportate alcune modifiche, infatti attualmente è in vigore la norma ISO 3382-1:2009, che stabilisce un metodo per l'ottenimento del tempo di riverberazione e della risposta all'impulso tramite un suono interrotto in uno spazio chiuso per performance, per cui non è esattamente adeguata per la valutazione dell'acustica dei teatri all'aperto. Più precisamente questo metodo è finalizzato all'ottenimento di una curva di decadimento attraverso la registrazione del decadimento del livello della pressione sonora dopo aver inserito nella stanza un suono limitato nel tempo.

La prima parte è dedicata agli spazi per lo spettacolo e stabilisce alcune definizioni: per quanto riguarda il tempo di riverberazione si afferma che sia il tempo necessario perchè il suono diminuisca di 60 dB al cessare dell'impulso. Successivamente si trova la nota 2 che stabilisce che il tempo si può anche valutare per un intervallo minore: se si considera ad esempio l'intervallo di 20 dB, da 35 dB a 5 dB, il parametro deve essere indicato come T_{20}, mentre se si decide che questo sia di 30 dB, da 35 dB a 5 dB si classifica come T_{30}.

Viene stabilito inoltre che per le misurazioni è necessaria una fonte sonora omnidirezionale, poichè il suono prodotto da questa subisce una minore influenza dal rumore di fondo rispetto a quello prodotto da una fonte direzionale. Per quanto riguarda il posizionamento dei ricevitori invece, viene suggerito di posizionarli dove normalmente si collocano gli spettatori, e che possano rappresentare l'intero spazio. La risposta all'impulso può essere misurata direttamente utilizzando una sorgente sonora come uno sparo, o qualsiasi suono non riverberante, che produca un livello di pressione sonora maggiore almeno di 35 dB di quello del rumore di fondo.

È possibile inoltre ottenere il valore del decadimento in funzione del tempo secondo l'equazione (3.6)

$$E(t) = \int_t^\infty p^2(\tau)\, \mathrm{d}\tau = \int_\infty^t p^2(\tau)\, \mathrm{d}(-\tau) \tag{3.6}$$

p = pressione della risposta all'impulso in funzione del tempo
E = energia della curva di decadimento in funzione del tempo
t= tempo

Mentre il tempo di riverberazione è una descrizione fondamentale dell'acustica di un auditorium, ci sono valori che descrivono in maniera più complessa la qualità dell'acustica: queste sono qualità soggettive che si ottengono integrando direttamente le risposte all'impulso. Nella seguente tabella vengono riportati i valori, e per ciascun gruppo è raccomandato calcolare almeno uno tra i parametri indicati.

Tab. 3.4.1: ISO 3382-1:2009, Le grandezze acustiche in base agli aspetti soggettivi.

Subjective listener aspect	Acoustic quantity	Single number frequency averaging [a] Hz	Just noticeable difference (JND)	Typical range [b]
Subjective level of sound	Sound strength, G, in decibels	500 to 1 000	1 dB	–2 dB; +10 dB
Perceived reverberance	Early decay time (EDT) in seconds	500 to 1 000	Rel. 5 %	1,0 s; 3,0 s
Perceived clarity of sound	Clarity, C_{80}, in decibels	500 to 1 000	1 dB	–5 dB; +5 dB
	Definition, D_{50}	500 to 1 000	0,05	0,3; 0,7
	Centre time, T_S, in milliseconds	500 to 1 000	10 ms	60 ms; 260 ms
Apparent source width (ASW)	Early lateral energy fraction, J_{LF} or J_{LFC}	125 to 1 000	0,05	0,05; 0,35
Listener envelopment (LEV)	Late lateral sound level, L_J, in decibels	125 to 1 000	Not known	–14 dB; +1 dB

3.5: Il progetto *ATHENA*

L'UNESCO nel 2000 ha stabilito la necessità per i siti archeologici di dotarsi di un Piano di Gestione che deve assicurare l'efficienza delle decisioni in materia di tutela, valorizzazione e uso del patrimonio culturale, promuovendo nuove connessioni tra l'eredità culturale e i territori. Il progetto europeo *ATHENA* (*Ancient THEatres for new Actualities*) è nato per promuovere e sviluppare la gestione e l'utilizzo dei teatri antichi, che sono le strutture più adatte alla condivisione di un patrimonio culturale, sociale, economico comune nel Mediterraneo, attraverso l'adozione di norme per uso e conservazione.

Questo piano di gestione non deve essere considerato come una lista di regole da seguire, ma come un manuale con indicazioni flessibili e adattabili al caso, applicabile non solo ai siti indicati come patrimonio mondiale (*WHL*), ma esteso a tutti i territori per contribuire a un processo di conservazione e sviluppo. Il rafforzamento del collegamento tra la popolazione, il patrimonio culturale e il territorio è la chiave di lettura del progetto *ATHENA*.

Sono stati coinvolti in questo progetto i teatri di diversi paesi del Mediterraneo (Giordania, Algeria, Spagna e Italia) e ogni paese è caratterizzato da una missione diversa, ma con l'obiettivo comune di definire una strategia sostenibile integrata nel tessuto socio-economico, in modo che le strategie più avanzate fossero messe in comune, in modo da raggiungere un utilizzo più consapevole dei teatri antichi.

L'Italia in modo particolare è stata tra le nazioni che ha accolto con più entusiasmo questo progetto, a causa dell'elevato numero di siti archeologici presenti sul territorio: a seguito di ciò, il Ministero per i Beni e le Attività Culturali nel 2004 ha creato una sezione a parte per l'implementazione della Convenzione per la *Protezione del Patrimonio Mondiale Culturale e Naturale*, e dopo un anno è stato redatto il *"Progetto di definizione di un modello per la realizzazione dei Piani di Gestione dei siti UNESCO.*

La *Carta di Siracusa per la conservazione, fruizione e gestione delle architetture teatrali antiche* è un documento promosso dalla Regione Sicilia, a seguito di queste direttive e frutto di diversi documenti sul tema dei teatri antichi come *La Costitution of the European Network of the ancient places of spectacle,* su iniziativa del Consiglio di Europa*, La Dichiarazione di Segesta,* a cura della Rete Europea e dalla *Carta sull'uso dei luoghi antichi di spettacolo* promossa e ratificata dal Consiglio di Europa, dall'Unione Europea e dall'*UNESCO*.

Gli obiettivi proposti dal progetto *ATHENA* sono i seguenti:

- Armonizzare la planimetria esistente: ogni piano per la conservazione riferito a teatri antichi e siti archeologici deve essere coordinato in modo da non interferire con le tutele già in atto nei Piani Regolatori Generali: è stata inoltre decisa la possibilità di stabilire standard europei comuni.
- Conoscenza: Necessità di sviluppare un piano di ricerca in modo da non tralasciare nessuno degli obiettivi già raggiunti dagli studi precedenti. Gli scavi e gli studi sui resti archeologici devono essere condotti con l'obiettivo di incrementare i sapere comune.
- Sviluppo economico: Nel progetto *ATHENA* è stato concordato che gli investimenti economici devono essere concordati tra i privati e gli Enti pubblici in modo che sia il sito e la popolazione locale a beneficiarne. È inoltre necessario che le attività culturali vengano organizzate in modo da permettere che il bene venga fruito appieno, evitando sovraffollamento tra le visite, durante gli spettacoli teatrali. La cultura locale deve essere integrata tra gi obiettivi del piano di gestione.

Conservazione: l'uso di strutture teatrali antiche rappresenta un'opportunità per mantenere viva la tradizione classica antica dell'arte drammatica, ma la mancanza di pianificazione e di un protocollo condiviso può accelerare il processo di degrado del teatro. È necessario perciò proporre attività che rispettino la natura fragile di tale manufatto.

Il *MiBAC* ha proposto un modello di azione definito *dal generale al particolare* perchè restituisce uno sguardo sul territorio in 3 diverse analisi: preparatoria, delle risorse del patrimonio e socio-economica.

Il Progetto *ATHENA* invece per la prima fase ha rilanciato una visione opposta: a partire dall'analisi del particolare si tende a valorizzare un intero territorio, creando così l'opportunità di instaurare una rete di collaborazione e condivisione dei risultati su un territorio vasto come l'area Mediterranea.

Nella fase iniziale sono stati creati questionari per raccogliere informazioni su diversi ambiti: gestione, patrimonio costruito, attività svolte nel sito, servizi di tipo scientifico, per gli eventi speciali e ricreativi, quantità dei visitatori, economia locale, e utenti interessati alla conservazione del patrimonio.

I teatri presi in considerazione per lo sviluppo di questo progetto sono quelli di Petra, Tipasa, Cartagine, Siracusa e Merida.

Nella seconda fase è stata proposta un'analisi più completa a partire dagli aspetti analizzati in precedenza. I temi trattati si dividono in:

- Aspetti tecnici:
  - Conoscenza storica del teatro
  - Stato di conservazione del teatro
  - Rischi e minacce
- Aspetti economici
  - Associazioni e fondazioni
  - Risorse ordinarie e speciali
  - Fornitori dei servizi per il teatro
  - Sponsors
  - Economia locale
- Aspetti intangibili
  - Gli spettacoli antichi nel teatro
  - Descrizione dell'attività tradizionale
  - Centro di formazione per le attività culturali
- Aspetti giuridici
  - Regime di proprietà
  - Sistema di tutela e pianificazione urbana
  - Standard di sicurezza a livello locale e nazionale
- Dalla teoria alla pratica
  - Aggiornamento e sviluppo della conoscenza
  - Regolamentazione dell'utilizzo
  - Linee guida per un uso compatibile
  - Manuale per l'utilizzo dei teatri antichi
  - Strategia economica

Le linee guida sono contenute nel manuale *Athena Project: Prototype of Management Plan for Enhancement of New Actualities* pubblicato dall'Instituto del Patrimonio Arquitectonico di Valencia.

Fig. 3.4.1: La localizzazione dei teatri antichi nell'area del Mediterraneo

I teatri nel Mediterraneo

Italia
Agrigento
Brescia
Fiesole
Gubbio
Luni
Bevagna
Roma
Serra Orlando
Otricoli
Ostia Antica
Pompei
Segesta
Spoleto
Siracusa
Taormina
Trieste
Tindari
Volterra
Solunto

Spagna e Portogallo
Ronda la Vieja
Mérida
Tarifa
Calatayud
Peñalba de Castro
Cartagena
Santiponce
Màlaga
Medellin
Lisbon
Saelices
Tarragonia
Osuna

Francia:
Autun
Lyon
Orange
Arles
Fréjus
Vaison-la-Romaine
Vienne

Turchia
Kas
Arif
Belkiz
Geyre
Selçuk
Bodrum
Pamukkale
Bozoluk
Balat
Demre
Kelemis
Bargama
Aksu
Tekinova
Minare Köyü
Güllübahçe
Eski Antalya
Kale
Fethiye
Güllük
Kõnõk

Grecia
Vergina
Egira
Kamarina
Kòrinthos
Delfi
Delos
Athìna
Illida
Epidauros
Eretria
Githio
Isthimia
Mantinea
Megalopoli
Mavromati
Milos
Mytilene
Nikopolis
Krenides
Kiato
Pustogradske
Thessaloniki

3.6: La Carta di Siracusa

Si tratta di un documento che indica alcune linee guida per la conservazione, fruizione e gestione delle architetture teatrali antiche, inquadrata giuridicamente come D.D.G. n. 827 del 15 aprile 2010 ed è frutto, tra le altre normative, anche di quanto concordato nel progetto ATHENA.

La Carta di Siracusa afferma la necessità di incrementare la conoscenza in funzione della conservazione, e costruire modelli innovativi di organizzazione e gestione degli studi ed esperienze sul patrimonio, che valorizzino le potenzialità locali e attivino i processi partecipativi nell'individuazione delle soluzioni e strategie più opportune. Promuove l'identificazione di percorsi e strategie di divulgazione diffusa, per condividere le conoscenze e le esperienze sulla realtà teatrale antica del Mediterraneo. La comunità scientifica deve condividere la volontà di diffondere le esperienze di ricerca, promuovendo la realizzazione di pubblicazioni divulgative e scientifiche che illustrino dei risultati delle attività di conoscenza o dell'attuazione di interventi su questo tipo di manufatti. L'importanza che riveste il teatro antico all'interno del patrimonio culturale di una regione determina la necessità di definire un'offerta divulgativa, a disposizione dei fruitori dell'area archeologica o degli spettatori degli eventi teatrali che vi si realizzano: questa deve essere pertanto minimamente invasiva, aggiornabile, integrata con il sistema di comunicazione previsto per l'area archeologica, funzionale.

Nell'allegato tecnico 2 vengono trattati i temi di diagnostica, monitoraggio, conservazione e restauro e viene ribadita l'importanza che la comunità scientifica svolge nella tutela di questo patrimonio.

Inoltre al restauro che intende porre rimedio a realtà di degrado in avanzata evoluzione, ma che può arrecare sostanziali modifiche, deve preferirsi una cura costante, e l'applicazione di una diagnostica sintomatica di profilassi, con controlli periodici e il coinvolgimento dei diversi saperi.

Le indagini devono accertare, nella specificità del singolo teatro, i parametri di sostenibilità dell'attività teatrale e la fruibilità dei diversi spazi dell'edificio e del contesto ambientale valutando:

- le caratteristiche e la resistenza di elementi a rischio
- i carichi sostenibili nelle distinte aree dell'edificio teatrale
- le emissioni acustiche e le relative sollecitazioni indotte sulle murature
- l'incidenza della pressione antropica nell'attivazione di processi di usura.

La conservazione delle architetture teatrali antiche deve basarsi sulla conoscenza critica ed il recupero delle tecniche storiche costruttive e conservative, individuando uno specifico percorso di indagine che utilizzi tecniche diagnostiche congrue, economicamente e tecnicamente, con gli obiettivi, e prevedendo interventi che garantiscono efficacia preventiva e compatibilità.

È necessario che gli interventi siano tracciabili per una corretta definizione delle prassi conservative, che devono riguardare anche il contesto ambientale di riferimento. Sono ammissibili, gli interventi di restauro finalizzati ad interrompere o mitigare drasticamente l'evoluzione dei processi di degrado, che migliorano l'efficienza strutturale e dei materiali costitutivi, ed elevano i livelli prestazionali, per consentire un'adeguata e sostenibile fruizione dell'edificio e del suo contesto ambientale. Gli interventi devono essere:

- Limitati al minimo intervento, senza ricostruire intere parti mancanti
- Reversibili
- Chiaramente identificabili
- Che non arrechino impatti negativi sul monumento

È consentito proporre interventi per ottimizzare l'acustica del teatro o definire una scenografia idonea.

Capitolo 4

Il Teatro di Tindari

4.1 Inquadramento territoriale e storico

La città greca di Tyndaris fu fondata da Dionigi di Siracusa intorno al 396 a.C. in un lembo del territorio dell'antica Abacaenum in posizione strategica, già sede di un abitato dell'età del bronzo; Occupata in seguito dai Cartaginesi fino al 257 a.C, fu conquistata da Ottaviano Augusto nel 36 a.C. Divenne una delle più fiorenti città della Sicilia durante l'età imperiale,come documentano le sue vestigia. In diverse fasi della sua storia subì ingenti danni e distruzioni: per una frana nel I secolo d.C. e per due violenti eventi sismici nel IV secolo d.C ed infine alla devastazione ad opera delle popolazioni arabe nell'836 d.C.

Tindari si trova all'interno della Città Metropolitana di Messina ed è una tra le frazioni che sorgono intorno all'attuale comune di Patti, sulla costa tirrenica.

Esplorata e studiata già nel XVIII e nel XIX secolo, è stata oggetto di indagini sistematiche e di impegnativi interventi di restauro dal dopoguerra grazie a G. Cultrera e negli anni '60, sotto la direzione di L. Bernabò Brea e di M. Cavalier e con la collaborazione di N. Lamboglia dell'Istituto di Studi Liguri.

In base ai resti visibili delle mura l'estensione della città in età romana può essere stimata intorno ai 27 ettari. L'Impianto urbano della città probabilmente è rimasto analogo dalla fondazione fino all'epoca imperiale, presentava un tessuto regolare intelligentemente adattato alla particolare geomorfologia del sito, con isolati (*insulae*) dell'ampiezza di circa 30 m. e della lunghezza di circa 78 m, costituiti dall'incrocio ortogonale di tre principali arterie viarie(decumani) in direzione sud-est-nord-ovest, ciascuna della larghezza di otto metri, con una serie di strade trasversali di larghezza minore (cardines) in discesa,ciascuna ampia tre metri.

PLANIMETRIA GENERALE

Scala 1:5000

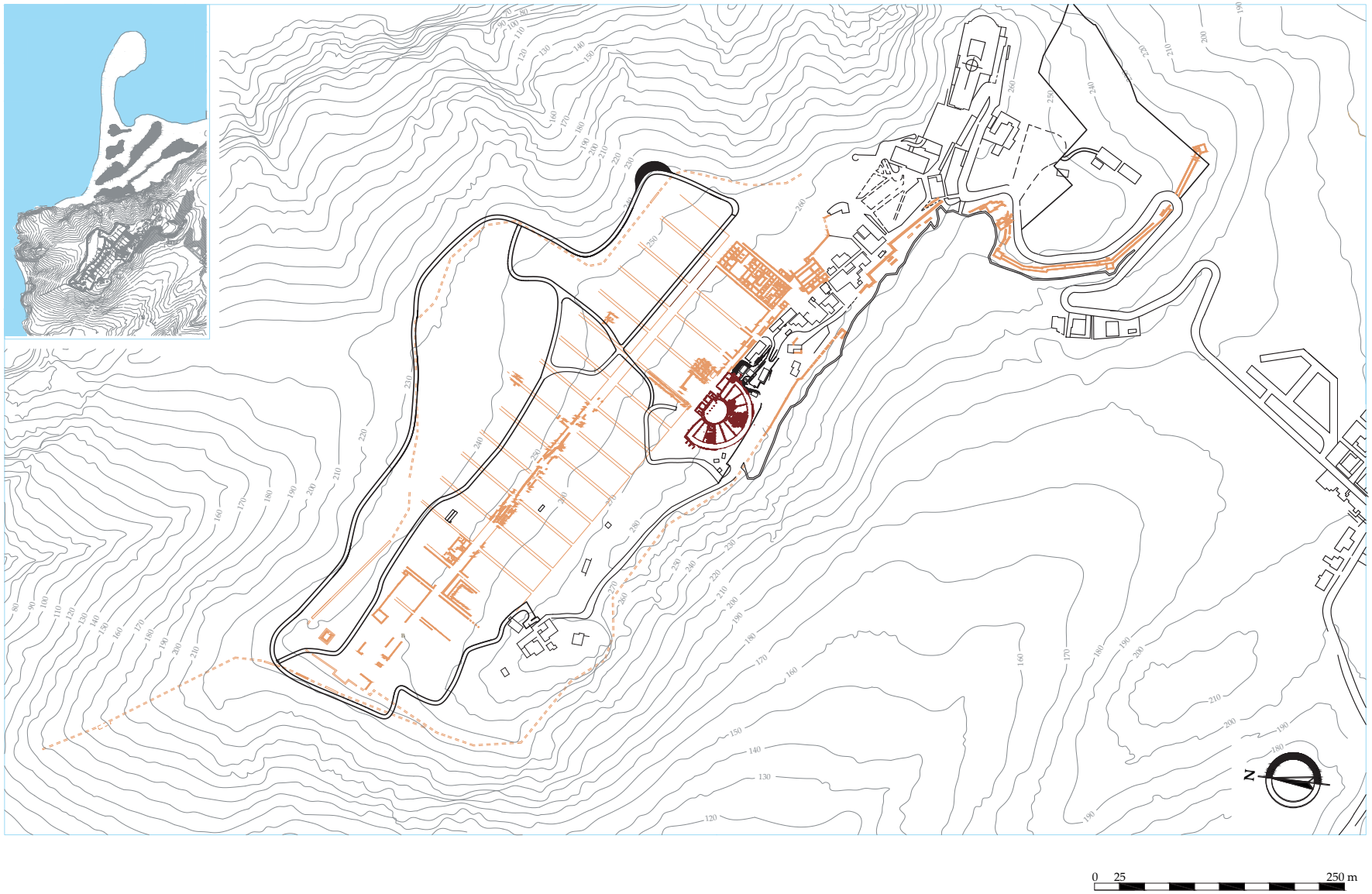


Fig. 4.1.1: Planimetria del sito (a cura del Parco Archeologico di Tindari).

4.1.1 Descrizione del teatro attuale

Il teatro ha origini greche ed è stato costruito con blocchi di pietra arenaria tra la fine del IV secolo a.C., E l'inizio del III secolo a.C e successivamente modificato dai romani per adattarlo ai giochi circensi. Si può affermare che sia stato costruito in periodi differenti: la cavea, o *kòilon*, è stata il primo intervento, seguito dall'edificazione della *skené* intorno alla metà del III secolo. I Romani hanno apportato alcune modifiche intorno al 22 a.c. per trasformare il teatro in un'arena: il livello dell'orchestra è stato abbassato di 0,90 m e le prime quattro file del teatro sono state distrutte per costruire un podio alto 2,5 m, e probabilmente era presente un doppio colonnato sulla sommità della *cavea*. In epoca greca, solitamente, nei teatri al centro dell'orchestra era situato il *thymeli,* che inizialmente era semplicemente un altare, in seguito veniva anche usato come postazione per mettere in risalto un attore o un politico durante un dibattito. Le opere teatrali si svolgevano all'interno dell'orchestra e in particolare nel proscenio, ossia di fronte alla *skené*. Lateralmente tra la skené e le sedute si trovavano i due ingressi principali, chiamati *parodoi*, utilizzati sia dagli attori che dal pubblico. La *skené* ellenistica in pietra pare non essere stata modificata durante il periodo Romano ma è crollata successivamente, perciò le condizioni attuali sono frutto di interventi successivi. La cavea in pietra attualmente presenta delle lacune e alcune parti sono state ricoperte con un telaio metallico removibile su cui vengono fissate alcune tavole di legno in occasione degli spettacoli.

4.1.2 Gli scavi nell'area archeologica: le fasi storiche del teatro

La prima menzione del teatro di Tindari si trova nel volume *Viaggio per tutte le antichità di Sicilia* scritto da Ignazio Paternò Castello, principe di Biscari, nel 1781 *<< Scrisse forse il Fazello sull'altrui poco accurate relazioni, giacchè non fa ricordanza di molte altre stimabili antichità, e principalmente del Teatro, che oggi in buonissimo stato si conserva, e che in miglior essere dovea vedersi due Secoli addietro in tempo del Fazello. Esiste ancora la gradinata di questo Teatro, formata di grosse pietre, e verisimilmente avea sull'estremo una Loggia, come mostrano alcuni pezzi caduti.>>* . In precedenza però, nel 1770 Jean Houel visitò la Sicilia e Scrisse il saggio *Voyage pittoresque des iles de Sicile, Malte e Lipari*, pubblicato poi ne 1782, corredato da una veduta d'insieme e da una tavola di rilievi che comprendeva la planimetria, una sezione, i particolari della gradinata. Il rilievo era limitato alla cavea perchè la scena non era più visibile, i resti oggi esistenti, sono stati scoperti durante le campagne di scavo archeologico nel Novecento. Dal rilievo di Houel si legge che i cunei in origine erano undici ed esistevano due muri curvilinei perimetrali sulla sommità del teatro: questo conduce all'ipotesi che fosse presente un colonnato come quello del teatro di Taormina.

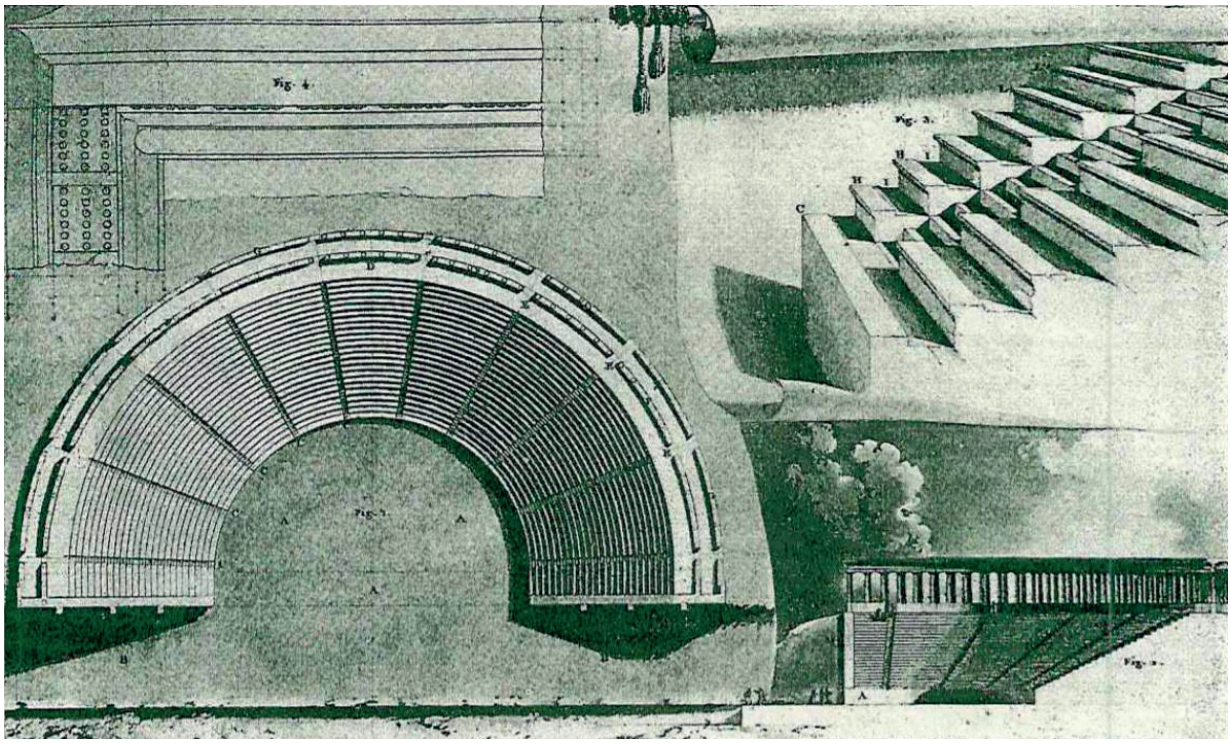


Fig. 4.1.2: Ricostruzione della configurazione originaria del Teatro di Tindari, Voyage pittoresque des isles de Sicile, de Malta et de Lipari, (tratto da Bernabò Brea, L., 1965).

Anche dai rilievi realizzati da Francesco Ferrara pubblicati nell'opuscolo dedicato a Tindari nel 1814 erano presenti i muri perimetrali.

L'edificio scenico fu messo in luce poco dopo l'esecuzione del rilievo condotto da Domenico Lo Faso duca di Serradifalco nel 1842, infatti la Commissione delle Antichità della Sicilia iniziò gli scavi nel 1842 ma questi furono interrotti nel 1845. Questa campagna di scavo non interessava solo il teatro, ma anche *il Ginnasio*, le case romane e le mura: tutti i risultati sono contenuti nel *Bullettino dell'Istituto di Corrispondenza Archeologica* del 1848.

Nel 1928 Bullé eseguì un ulteriore rilievo e propose una ricostruzione grafica, giudicata attendibile dagli studiosi successivi: la descrizione di Bullé pertanto è relativa alla condizione del teatro dopo gli scavi del 1845. Non era stata realizzata alcuna opera di consolidamento delle strutture allora emerse, lo scavo è parso invece troppo invasivo agli occhi degli archeologi successivi, che lo hanno ritenuto un probabile responsabile del cedimento di alcune porzioni dell'edificio scenico.

Nel 1930 l'archeologo Paolo Orsi, evidenziò il lento e progressivo scivolamento delle pietre della cavea verso l'orchestra: questo era dovuto al fatto che il muro romano del podio e il muro greco dell'*analemma* fossero in parte crollati, ma anche allo slittamento delle fondazioni di quello occidentale.

La Soprintendenza delle Antichità della Sicilia tra febbraio 1938 e gennaio 1939 intraprese alcune opere di restauro per consolidare la struttura: i direttori dei lavori furono il Soprintendente Prof. Giuseppe Cultrera e l'Arch. Sebastiano Agati.

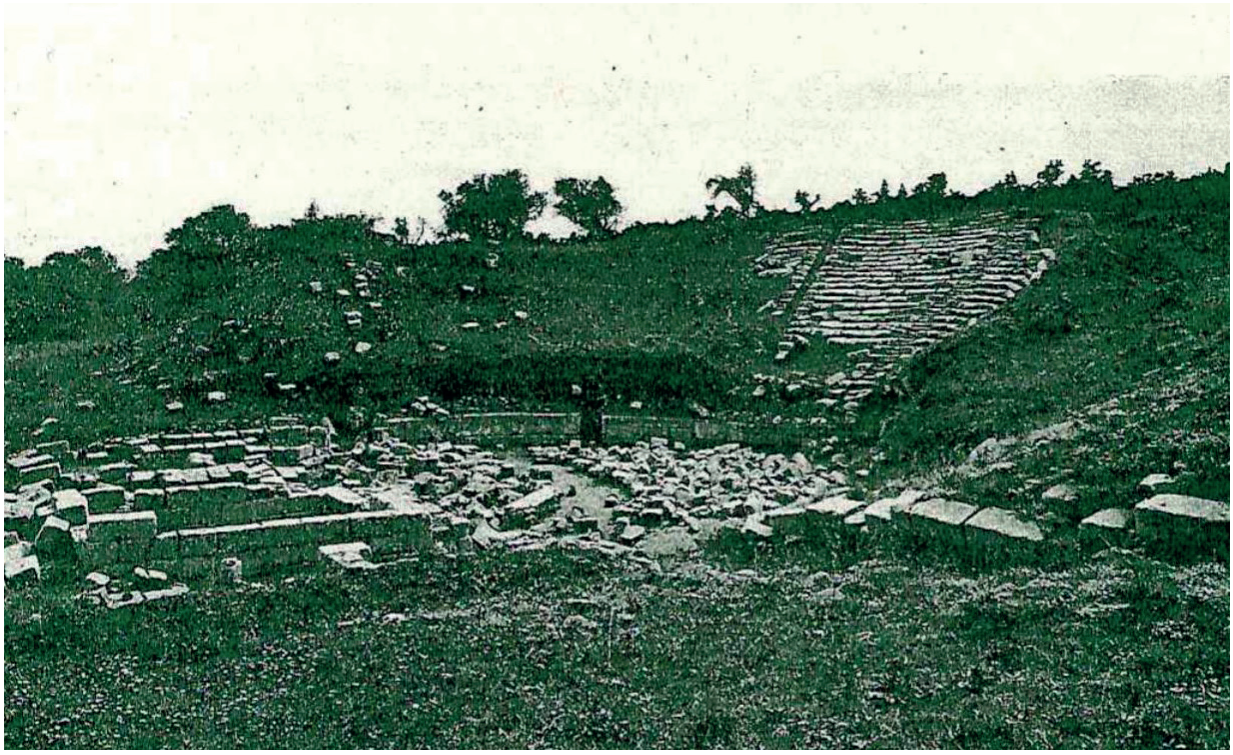


Fig. 4.1.3: Resti del teatro greco romano (tratto da Bernabò Brea, L., 1965).

Il restauro prese in considerazione unicamente la cavea e non modificò i resti della scena. Il crollo delle parti superiori degli *analemmata,* cioè dei muri laterali di contenimento della cavea, verso i *parodoi* e il crollo del podio dell'arena verso l'orchestra aveva fatto sì che la massa terrosa su cui erano state impostate le gradinate fosse scivolata a valle anch'essa.

Siccome si tratta di una terra ad alto rischio sismico, è possibile che oltre agli agenti atmosferici quali l'acqua e il vento, i terremoti verificatisi nei secoli abbiano contribuito al crollo degli *analemmata*,del podio e allo scivolamento dei blocchi verso l'orchestra: tuttavia, non è possibile attribuire una causa certa ad uno dei fenomeni sismici più rilevanti che si sono verificati con epicentro nella provincia di Messina prima del 1938.

Tab. 4.1.1: Petrucci Giampiero, elenco dei terremoti con magnitudo superiore a 5.5 avvenuti in provincia di Messina, 2012.

Data	Magnitudo(Richter)	Epicentro	Descrizione
91 a.C.	M = 6.3	Reggio Calabria	Il Terremoto provoca distruzioni a Reggio Calabria, Messina e Tindari descritte nelle opere dello storiografo greco Strabone.
24/03/0017	M = 5.1	Fiumefreddo di Sicilia	Il Terremoto provoca distruzioni a Tindari, Patti. L'evento è documentato da consoli Tiberio Giulio Cesare Augusto e Germanico Giulio Cesare. Dagli storici Publio Cornelio Tacito, Gaio Giulio Solino, Plinio il Vecchio. Lo studioso Alain Manesson Mallet lo colloca nell'anno 18 d.C., le scosse sismiche causano verosimilmente la frana e i crolli che cancellano la parte orientale di Tindari.
361-363	M = 6.3	Stretto di Messina	Datazione difficile (per alcuni autori 363, per altri 374). Interessa le sponde dello Stretto e per questo viene paragonato, pur essendo meno potente, a quello del 1908. Diversi morti e crolli sia a Reggio Calabria che Messina, probabilmente colpite anche da tsunami Avvertito anche alle Eolie e nella Sicilia settentrionale, con danni a Tindari. Collegato, tramite archeosismologia, ad anomalie nel tessuto urbano e territoriale, con spopolamento temporaneo delle cittadine costiere
853	M = 6.4	Messina	Il Terremoto provoca distruzioni a Reggio Calabria e Messina. Definito "grande terremoto".
25-02-1509	M = 5.6	Reggio Calabria	Il Terremoto provoca distruzioni a Reggio Calabria e Messina. Sciame sismico di lunga durata
25-08-1613	M = 5.6	Naso	Terremoto con effetti distruttivi a Naso e in tutti i centri della costa tirrenica della provincia di Messina
27-031638	-	Piana di Sant'Eufemia	Terremoto della Calabria del 27 marzo 1638 o «Terremoto delle Palme». Il terremoto è avvertito a Reggio Calabria, Messina e provincia con scosse pari al VI grado della Scala Mercalli. Nel messinese provoca danni
08-06-1638	-	Crotone	Terremoto della Calabria dell'8 giugno 1638. Il terremoto è avvertito a Reggio Calabria, Messina e provincia con scosse pari al VI grado della Scala Mercalli. Nel messinese provoca danni
11-01-1693	M = 7.7	Val di Noto	Il sisma più violento mai registrato in Italia. Ancora dibattuta la sede esatta dell'epicentro (in mare?). Una cinquantina le città rase al suolo tra cui Modica, Buscemi, Sortino, Noto, anche Catania. Devastata tutta la val di Noto. Gravi danni a Caltagirone, Siracusa, Augusta. Edifici lesionati a Messina, Reggio Calabria, Malta. Seguono repliche per quasi due anni. Molti paesi verranno ricostruiti in altro sito. Morti accertati 54mila, probabili 60mila. Nella sola Catania muoiono 16mila persone, a Ragusa il 50% della popolazione. Segue uno tsunami lungo 200 km di costa, da Messina al Golfo di Noto, con run-up di 12 metri ed ulteriori ingenti danni

10-05-1739	M = 5.5	Naso	Terremoto con effetti distruttivi a Naso e in tutti i centri della costa tirrenica della provincia di Messina.
14-09-1780	M = 4.8	Raccuja	Terremoto con effetti distruttivi a Raccuja e in tutti i centri della costa tirrenica della provincia di Messina
10-03-1786	M = 6.2	Oliveri	Terremoto con effetti distruttivi a Oliveri e in tutti i centri della costa tirrenica della provincia di Messina. Crolli e gravi lesioni a Patti, San Piero Patti, Tindari, Naso, Milazzo.
16-11-1894	M = 6.1	San Procopio	Terremoto con effetti distruttivi e gravi danni nelle città e province di Reggio di Calabria e Messina. La scossa è stata avvertita in tutta la Calabria e Sicilia. Evento sismico altrimenti noto come Terremoto della Calabria meridionale del 1894.
28/12/1908	M = 7.1	Messina e Reggio Calabria	Il terremoto più grave del Novecento in Italia, il più forte degli ultimi 200 anni. Messina e Reggio rase al suolo. Gravissimi danni anche a Ganzirri, Pace e Villa S. Giovanni. Scosse avvertite fino a Napoli e Campobasso. Mai accertato con esattezza il numero dei morti, certamente superiore a 60mila e prossimo a 80mila. Ancora dibattuta la questione dell'epicentro: o in terra, tra Archi e Gallico, oppure nello Stretto, davanti a Reggio. Associato un violento tsunami, con run-up fino a 12 metri, dovuto principalmente ad una frana sottomarina originatasi davanti Giardini Naxos. Tsunami che colpisce sia la costa siciliana che quella calabrese, con danni ingenti ma numero di vittime limitato
15/01/1940	M = 5.3	Villabate	Terremoto con effetti distruttivi a Raccuja e in tutti i centri della costa tirrenica della provincia di Messina.
14/04/1978	M = 6.1	Golfo di Patti	Epicentro nel golfo di Patti. Scossa poco prima della mezzanotte. Danni ingenti a Patti dove crollano 70 edifici, diversi feriti ma nessuna vittima: la ricostruzione porta al progressivo abbandono del centro storico. Danni anche a Vulcano e lesioni nella costa settentrionale siciliana fino a Milazzo: Barcellona Pozzo di Gotto, Castroreale, Ficarra

Il podio romano era ed è tuttora diviso in quattro parti da tre nicchie che offrivano riparo ai combattenti durante i giochi con le belve: la porzione compresa tra la nicchia mediana e quella occidentale era interamente scomparso al momento dei restauri del 1938, e fu per tanto ricostruita in muratura laterizia.

Successivamente sono stati rimessi in luce i resti del muro di contenimento occidentale e riassestati: dopo aver ricostruito le due murature di sostegno laterali, fu riportata la massa terrosa utile a ricostituire il *koilon.* Tuttavia essendo i muri di contenimento laterali più bassi rispetto all'altezza originaria, anche la massa di terreno riportato fu minore di quanto previsto, ma ciò contribuì notevolmente a ricondurre il teatro verso la sua forma originaria.

Per impedire che il terreno scivoli nuovamente verso l'orchestra, sono stati costruiti dei muri interni di imbrigliamento ad entrambi gli estremi del *koilon,* invisibili all'osservatore perchè sepolti nel riempimento stesso, con la funzione di contenere la spinta a valle.

Una volta riassestato il terreno è stato possibile sistemare su di esso le gradinate scivolate nell'*orchestra*: fu ricostruito il quinto cuneo (iniziando la numerazione da est), e le due scalinate di delimitazione laterale. In seguito sono state ricostruite parti del quarto, sesto, e nono cuneo, e la scalinata verso l'ottavo.

Il primo restauro è stato eseguito in maniera accurata, accostando ai blocchi rimasti in situ quelli scivolati nell'orchestra, non prima di aver effettuato una numerazione meticolosa di tutti i blocchi che vi si trovavano, per non perderne traccia durante la ricomposizione.

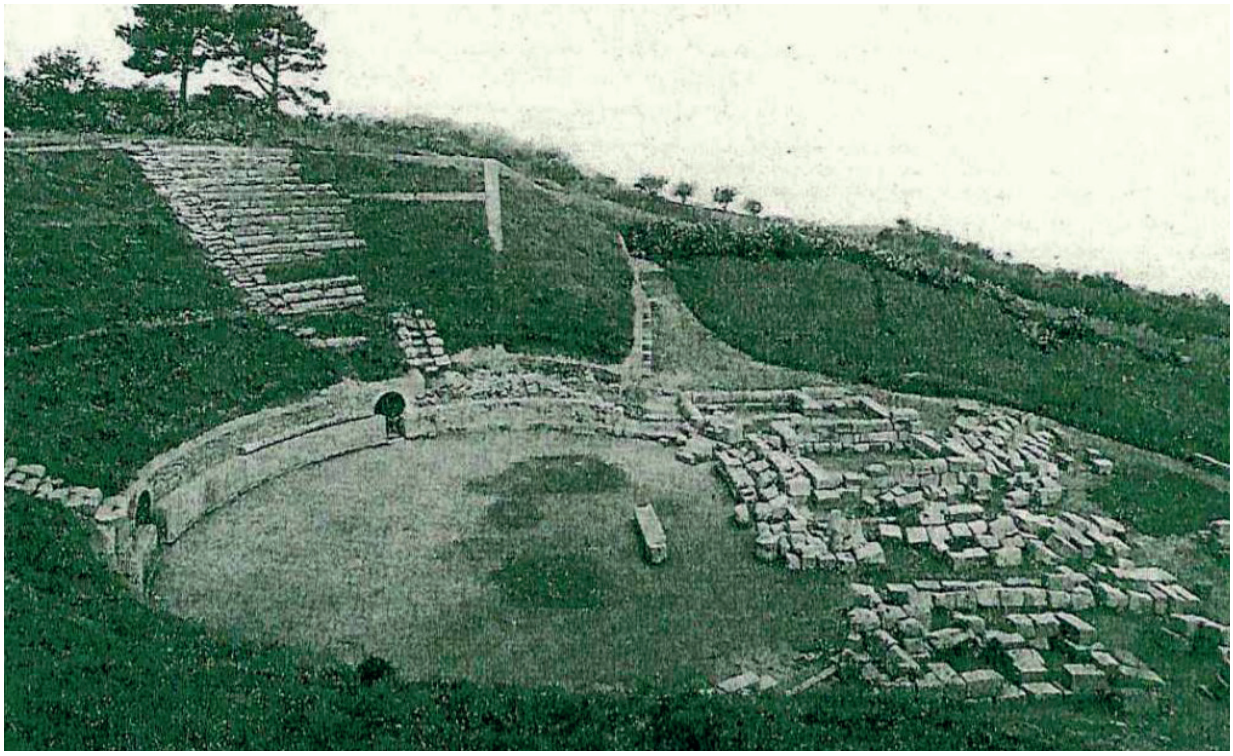


Fig. 4.1.4:La metà occidentale del koilon come si presentava prima dei nuovi restauri, la briglia di contenimento del 1938 raffiora in superficie (tratto da Bernabò Brea, L., 1965).

Nel marzo 1960 la Soprintendenza iniziò una nuova serie di restauri utilizzando i finanziamenti della Cassa per il Mezzogiorno inizialmente e dopo con il contributo del Ministero della Pubblica Istruzione. I lavori furono diretti da Luigi Bernabò Brea e Madeleine Cavalier ed eseguiti da Raffaele Bottaro, Tindaro Sidoti, Francesco d'Angelo sotto la supervisione del Cav. Vittorio Veneziano. I lavori furono incentrati sia sul *koilon* che sull'edificio scenico. Per quanto riguarda il *koilon,* si mirò a completare le opere iniziate precedentemente, fu messo in luce completamente l'*analemma* laterale e fu creata una strada di accesso alla parte superiore della *summa cavea.*

Successivamente si aggiunse la quantità di terra necessaria per riportare pienamente la forma all'origine nascondendo i muri di nuova costruzione. Si cercò di fare in modo che le acque del piano sovrastante al *koilon* non scendessero lungo di esso erodendolo, ma scendendo lungo i due lati laterali. Infine si riunirono tutti i blocchi appartenenti a gradini o alle scalette fra cunei in situ e nelle immediate vicinanze. Si ricostruì la parte inferiore del terzo cuneo con tratti delle due scalette adiacenti, e alcune parte del secondo e quarto.

Dopo l'abbassamento del piano di calpestio dell'orchestra in epoca romana è stato necessario costruire un canale di drenaggio sotterraneo per lo smaltimento delle acque piovane.

Inoltre pare che probabilmente l'abbassamento del terreno dell'*orchestra* sia una delle cause che hanno contribuito al crollo della scena, poichè questo avrebbe favorito la rotazione e il crollo dei filari superiori.

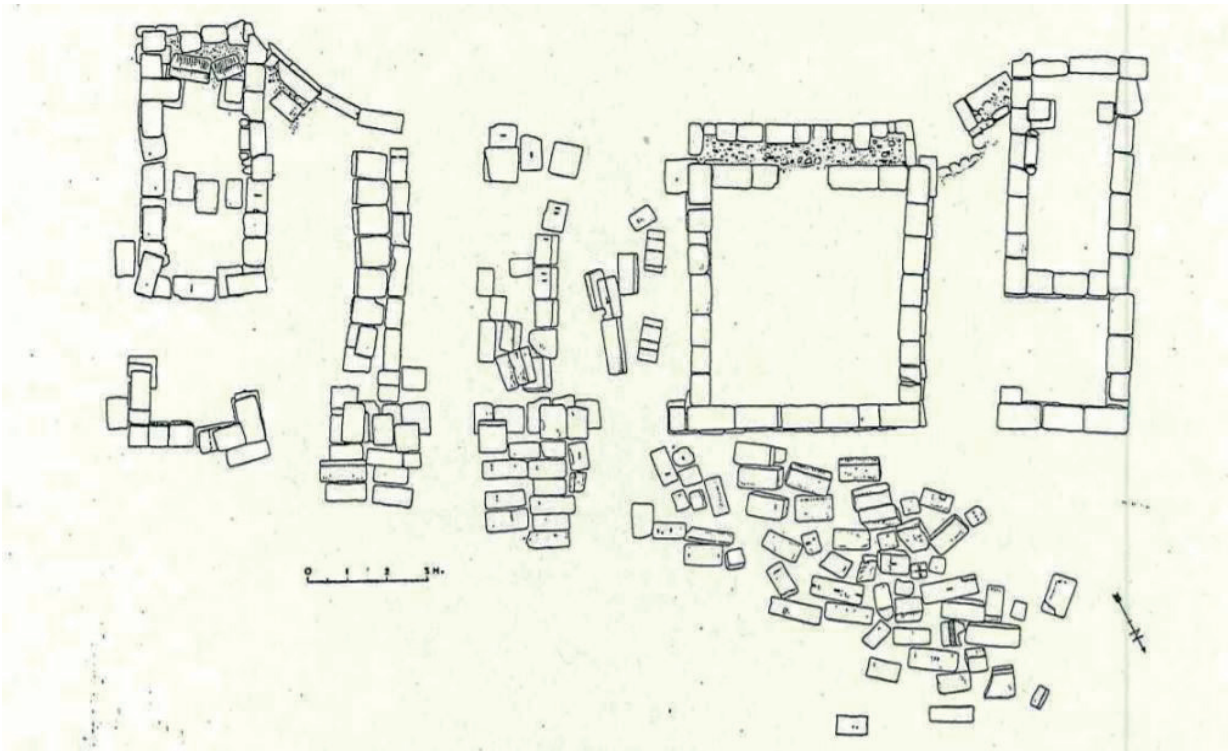


Fig. 4.1.5:Planimetria dell'edificio scenico prima del restauro iniziato nel 1960, (tratto da Bernabò Brea, L., 1965).

La metà occidentale dell'edificio risultava meglio conservata, probabilmente perchè il primo scavo archeologico non aveva asportato una quantità eccessiva di materiale terroso come era accaduto per la parte orientale. Per rendere stabili i blocchi rimanenti ed impedire un progressivo scivolamento all'interno del terreno, è stata fatta una gettata di pietre al di sotto dei blocchi rimanenti. Con i blocchi presenti nell'area della scena sono stati ricostruiti in maniera parziale gli elevati, rendendo chiara la struttura in pianta. È stato ricostruito infine l'arco che caratterizza gli attuali resti della scena, che in base ai conci rinvenuti in situ appariva evidentemente composto da undici conci, comprese le basi d'imposta. Altri componenti della scena sono stati invece archiviati nei pressi del piccolo *Antiquarium*. Non tutti i blocchi appartenenti alla scena furono rinvenuti nei pressi della stessa, ma alcuni sono stati rinvenuti all'interno delle mura bizantine, poichè riutilizzati dopo il crollo della struttura scenica, e altri ai piedi della collina.

Fanno parte dell'ultimo restauro anche il rilievo completo, la ricostruzione grafica in pianta del teatro in età romana e un plastico raffigurante la *scenae frons* in scala 1:10 eseguiti da Francesco D'Angelo

Il modello sembra presentare un numero molto limitato di elementi incerti, la sua struttura è stata determinata in base agli elementi rinvenuti durante la campagna di scavo e si discosta leggermente dall'ipotesi avanzata in precedenza da Boullé.
Si può quindi affermare definitivamente che il *koilon* fosse in origine diviso in undici cunei da dieci rampe di scale. Il numero esatto delle gradinate delle sedute al momento del secondo restauro non era noto, ma era certo che in epoca romana ne fossero state rimosse quattro per trasformare l'*orchestra* in arena.
Le gradinate presentavano una struttura particolare: erano determinate in alzato da un blocco di pietra, mente sul piano della seduta era presente anche una fascia terrosa oltre al lato del blocco di pietra. I blocchi dei sedili erano di varie lunghezze, lavorati solo sulla faccia frontale e superiore e posavano direttamente sulla terra. Durante la seconda campagna di restauro è stato ricostruito il terzo cuneo e alcune parti del secondo e quarto ad esso adiacenti.
Quando in epoca romana è stata trasformata l'orchestra in arena, i blocchi rimossi sono stati riutilizzati per erigere la muratura del podio alta circa 2,5 m, e le arcate in esso presenti: il podio era poi rivestito con lastre di marmo come era in uso per le arene romane: è difatti presente un incavo per l'appoggio delle *crustae marmoree*. In quel momento inoltre, sono state rinforzate le murature degli *analemmata,* che al contrario delle ipotesi avanzate in precedenza, sono state costruite ad angolo ottuso: nei pressi delle fondazioni inoltre, questi muri risultavano spessi fino a 1,5 m mentre sulla sommità, dove la spinta diminuisce, era sufficiente uno spessore pari a 1 m.

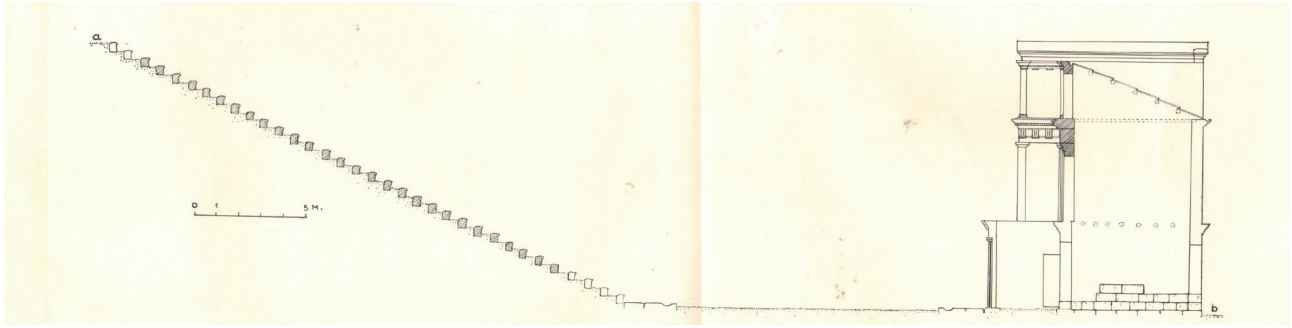


Fig. 4.1.6:Ricostruzione della sezione delle sedute in epoca greca e della scena (tratto da Bernabò Brea, L., 1965).

Fig. 4.1.7: Particolare del podio, in primo piano l'incavo per l'appoggio delle crustae marmoree (tratto da Bernabò Brea, L., 1965).

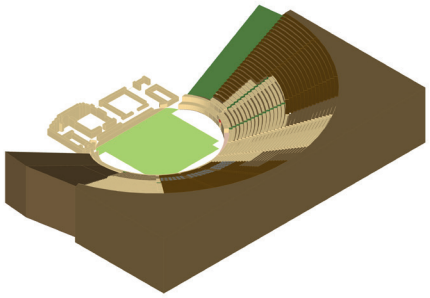
Il rivestimento marmoreo fu interamente asportato quando il teatro fu abbandonato, probabilmente riutilizzato in una delle chiese vicine oppure bruciato per ricavarne la calce.
È possibile inoltre che l'arena romana occasionalmente venisse utilizzata anche per spettacoli teatrali, era necessario in quel caso il montaggio di un palco in legno all'interno dell'arena. Un'ulteriore modifica che probabilmente subì il teatro in epoca romana fu la costruzione di un doppio muro perimetrale curvilineo sulla sommità della cavea, che nella forma riprendeva il colonnato del teatro di Taormina. Questa ricostruzione è stata possibile poichè sono state rinvenute le fondazioni in pietrisco e calce magra di una delle due murature disegnate da Houel durante il rilievo del teatro di Tindari.

Benabò Brea ha ipotizzato che la scena fosse crollata a causa di un terremoto in età tardo-imperiale e che i blocchi furono reimpiegati nella ricostruzione delle antiche mura di cinta che presumibilmente avvenne all'inizio dell'era bizantina, con l'inizio delle incursioni nemiche. Fu costruita poi nel IX secolo una seconda cinta di mura dal raggio più ridotto, che comprendeva la basilica e l'agorà, ma non il teatro: le fortificazioni tuttavia non furono sufficienti a risparmiare la città dalla conquista da parte dei Bizantini nel 535 e dagli Arabi nel 836, dai quali venne completamente distrutta, e in seguito a cui il teatro scomparve sotto la vegetazione, che lo custodì fino al suo ritrovamento.

Fig. 4.1.8: I resti della scena ricomposti nel restauro coordinato da Bernabò Brea, Tindari, (foto di Mangano, B.,2015).

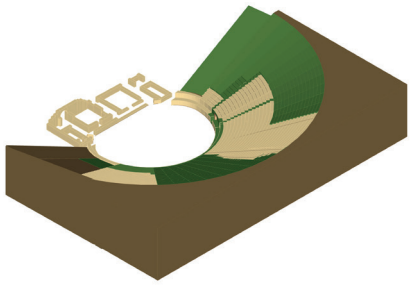
Ricostruzione delle fasi storiche

2015



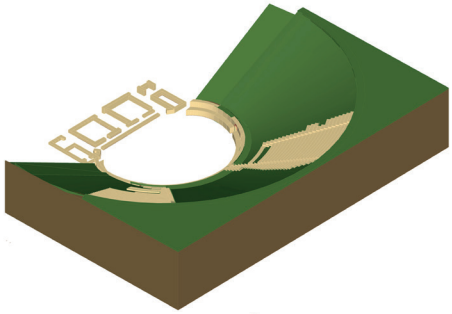
Aggiunte:
- Sedute in legno
- Sedute in plastica
- Pedana in legno

1965



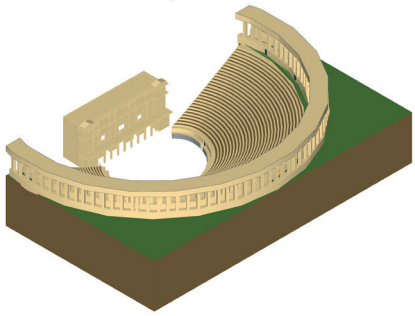
- Ultimazione del secondo restauro iniziato nel 1938
- Ricomposizione dei resti della scena

1939



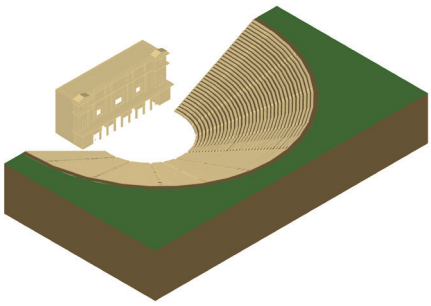
- Inizio degli interventi di restauro nel 1938
- Interventi di consolidamento del terreno
- Ricollocamento delle sedute in pietra

fine I sec a.C



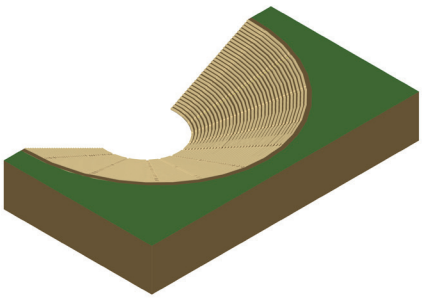
- Costruzione del colonnato
- Abbassamento del piano di calpestio di 0.9 m
- Rimozione di 4 gradinate

metà III sec a.C



- Costruzione della scena

fine IV sec a.C



- Costruzione della *cavea*

Fig. 4.1.9: I modelli SketchUp delle diverse configurazioni del teatro di Tindari

Ognuna delle parti che lo compongono ha un ruolo specifico nell'acustica del complesso: il teatro inclinato garantisce una visuale corretta e un angolo idoneo all'ascolto, il piano su cui si trovava l'orchestra sfrutta la vicinanza con la sorgente e permette al suono di essere riflesso verso la cavea, l'assenza di una copertura permette la dispersione in campo aperto e evita il fenomeno dell'eco, e la *skené* riflette il suono nella direzione del pubblico.
Tuttavia, non è solo la componente geometrica che influisce sulla resa acustica di un luogo, ma anche i materiali che lo compongono: nella configurazione originaria in particolare, i blocchi che costituiscono le sedute del *koilon* e la *skené* sono in pietra arenaria, inoltre bisogna considerare l'apporto del pavimento dell'orchestra in terra battuta e del terreno ai lati della cavea.

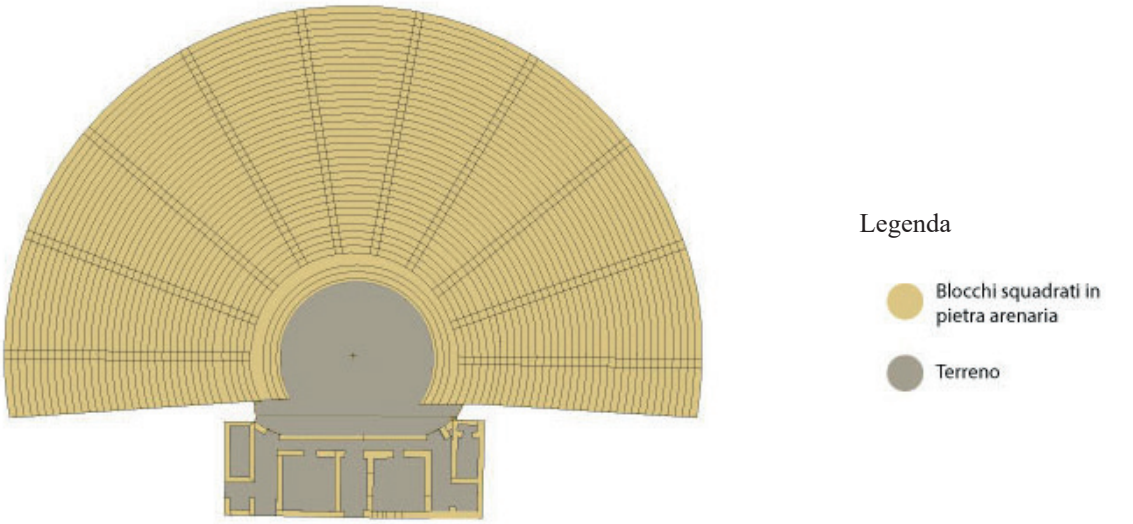


Fig. 4.1.10: La configurazione originaria del teatro, elaborazione grafica dell'autrice.

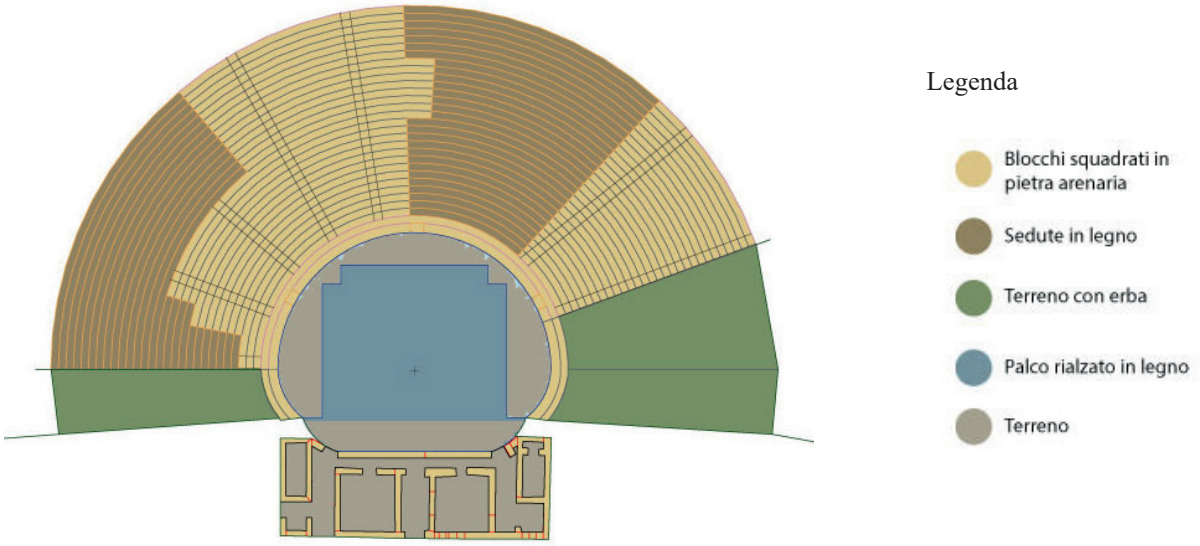
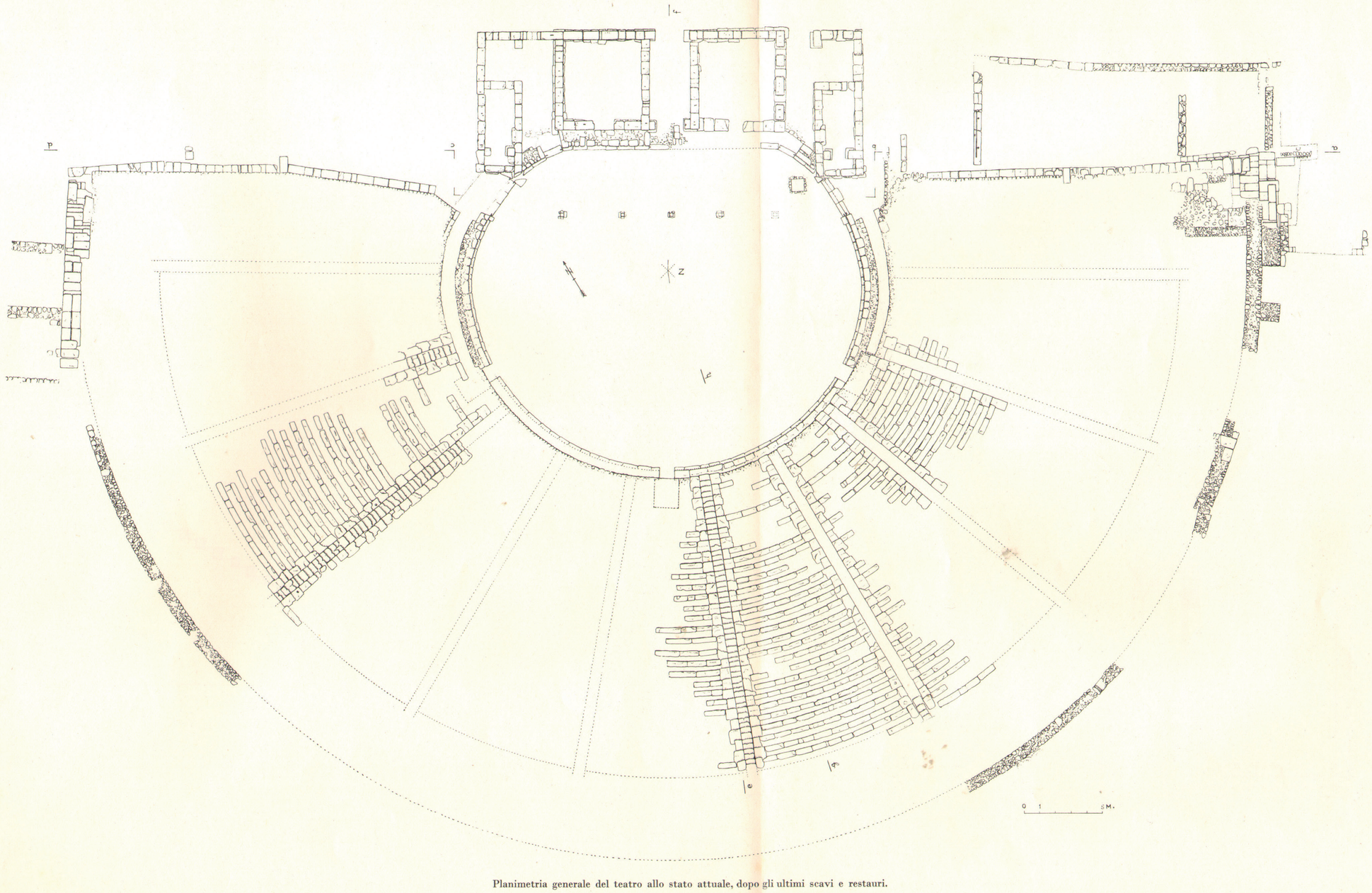
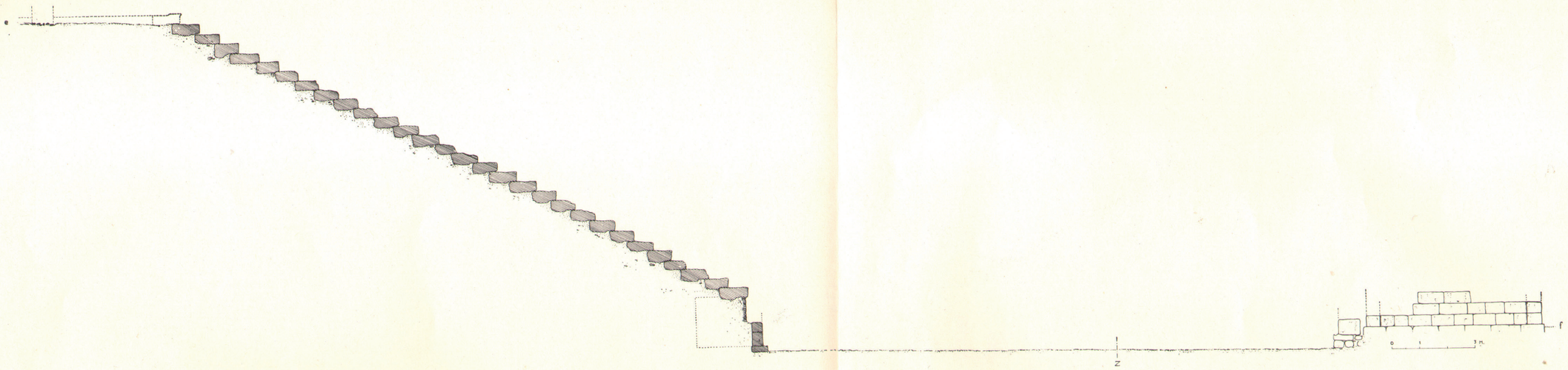


Fig. 4.1.11: La configurazione del teatro nel 2015.

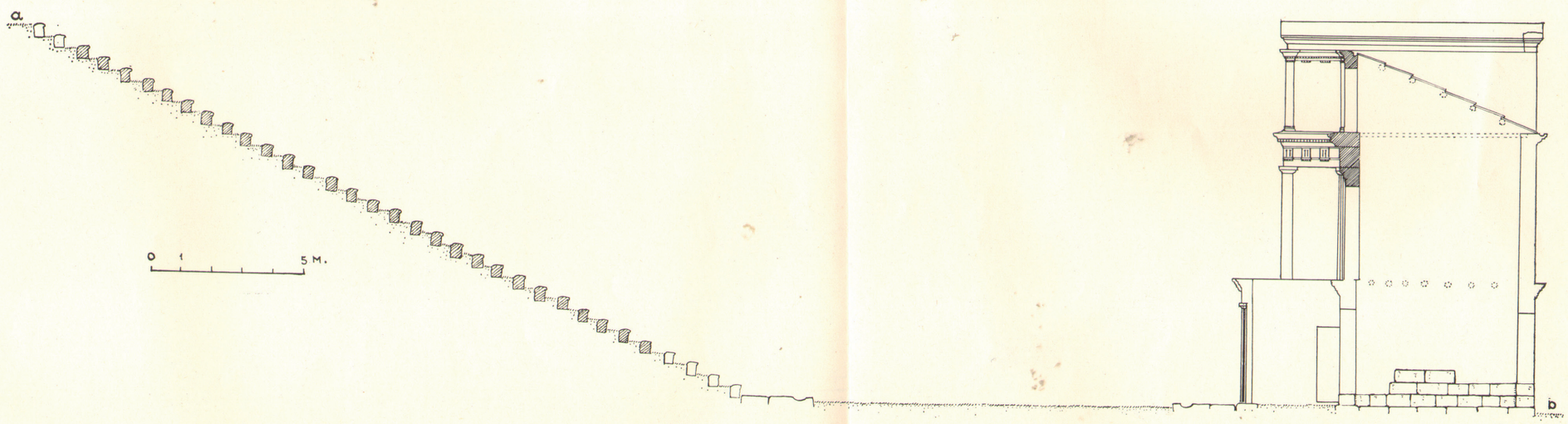


Planimetria generale del teatro allo stato attuale, dopo gli ultimi scavi e restauri.

Fig. 4.1.12: Planimetria generale del teatro dopo il restauro terminato nel 1965 (tratto da Bernabò Brea, L., 1965).

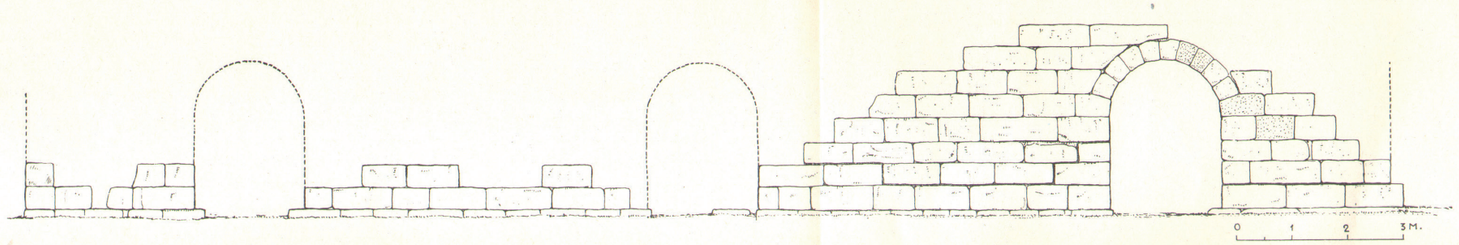


a) – Sezione longitudinale sulla linea e-z-f allo stato attuale.

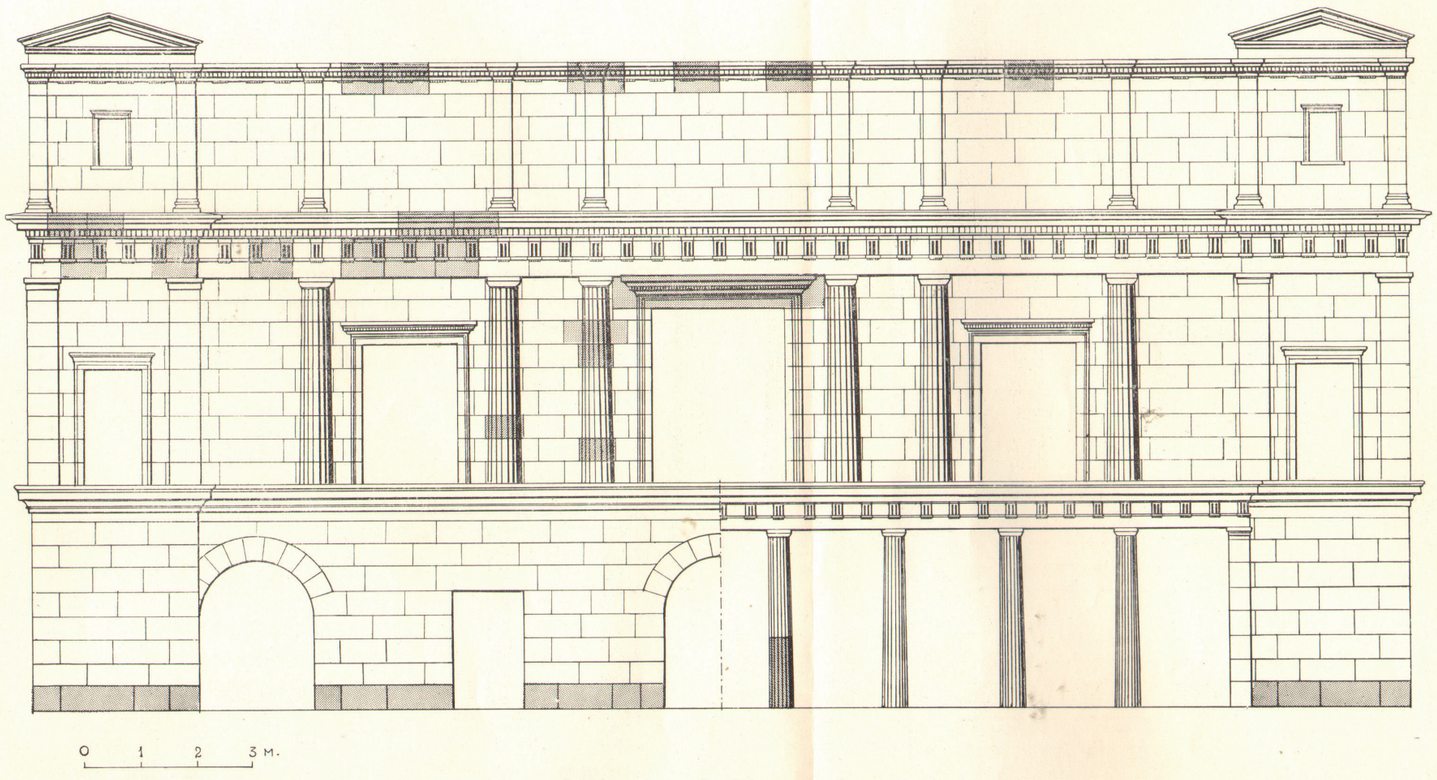


b) – Sezione longitudinale ricostruttiva del teatro in età greca sulla linea g-h-z-f.

Fig. 4.1.13: Sezioni longitudinali del teatro dopo il restauro del 1965 e ricostruttiva dell'età greca (tratto da Bernabò Brea, L., 1965).



a) – Prospetto del fronte posteriore dell'edificio scenico allo stato attuale dopo i restauri.



b) Ricostruzione grafica della « scaenae frons ».

Fig. 4.1.14: Documentazione della porzione di scena ricostruita e illustrazione di quella originale (tratto da Bernabò Brea, L., 1965).

4.2 Materiali attualmente presenti

4.2.1 Pietra arenaria

Si tratta di una roccia sedimentaria e i componenti principali per la formazione sono l'argilla e l'ossido di ferro: nella fase principale della *diagenesi*, denominata *mesodiagenesi* i feldspati e le polveri di quarzo si legano chimicamente all'argilla

Dai rilievi effettuati dalla Soprintendenza di Messina risulta che le costruzioni intorno al teatro, più precisamente la cinta muraria dell'antico abitato e la basilica sono state edificate con blocchi di *calcarenite*, ossia un tipo di arenaria costituito in gran parte da carbonato di calcio, di conseguenza si può supporre che questo materiale fosse facilmente reperibile nelle vicinanze e che anche il teatro sia stato costruito con blocchi in calcarenite.

Caratteristiche: per quanto riguarda l'arenaria, si considera la densità pari a 2000 kg/m^3, ipotizzando che sia simile a quella dei teatri di Epidauro e di Siracusa, costruiti con l stessa tipologia di materiale nella stessa epoca storica.

Per quanto riguarda il comportamento acustico dell'arenaria, dalle simulazioni precedentemente svolte, si può notare che riflette nello stesso modo tutte le frequenze: è stato scelto di utilizzare la stessa impostazione utilizzata in precedenza per la simulazione acustica del teatro di Siracusa, ipotizzando che le caratteristiche fisiche dell'arenaria fossero le stesse, ovvero si è mantenuto il coefficiente di assorbimento α pari a 0.1 per tutte le frequenze mentre lo scattering è impostato a 0.55 a 707 Hz.

In base alle indicazioni fornite nella norma UNI 11182 è possibile classificare i degradi che interessano i materiali lapidei: essendo l'arenaria a carattere idrofilo, essa attrae le molecole d'acqua formando legami ad idrogeno ed essendo esposta, è soggetta al fenomeno del dilavamento; questa legandosi al carbonato insolubile tramite l'anidride carbonica che può unirsi alle molecole, lo trasforma in bicarbonato solubile, asportando lentamente porzioni di superficie. Tuttavia il degrado che caratterizza maggiormente i blocchi di arenaria è l'alveolizzazione, perché si tratta di un materiale idrofilo. I sali che vengono depositati nella roccia tramite le acque meteoriche disgregano il materiale formando delle cavità, perché quando l'acqua assorbita per capillarità evapora, aumenta il volume dei cristalli di sale in essa contenuti: questo processo è facilitato dalla vicinanza con il mare, infatti la presenza di sale marino favorisce notevolmente questo fenomeno.

I cicli ripetuti di escursione termica tra le temperature diurne e notturne, uniti all'azione del vento e del deposito di sale marino favoriscono invece il fenomeno della polverizzazione o disgregazione della superficie del materiale.

Fig. 4.2.1: Dettaglio di un blocco in arenaria del teatro di Tindari (Foto di Mangano, B., 2015)

4.2.2 Legno

Le sedute temporanee presenti nel teatro di Tindari sono formate da tavole di legno di abete affiancate dello spessore di 4 cm appoggiate e fissate su strutture metalliche in scatolari di acciaio di tipo Italsider. Il legno di abete si presenta di colore chiaro e leggero, è infatti caratterizzato da un peso specifico compreso tra 440 e 480 Kg/m^3. Secondo la norma UNI 9504 la velocità di carbonizzazione per l'abete e il larice è di 0.7 mm/min per ogni lato esposto al fuoco.

In base alla normativa Uni EN 338 il Consiglio Nazionale delle Ricerche nel 2008 ha emanato una normativa relativa alle costruzioni in legno denominata *Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo delle Strutture di Legno* dove sono riportatele principali caratteristiche meccaniche dei diversi tipi di legno: in particolare la tabella seguente riassume quelle delle conifere, di cui fa parte il legno di abete.

Tab 4.2.1 CNR, Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo delle Strutture di Legno, 2008

Valori di resistenza modulo elastico e massa volumica		C14	C16	C18	C20	C22	C24	C27	C30	C35	C40	C45	C50
Resistenze [MPa]													
flessione	$f_{m,k}$	14	16	18	20	22	24	27	30	35	40	45	50
trazione parallela alla fibratura	$f_{t,0,k}$	8	10	11	12	13	14	16	18	21	24	27	30
trazione perpendicolare alla fibratura	$f_{t,90,k}$	0.4	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
compressione parallela alla fibratura	$f_{c,0,k}$	16	17	18	19	20	21	22	23	25	26	27	29
compressione perpendicolare alla fibratura	$f_{c,90,k}$	2.0	2.2	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	2.7	2.8	2.9	3.1	3.2
taglio	$f_{v,k}$	1.7	1.8	2.0	2.2	2.4	2.5	2.8	3.0	3.4	3.8	3.8	3.8
Modulo elastico [GPa]													
modulo elastico medio parallelo alle fibre	$E_{0,mean}$	7	8	9	9.5	10	11	11.5	12	13	14	15	16
modulo elastico caratteristico parallelo alle fibre	$E_{0,05}$	4.7	5.4	6.0	6.4	6.7	7.4	7.7	8.0	8.7	9.4	10.0	10.7
modulo elastico medio perpendicolare alle fibre	$E_{90,mean}$	0.23	0.27	0.30	0.32	0.33	0.37	0.38	0.40	0.43	0.47	0.50	0.53
modulo di taglio medio	G_{mean}	0.44	0.50	0.56	0.59	0.63	0.69	0.72	0.75	0.81	0.88	0.94	1.00
Massa volumica [kg/m^3]													
massa volumica caratteristica	ρ_k	290	310	320	330	340	350	370	380	400	420	440	460
massa volumica media	ρ_m	350	370	380	390	410	420	450	460	480	500	520	550

Per quanto riguarda i degradi, si può affermare che il legno sia soggetto a fessurazioni causate dalla perdita di umidità contenuta all'interno delle fibre organiche. Queste possono perciò avere dimensioni di diverse entità a seconda di diversi fattori, come il carico, la durata e le ripetizioni del ciclo umido-asciutto. Ciò favorisce l'insediamento di organismi viventi che agiscono da parassiti sul legno per ricavarne il nutrimento per il loro cicli votale.
La causa principale del degrado del legno è infatti l'acqua e a causa della sua natura igroscopica, frequentemente questa viene scambiata con l'ambiente circostante.
In base all'Eurocodice 5 è stato stabilito che per un asse di legno che contiene una percentuale uguale o inferiore al 18 % del suo volume non siano favoriti gli agenti biogeni, mentre superata questa percentuale su può presentare questo rischio.
Le muffe che possono intaccare gli elementi in legno sono di due tipologie: i funghi *cromogeni*, che creano unicamente danno visivo ma non strutturale e invece quelli *basiomiceti* e *ascomiceti*, detti più comunemente *carie*, che si nutrono della cellulosa contenuta nel legno, influendo negativamente sulla resistenza del materiale.
Oltre a questi agenti biogeni, anche gli insetti svolgono un ruolo non indifferente nel degrado del legno, danneggiando anche il legno più stagionato. Il danno arrecato in genere è più rilevante per la estetica di quanto lo sia per la resistenza meccanica.

Fig. 4.2.2: Dettaglio delle assi in legno del teatro di Tindari (Foto di Mangano, B., 2015)

4.2.3 Laterizio

Il laterizio è uno dei materiali più antichi da costruzione: il suo impiego è stato rinvenuto già negli scavi archeologici a testimonianza delle antiche civiltà fluviali o lacustri, ricche di argilla ma povere di materiali da costruzione più tradizionali come la pietra o il legno.

Inizialmente il mattone veniva usato crudo, solo dopo il I secolo a.C, Per opera delle maestranze greche, si inizia a cuocere il mattone: tuttavia l'impiego di questo prodotto è stato perfezionato dalla civiltà romana. I laterizi venivano composti da acqua, sabbia, paglia o pozzolana e l'impasto si inseriva all'interno di stampi in legno, poi lasciati essiccare prima sella cottura a 800°.

L'argilla svolge un'azione plastificante, mentre gli inerti detti anche smagranti riducono la plasticità e il presentarsi delle dì fessure dovute al ritiro da essiccamento: sono inoltre compresi elementi detti fondenti che svolgono la funzione di riempire le porosità createsi durante la cottura.

Per cuocere i mattoni in origine si formava il forno a cumulo, dove questi venivano accatastati e ricoperti da legna, alla quale veniva poi appiccato fuoco: questo però portava alla formazione di mattoni di diverse cotture, albasi, mezzani e ferrioli.

Nei mattoni pressati a mano in antichità si presenta il fenomeno dei *calcinelli* legati al degrado delle fessurazioni: si tratta ci granuli di Carbonato di Calcio $CaCO_3$ formati a causa dell'idratazione in seguito alla cottura.

A causa dell'igroscopicità del laterizio è possibile inoltre che si presentino efflorescenze, ossia l'acqua che viene assorbita dal terreno che contiene sali disciolti, una volta all'interno del mattone evapora depositando i cristalli di sale sul mattone. A causa degli agenti atmosferici, altri degradi possibili sono la *scagliatura*, causata dalla bagnatura accentuata di alcune zone e la corrosione per effetto di agenti chimici acidi nel caso in cui i mattoni si trovino esposti all'inquinamento ambientale, tuttavia questi ultimi due casi non sembrano essere presenti nel caso del teatro antico di Tindari.

Fig. 4.2.3: Dettaglio delle parti in laterizio del teatro di Tindari (Foto di Mangano, B., 2015).

Capitolo 5

Le analisi già svolte sul Teatro di Tindari

5.1 International Congress on Sound and Vibration ICSV23

L'obiettivo dell'International Institute of Acoustics and Vibration (IIAV) èstato quello di creare una società internazionale scientifica in grado di fornire supporto agli scienziati e agli ingegneri nel campo dell'acustica e della vibrazione. L'obbiettivo principale di questi eventi è diffondere lo scambio di conoscenza organizzando seminari, congressi, workshop e pubblicando gli interventi sulle riviste scientifiche. Ogni anno organizza un evento mondiale dove partecipano gli studiosi di acustica, rumore e vibrazione provenienti da ogni parte del globo: nel 2016 il Dipartimento di Energia del Politecnico di Torino, rappresentato da Bo, E., Kostara-Konstantinou, E., Lepore, F., Shtrepi, L., Puglisi, G,E., e Astolfi, A., ha partecipato alla ventitreesima conferenza tenutasi ad Atene presentando una relazione in merito alla caratterizzazione acustica del Teatro greco di Tindari.

Il Dipartimento di Energia del Politecnico di Torino (DENERG) nei giorni 5, 6 e 7 Settembre 2015 ha condotto una campagna di rilievo del Teatro di Tindari: le misurazioni sono state prese considerando il teatro non occupato e con sorgenti omnidirezionali nell'orchestra e ricevitori nella *cavea*.

Per generare l'impulso sonoro sono stati utilizzati due tipi di petardi, nello specifico "Raudo Manna New Ma1b" e "Perfetto C00015 Raudo New" e un dodecaedro "Bruel & Kjaer Omnipower Sound Source 4296" potenziato da un amplificatore "Lab. Gruppen LAB 300" connesso al portatile. Il microfono utilizzato era un terminale "Shoeps CMC 5-U" anch'esso connesso al portatile.

Sono state successivamente determinate le posizioni delle sorgenti: S1 in prossimità del centro all'altezza di un metro da terra e S2 alla distanza di 6,6 m dietro alla prima sorgente e all'altezza di 1,5 m, in seguito sono stati disposti 9 ricevitori sui 3 assi radiali della cavea*:* la Fig.5.1.0 mostra dettagliatamente la disposizione di sorgenti e ricevitori.

Sono state prese in considerazione le condizioni medie della velocità del vento, dell'umidità relativa e della temperatura nella condizione diurna e notturna. Durante il giorno la velocità del vento era pari a 1,30 m/s, l'umidità relativa era al 70% e la temperatura media 29°C, mentre di notte la velocità del vento era 0,30 m/s, l'umidità relativa 77% e la temperatura 26°C.

5.1.1 Analisi Geometrica

Nell'ambito della conferenza 23rd International Congress on Sound & Vibration del 2016, è stata dimostrata l'applicazione dell' *Equazione canonica dei teatri antichi* definita da Canac per descrivere l'acustica geometrica del Teatro di Tindari: l'angolo ε, formato dalla linea tangente alle cavea e la linea che congiunge la sorgente e l'ascoltatore, viene considerato di notevole importanza per la valutazione della qualità del teatro. Il valore minimo dell'angolo ε è pari a 4° e questo valore deve essere raggiunto per ogni postazione nella cavea*:* questo valore garantisce che non si verifichi l'assorbimento del suono da parte degli spettatori seduti nelle file di fronte.

Nell'equazione (5.1) vengono descritte le relazioni che regolano il dimensionamento delle varie parti del Teatro.

$$D_0 - h \frac{\cot g\, \alpha}{\sin \varepsilon} = D0 + H \frac{\cot g\, \alpha}{\cos (\alpha - \varepsilon)} \qquad (5.1)$$

Nella Fig. 5.1.1 vengono invece illustrati i coefficienti presi in considerazione nella (5.1), necessari per descrivere le proporzioni che regolano la geometria dei teatri antichi.

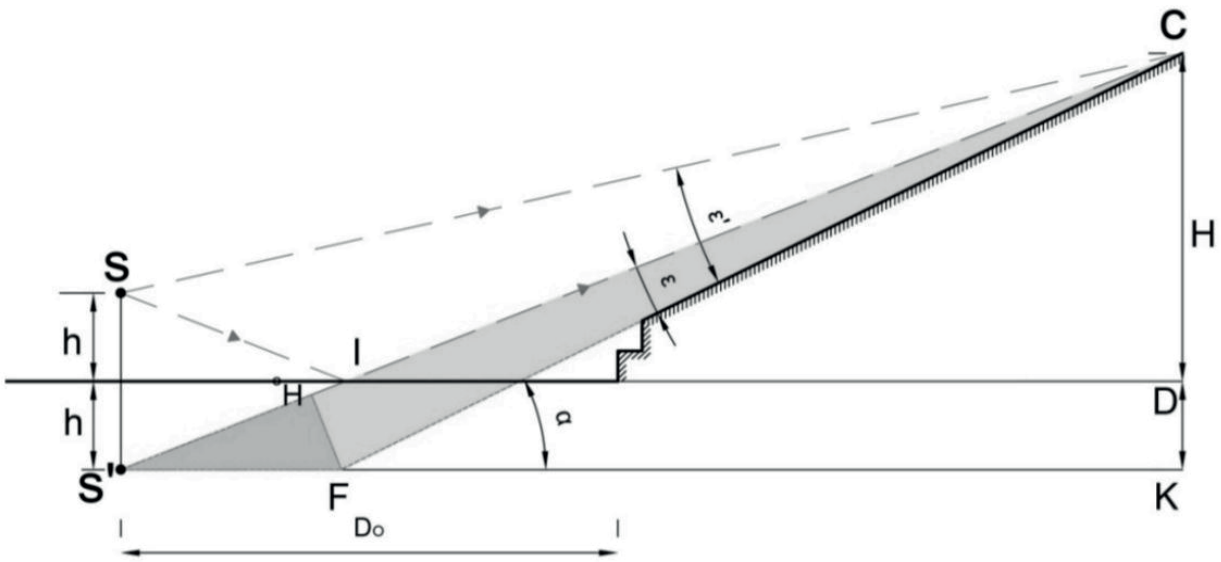


Fig. 5.1.1: Illustrazione delle grandezze in (5.1), (tratto da Bo, E., 2017).

Inoltre sono state evidenziate altre equazioni in grado si stabilire il rapporto tra le varie componenti geometriche: Nella (5.2) vengono mostrati gli elementi che concorrono a ridurre l'eco regolando le dimensioni dell'*orchestra* e della cavea.

$$d = (S'C\text{-}SC) = 2h\sin ß \tag{5.2}$$

Mentre nella (5.3) è possibile definire lo spostamento possibile per l'attore all'interno dello spazio geometrico.

t= distanza tra la bocca dell'attore e il pavimento del proscenio
SS1= riflessioni provenienti dall'orchestra
SS2= riflessioni provenienti dal proscenio

$$SS1 \geq \frac{tH\cot g\alpha}{H+ h_0} \tag{5.3}$$

$$SS2 \geq \frac{t\,(D_0 + H\cot g\alpha}{H - h_0} \tag{5.4}$$

5.2 Misurazioni in situ

Nella tesi di Dottorato di Bo, E., 2017 vengono riportate le misurazioni e simulazioni inerenti all'acustica svolte sul Teatro di Tindari e di Siracusa in base alla norma ISO 3382-1:2009. Nello specifico, sono stati misurati il tempo di riverberazione RT (s), indicato come T_{20} e T_{30}, la chiarezza del parlato e della musica, indicati come C_{50} e C_{80} (dB), l' indice di robustezza G (dB) ed è stato evidenziato che i valori di Rt e G non si discostano notevolmente da quelli mediamente riportati nelle misurazioni dei casi studio del progetto ERATO.
In precedenza è stata pubblicata la tesi di laurea magistrale di Kostara, E., Lepore F., 2016, dove in base alle misurazioni è stata fatta una calibrazione del modello che prevedeva un numero minore di materiali di quanto verrà presentato nel capitolo 6, e che aveva l'obiettivo di avvicinarsi il più possibile ai valori misurati di EDT, T_{20}, T_{30}, G, C_{50} e C_{80}. Il lavoro che verrà presentato nel capitolo 6 invece ha l'obiettivo di indagare di più sui materiali presenti allo stato di fatto, verificando i margini di tolleranza definiti dalla normativa con il parametro JND solo di alcuni parametri.

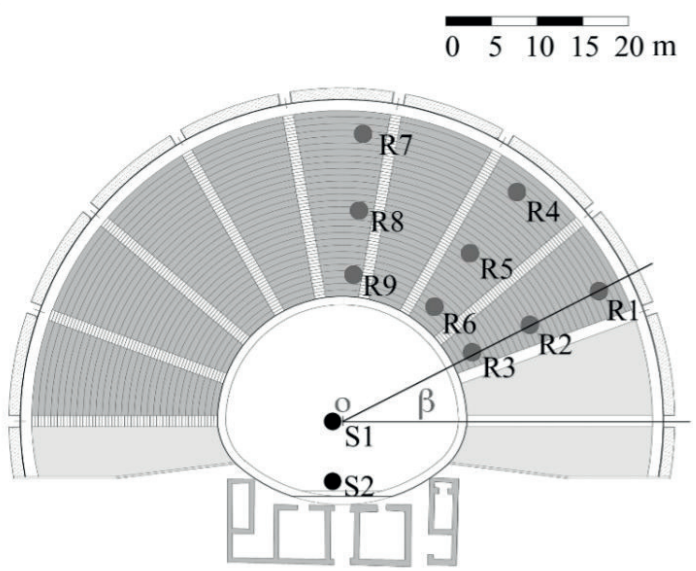


Fig. 5.2.1: Illustrazione dei punti scelti per il posizionamento delle sorgenti e dei ricevitori (tratto da Bo, E., 2017).

I parametri sono stati misurati in situ e successivamente è stato realizzato un modello per la simulazione in Odeon e in CATT-Acoustic.

Le sorgenti utilizzate per la misurazione in situ sono:

- Petardi (Raudo Manna New Ma1b)
- Dodecaedro (Bruel & Kjaer Omnipower sound source 4296)

Di seguito vengono illustrate le misurazioni registrate sul campo

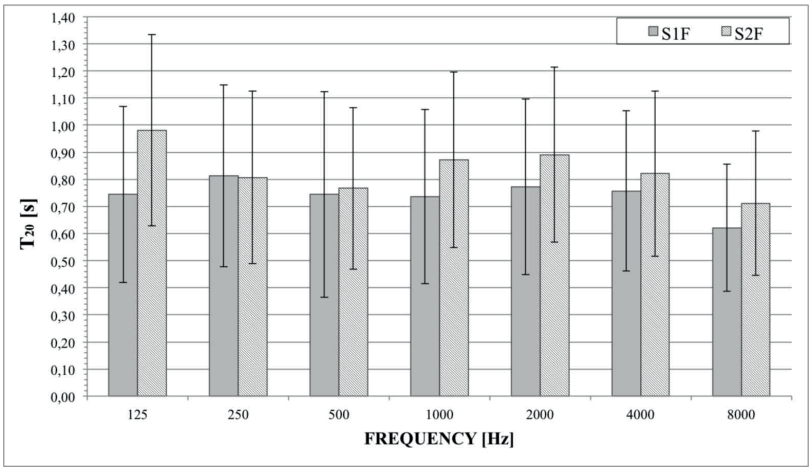


Fig. 5.2.2: Bo, E., I valori di T_{20} registrati per tutti i ricevitori in frequenza (tratto da Bo, E., 2017).

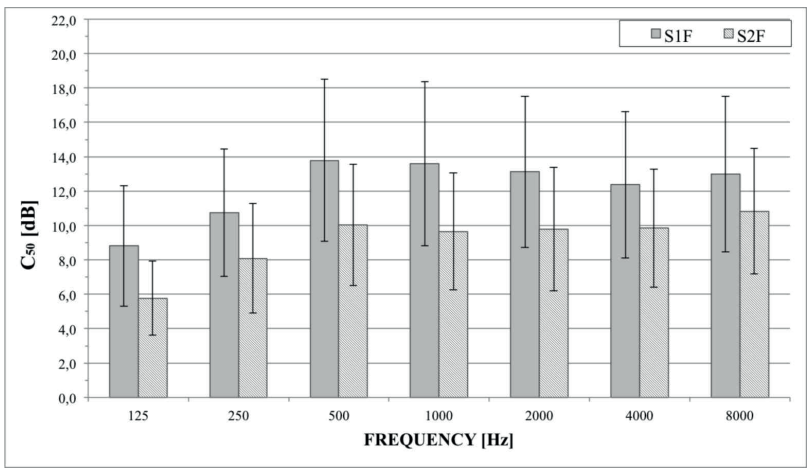


Fig. 5.2.3: Bo, E., I valori di C_{50} registrati per tutti i ricevitori in frequenza (tratto da Bo, E., 2017).

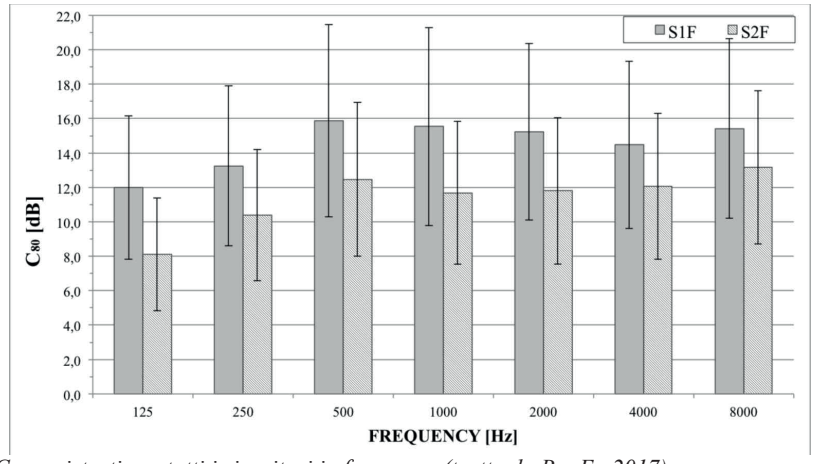


Fig. 5.2.4: I valori di C_{80} registrati per tutti i ricevitori in frequenza (tratto da Bo, E., 2017).

Sono stati calcolati i valori medi di G per ogni ricevitore in funzione della distanza sorgente-ricevitore espressa nella scala logaritmica. L'indice di robustezza del teatro di Tindari appare mediamente basso, e la diversa tipologia di sorgente può variare i valori di G di circa 2 dB tra $S1_D$ e $S1_F$ specialmente per le distanze ridotte.

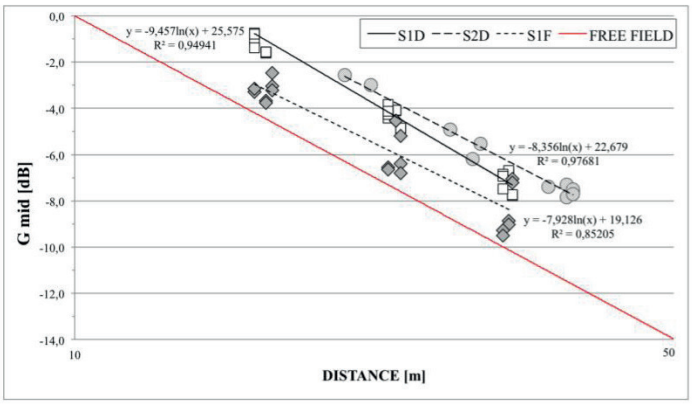


Fig.. 5.2.5 *I valori medi di G compresi tra 500 Hz e 1000 Hz per tutti i ricevitori e fonti, espressi in funzione della distanza sorgente-ricevitore, (tratto da Bo, E., 2017).*

In occasione della stessa campagna di misurazioni condotta nelle giornate 5, 6, 7 settembre 2015, sono stati elaborati gli stessi dati provenienti dalle misurazioni con 2 software diversi: DIRAC e Adobe Audition.

Da una prima analisi sono stati confrontati gli output dei due software, mentre successivamente con Adobe Audition sono stati registrati i dati provenienti dall'esplosione di 2 petardi e dal dodecaedro e poi riportati in frequenza nelle seguenti tabelle estratte dalla tesi di laurea magistrale di Kostara e Lepore:

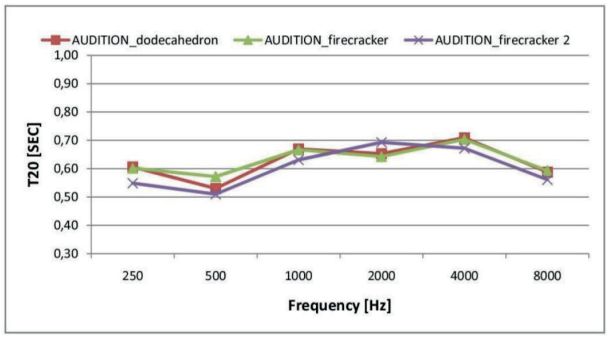


Fig. 5.2.6:Valori di T_{20} estrapolati dalle registrazioni dei petardi e del dodecaedro in S1, per un ricevitore tipo, (teatro vuoto) (tratto da Kostara Konstantinou, E., Lepore, F., 2016)

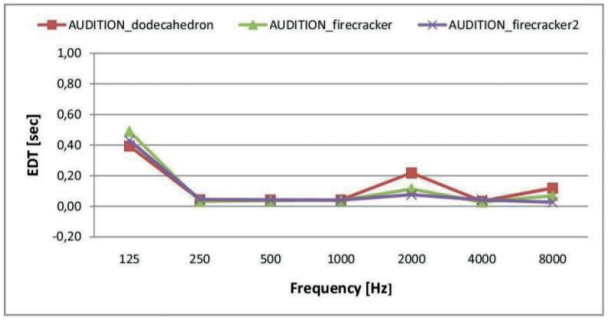


Fig. 5.2.7: Valori di EDT estrapolati dalle registrazioni dei petardi e del dodecaedro in S1, per un ricevitore tipo, (teatro vuoto) (tratto da Kostara Konstantinou, E., Lepore, F., 2016)

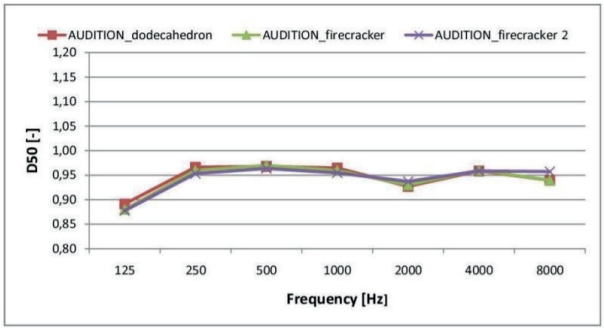


Fig. 5.2.8:Valori di D_{50} estrapolati dalle registrazioni dei petardi e del dodecaedro in S1, per un ricevitore tipo, (teatro vuoto) (tratto da Kostara Konstantinou, E., Lepore, F., 2016)

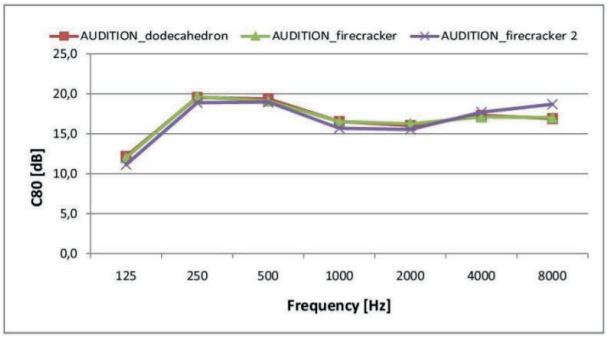


Fig. 5.2.9: Valori di C_{80} estrapolati dalle registrazioni dei petardi e del dodecaedro in S1, per un ricevitore tipo, (teatro vuoto) (tratto da Kostara Konstantinou, E., Lepore, F., 2016)

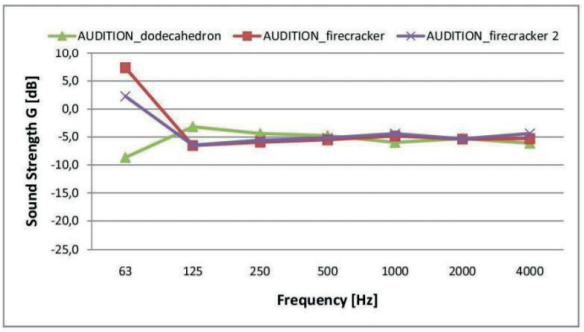


Fig. 5.2.10: Valori di G estrapolati dalle registrazioni dei petardi e del dodecaedro in S1, per un ricevitore tipo, (teatro vuoto) (tratto da Kostara Konstantinou, E., Lepore, F., 2016)

5.3 Simulazioni

L'obbiettivo della simulazione di Bo, E., 2017, è stato quello di confrontare i valori ottenuti con quelli registrati sul campo. È stato necessario quindi realizzare un modello in modo da simulare la risposta finita all'impulso (IR). Il software utilizza due tipi di algoritmi per simulare gli IR :

- Metodo della Sorgente Immagine (ISM): procedura deterministica per localizzare le fonti dette Sorgenti Immagine, che corrispondono al percorso speculare del raggio sonoro.
- Metodo Ray Tracing (RTM): procedura che consente di rintracciare le particelle e i raggi delle radiazioni sonore

Le simulazioni in generale inoltre a differenza delle misurazioni sul campo, prevedono un certo numero di variabili, dovute alla modellazione che influenzano i parametri misurati: ad esempio per quanto riguarda i teatri antichi, la modellazione possiede intrinsecamente delle semplificazioni necessarie per interagire correttamente con i programma e inoltre è necessario impostare alcuni fattori aggiuntivi che possono incidere in maniera più o meno notevole sull'accuratezza della prova.
Per quanto riguarda la modellazione è possibile individuare i fattori definiti sistematici, dovuti alle semplificazioni dell'algoritmo, mentre per quanto riguarda le impostazioni del calcolo si individuano dei fattori casuali, dovuti all'incertezza dei valori inseriti e talvolta all'inesperienza.

- Fattori sistematici
  - Livello di dettaglio del modello: ogni programma considera diversamente le dimensioni degli elementi della superficie comparati alla lunghezza d'onda. Il risultato potrebbe non essere accurato per via di un livello di dettaglio troppo basso, ma ciò accadrebbe anche nel caso in cui fosse troppo alto.
  - Superfici curve: I programmi utilizzati per questo tipo di simulazioni interagiscono unicamente con superfici piane, è quindi necessario semplificare la geometria curva con una serie di piani.
  - Diffrazione: È un fenomeno tipico delle onde sonore ma che spesso non viene considerato negli algoritmi, perchè il tempo necessario alla simulazione, includendo questa variabile, è nettamente superiore.

- Fattori casuali

-Numero di raggi: La stima del numero di raggi necessari per una simulazione nell'ambito dell'acustica geometrica è diversa a seconda se si tratta di ISM o RTM. Si dovrebbe considerare un numero sufficiente di raggi in modo fa non trascurare nessuna riflessione (IS): è possibile però calcolare un numero minimo di raggi N_{min} considerando il cono ottico per un ricevitore sferico con raggio $r_{d,}$:

$$N_{min} = \frac{4\,(ct)^2}{r^2 d} = \frac{A\,(sfera)}{A\,(raggi)} \tag{5.5}$$

È sempre preferibile utilizzare un numero molto alto di raggi in modo da avvicinarsi il più possibile alla misurazione reale, tuttavia non sempre questo è possibile, poichè a seconda del processore utilizzato, i tempi di calcolo possono diventare estremamente lunghi.

- Ordine di Transizione (TO), indica i i primi raggi necessari per individuare gli IS, è il passaggio necessario per passare dalla risposta immediata a quella più tardiva, calcolata con il metodo della sorgente immagine o ray tracing.
- Coefficienti di assorbimento e di scattering: i software utilizzano una libreria di dati relativi a questi parametri dei materiali in base alle normative ISO-354, 2003 e ISO-17497-1, 2004. Generalmente RT presenta nella simulazione un grado di incertezza inferiore

Il modello geometrico utilizzato per le precedenti simulazioni è stato realizzato con MATLAB R2015b, che è stato utilizzato in particolare per la scrittura dello script, poi sono stati esportati due modelli: uno per Odeon in .dxf e un altro per CATT-Acoustics in .geo. Nel modello si è cercato di riprodurre nella maniera più fedele possibile la geometria del teatro nelle condizioni attuali, infatti sono state disegnate le sedute reali e non sono state semplificate utilizzando una singola parete obliqua. Per la simulazione in Odeon è stato aggiunto un parallelepipedo intorno al modello alle cui pareti sono stati applicati i coefficienti di assorbimento e scattering per simulare un materiale totalmente assorbente, per indicare che il teatro si trova in uno spazio aperto.

Sono state inoltre aggiunte le sorgenti del suono S1 e S2 con un livello di potenza sonora pari a 100 dB . In assenza del tetto, e quindi di una zona che favorisce il riverbero, è necessario predire accuratamente le prime riflessioni, ossia per verificare se il modello e la simulazione sono stati impostati nella maniera corretta, bisogna che il valore di EDT sia pressoché uguale. Bisogna inoltre impostare il valore TO: questo è utile per definire l'accuratezza della simulazione acustica che si avvale del metodo sella sorgente immagine. Impostando TO = 0 significa che non si considerano le riflessioni provenienti dal metodo sorgente immagine; nella simulazione condotta nel 2015 (Bo, 2016) TO è stato impostato pari a 1, in modo da eliminare le riflessioni del metodo sorgente immagine nella cavea e considerare solo quelle provenienti dal pavimento dell'orchestra.

Sono stati poi impostate le caratteristiche ambientali delle misurazioni in situ, temperatura=33°C, umidità relativa = 65%, la risposta finita all'impulso pari a 1500 ms e 4 milioni di raggi per riprodurre la densità dei raggi nella parte finale delle risposta agli impulsi (IR). Nella simulazione condotta l'anno precedente (Lepore, Kostara Konstantinou, 2016) la temperatura è stata impostata a 26 °C e l'umidità relativa 77%, mentre gli altri parametri restano invariati.

Per quanto riguarda l'assegnazione dei coefficienti di assorbimento medi α_w, sono stati assegnati diversi valori all'interno della cavea a seconda del grado di porosità della pietra,:α = 0,2 per la pietra porosa, α = 0,05 per la pietra più riflettente, è stato inoltre scelto α = 0,1 per il pavimento dell'orchestra. Nelle Tab 5.3.1 e 5.3.2 vengono riportati nel dettaglio i coefficienti di assorbimento che sono stati applicati al modello usato per la simulazione (Bo, 2017) e (Lepore, Kostara Konstantinou 2016).

	Coefficienti di assorbimento: frequenze (Hz)								
			125	250	500	1000	2000	4000	8000
Cavea/scenae frons/podium	Pietra		0,36	0,39	0,43	0,5	0,52	0,49	0,47
Podio inferiore	Pietra		0,19	0,23	0,28	0,37	0,37	0,37	0,36
Aperture nel podio	Apertura		0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
Cunei non conservati/Pavimento	Terreno		0,4	0,54	0,65	0,7	0,68	0,62	0,62
Nuove sedute	Legno		0,1	0,08	0,05	0,04	0,05	0,05	0,05
Nuovo palco	Legno		0,12	0,09	0,05	0,03	0,03	0,03	0,03

Tab. 5.3.1:I coefficienti di assorbimento utilizzati nella simulazione, 2017, elaborazione grafica dell'autrice. (tratto da Bo, E., 2017).

	Coefficienti di assorbimento: frequenze (Hz)							
		63	125	250	500	1000	2000	4000
Cavea/resti/podium	Pietra	0,36	0,36	0,39	0,43	0,5	0,52	0,49
Aperture nel podio	Apertura	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
Nuove alzate	pietra	0,4	0,4	0,54	0,63	0,67	0,66	63
Nuove sedute	Legno	0,1	0,1	0,08	0,05	0,04	0,05	0,05
Cunei non conservati/Pavimento	Pietra e tereno	0,4	0,4	0,54	0,65	0,7	0,68	0,62
Pannello vibrante	Legno	0,12	0,12	0,09	0,05	0,03	0,03	0,03
Podio inferiore	Pietra	0,19	0,19	0,23	0,28	0,37	0,37	0,36

Tab. 5.3.2: I coefficienti di assorbimento utilizzati nella simulazione 2016, elaborazione grafica dell'autrice. (tratto da Kostara Konstantinou, E., Lepore, F., 2016).

Di seguito vengono invece riportati i valori di scattering che sono stati scelti per le due simulazioni :

		Coefficienti di scattering: frequenze (Hz)						
		125	250	500	1000	2000	4000	8000
Cavea/scenae frons/podium	Pietra	0,1	0,1	0,46	0,65	0,77	0,83	0,85
Podio inferiore	Pietra	0,1	0,1	0,21	0,39	0,5	0,56	0,58
Aperture nel podio	Apertura	0	0	0	0	0	0	0
Cunei non conservati/Pavimento	Terreno	0,1	0,3	0,73	0,87	0,9	0,92	0,95
Nuove sedute	Legno	0,1	0,1	0,14	0,26	0,38	0,45	0,48
Nuovo palco	Legno	0,1	0,1	0,14	0,26	0,38	0,45	0,48

Tab. 5.3.3 I coefficienti di scattering utilizzati nella simulazione, elaborazione grafica dell'autrice. (tratto da Bo, E., 2017).

Coefficienti di scattering medi		
Cavea/resti/podium	Pietra	0,55
Aperture nel podio	Apertura	0,05
Nuove alzate	Pietra	0,5
Nuove sedute	Legno	0,2
Cunei non conservati/Pavimento	Pietra e tereno	0,8
Pannello vibrante	Legno	0,2
Podio inferiore	Pietra	0,3

Tab. 5.3.4 I coefficienti di scattering utilizzati nella simulazione, elaborazione grafica dell'autrice. (tratto da Kostara Konstantinou, E., Lepore, F., 2016).

La simulazione di Lepore F., Kostara Konstantinou E., è stata condotta con i software Dirac e Aurora ha e sono stati riportati i seguenti risultati che evidenziano le differenze tra i valori ottenuti dalla misurazione e dalla simulazione:

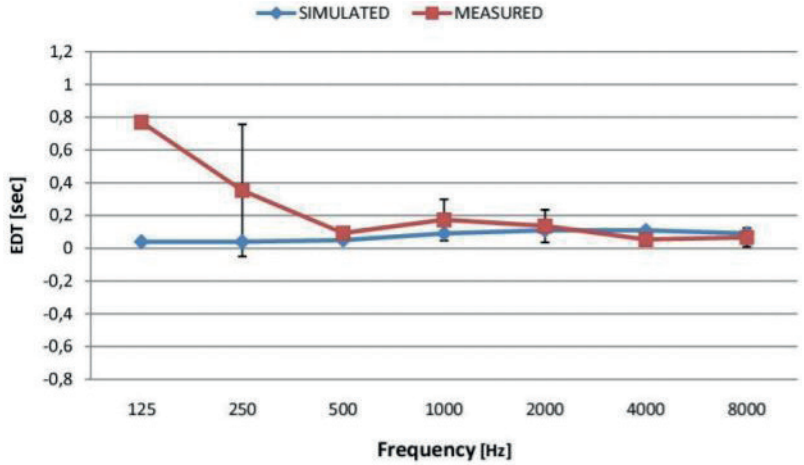


Fig. 5.3.1:Confronto tra i valori di EDT nella misurazione in situ e nella simulazione, (tratto da Kostara Konstantinou, E., Lepore, F., 2016).

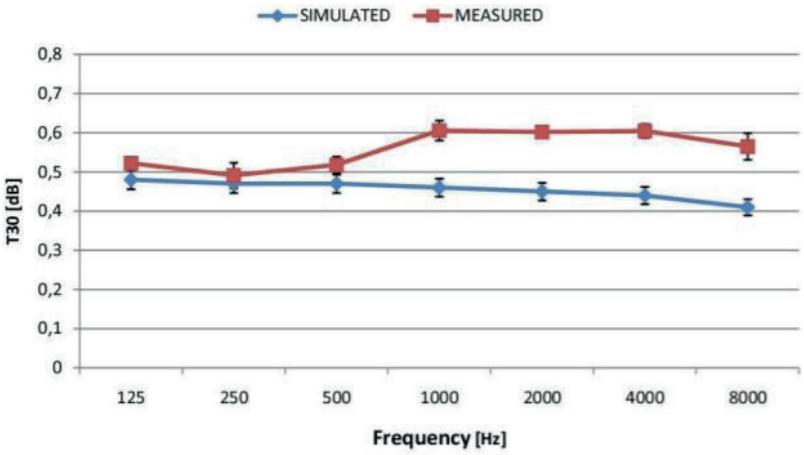


Fig. 5.3.2:Confronto tra i valori di T_{30} nella misurazione in situ e nella simulazione, (tratto da Kostara Konstantinou, E., Lepore, F., 2016).

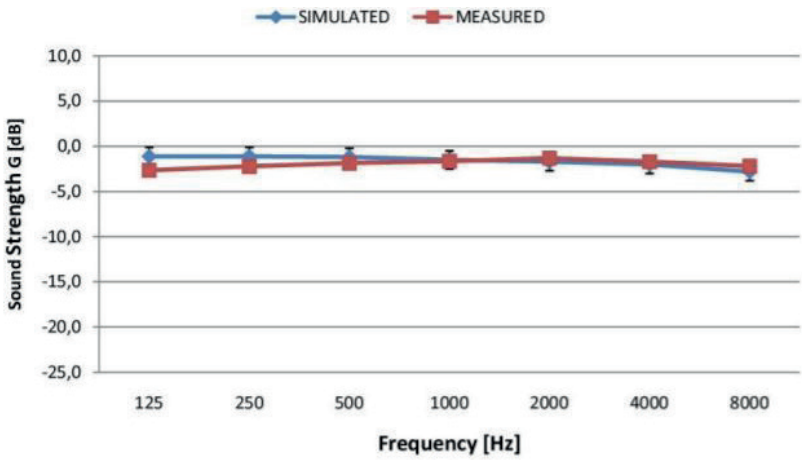


Fig. 5.3.3: Confronto tra i valori di G nella misurazione in situ e nella simulazione, (tratto da Kostara Konstantinou, E., Lepore, F., 2016).

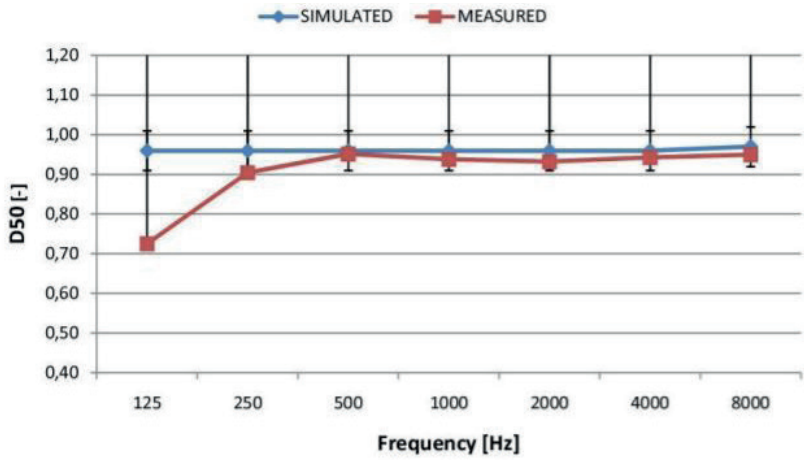


Fig. 5.3.4:Confronto tra i valori di D_{50} nella misurazione in situ e nella simulazione, (tratto da Kostara Konstantinou, E., Lepore, F., 2016).

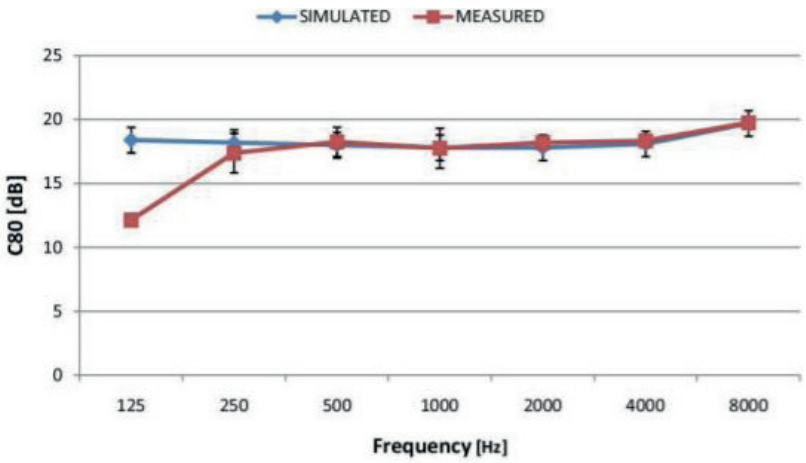


Fig. 5.3.5: Confronto tra i valori di C_{80} nella misurazione in situ e nella simulazione, (tratto da Kostara Konstantinou, E., Lepore, F., 2016).

È stato osservato che le simulazioni dei parametri che descrivono l'energia come G e C_{80} riportano valori molto vicini a quelli registrati nella misurazione, mentre il tempo di riverberazione riporta dei valori che si scostano maggiormente da quelli della misurazione e soprattutto vengono influenzati notevolmente dalla posizione dei ricevitori e dalla frequenza considerata.
È stato allora calcolato l'errore che si riscontra per ogni parametro in relazione al JND come riportato nella tabella seguente realizzata dalle autrici della simulazione.

Parameters	Average Measured	Average Simulated	(APm-APs)	JND	Error
EDT	0,13	0,07	0,06	5%	1,27
T(30)	0,54	0,49	0,05	5%	1,00
T(20)	0,56	0,47	0,09	5%	1,80
G	1,76	1,35	0,41	1 dB	0,41
D(50)	0,94	0,96	0,02	0,05	0,30
C(80)	18,00	17,90	0,10	1 dB	0,10

Tab 5.3.5: Differenze riscontrate tra i parametri misurati e simulati, (tratto da Kostara Konstantinou, E., Lepore, F., 2016).

Capitolo 6

La ricostruzione del passato

6.1 La simulazione dell'acustica del teatro di Tindari nel 2015

Come accade per ogni manufatto architettonico, ciò che è stato realizzato in epoca antica non corrisponde a ciò che è visibile oggi, perchè l'edificio originario è stato interessato da una serie di modifiche che si sono stratificate nel tempo, che ne hanno mutato l'aspetto e talvolta la funzione originaria, per adattarlo meglio alle esigenze del tempo. Inoltre i materiali hanno perso le loro caratteristiche originarie a causa dei degradi che intervengono a modificarle.

Le simulazioni che sono già state condotte dal Dipartimento DENERG del Politecnico di Torino si riferiscono alle condizioni del teatro nel 2015. Tuttavia è necessario considerare che i materiali e la geometria influiscono sulla resa acustica, perciò occorre investigare quali differenze è possibile riscontrare sull'acustica del palinsesto in base alle modifiche che sono state apportate nel tempo e in base al grado di conservazione dei materiali. Per essere in grado di confrontare i risultati con le misurazioni della condizione attuale è necessario che la geometria, i punti scelti per il posizionamento delle sorgenti e dei ricevitori, e le impostazioni ambientali coincidano in tutti i modelli usati per le simulazioni.

Per approfondire ulteriormente le analisi che sono già state effettuate è stato scelto di suddividere le porzioni della cavea in modo da rispecchiare maggiormente i materiali attualmente presenti nel teatro: essendo il teatro all'aperto, è costantemente sottoposto alle intemperie che da secoli ne modificano la geometria, rendendo necessari nuovi interventi.

È stato scelto di considerare le diverse epoche nelle quali sono state apportate delle modifiche sostanziali procedendo a partire dall'attualità all'origine, in base alle modifiche che sono state apportate. Verranno trattate le seguente epoche storiche:

- 2015
- 1965
- 1939
- Età Romana Imperiale - I secolo a.C
- Epoca Ellenistica - Metà III secolo a.C
- Origine Greca - Fine IV secolo a.C

6.1.1 La calibrazione del modello

Dall'osservazione indiretta delle condizioni ai giorni nostri del teatro si nota subito che i materiali non risultano nettamente differenziati, ma spesso sono compresenti in un unica porzione di spazio: per questo motivo nel modello di calcolo sono state necessarie alcune semplificazioni, che tramite la divisione dello spazio in percentuali, hanno comunque cercato di riprodurre le condizioni osservate nello fotografie scattate nel settembre 2015 da Bo e Mangano, tenendo conto delle esigenze legate alla calibrazione acustica, indirizzata verso le misurazioni rilevate in quell'occasione.

A partire dal file CAD utilizzato da Lepore e Kostara Konstantinou è stato esportato un modello per SketchUp v2018, che ha consentito in maniera più agevole la differenziazione delle porzioni di superficie e inoltre non utilizzando la geometria curva, permette di modellare uno spazio analizzabile in Odeon.

A differenza del modello di partenza, sono state modellate le nuove sedute in legno e in plastica che sono state aggiunte recentemente al teatro per rendere agibili alcune parti della cavea, le nicchie presenti nel podio di fronte all'orchestra e le rampe di scale che suddividono la cavea.

Fig.6.1.1: Il teatro nel 2015, (foto di Mangano, B.) elaborazione dell'autrice.

Il modello non include la vegetazione presente nel sito archeologico, come i cipressi sulla sommità della cavea, perchè la simulazione si riferisce in particolare al teatro: il contributo acustico della parte superiore è stato semplificato attribuendo il layer del terreno coperto da vegetazione all'80%. Inoltre dal punto di vista acustico, il loro ruolo probabilmente è più legato all'attenuazione dei rumori provenienti dalla strada adiacente, che non sono stati inclusi nella simulazione.

Si è cercato di modellare la geometria riproducendo nel modo più fedele possibile ciò che era presente nelle fotografie scattate nel 2015: sono state impostate le stesse condizioni di temperatura e umidità relativa rilevate e utilizzate nella simulazione di Kostara e Lepore, per riprodurre una condizione di utilizzo verosimile, dato il clima del luogo.

Una volta esportato il file .par tramite l'apposito plug-in di SketchUp per Odeon, è possibile aprire il modello in Odeon e impostare sorgenti e ricevitori, materiali e modalità di calcolo. Per quanto riguarda la prima categoria è stata impostata una sorgente sonora considerando l'origine degli assi al centro dell'orchestra: S1 di coordinate X=-1.00; Y=0.00; Z=1.70. In base alla normativa ISO 3382-1:2009: *Acoustics "Measurements of room acoustic parameters* e alla relativa definizione di *indice di robustezza* (G), è stato impostato un incremento pari a 31 dB per ogni frequenza emessa dalla sorgente. Sono stati impostati i seguito 9 ricevitori nella cavea secondo le seguenti coordinate:

Tab. 6.1.1: Le coordinate dei ricevitori del Teatro di Tindari, con origine al centro dell'orchestra.

No	Receiver description	X	Y	Z
1	R1	28.340	13.750	11.900
2	R2	20.790	10.080	7.700
3	R3	14.390	7.190	4.200
4	R4	18.970	25.150	11.900
5	R5	13.910	18.440	7.700
6	R6	9.690	12.860	4.200
7	R7	2.650	31.390	11.900
8	R8	1.950	23.020	7.700
9	R9	1.350	16.040	4.200

Successivamente sono state impostate le modalità di calcolo: nello specifico, è stata impostata la temperatura dell'aria a 26°C e l'umidità relativa al 77%. Non sono stati inseriti dati per quanto riguarda i rumori di fondo, non è stato infatti calcolato lo STI,e la simulazione si riferisce alla condizione del teatro senza spettatori. È stata poi impostata la lunghezza delle risposte all'impulso (Impulse response lenght = 1500 ms) e il numero di raggi utilizzati nella simulazione per simulare le onde sonore emesse dalla sorgente (Late rays = 4.000.000).

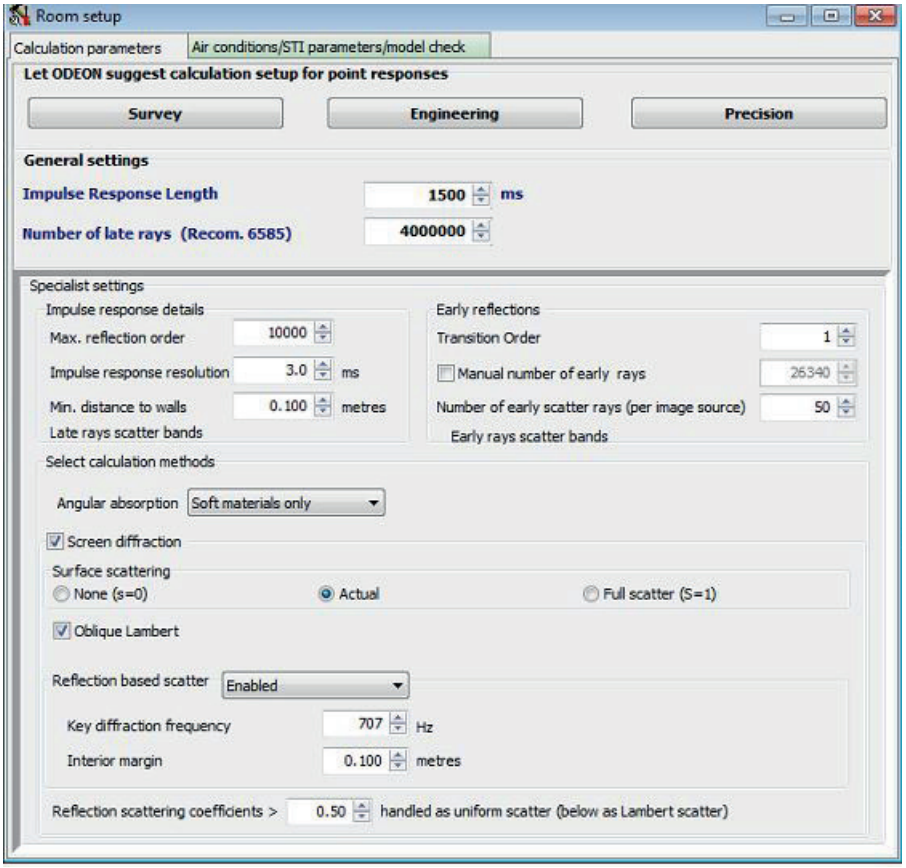


Fig. 6.1.2: Le impostazioni di calcolo di Odeon v16.

Per svolgere correttamente la calibrazione del modello del teatro non occupato sono stati considerati primariamente i valori misurati durante il sopralluogo del 2015 e opportunamente restituiti tramite software in forma di parametri acustici in frequenza. Sono stati valutati i seguenti parametri confrontando i valori simulati con quelli misurati: EDT, T_{30}, T_{20}, G, D_{50} e C_{80}. Tuttavia, come anche specificato nella normativa ISO 3382-1:2009, i parametri relativi al tempo di riverberazione non si rivelano un indicatore ottimale per la valutazione acustica di uno spazio aperto, poichè sono più attendibili per quella degli spazi chiusi.

È stato allora concordato di procedere alla calibrazione considerando maggiormente i parametri T_{20} e G, la cui unione permette di diminuire l'errore tra il manufatto reale e quello simulato, in particolare basandosi sul MAD (Mean absolute differences), ossia confrontando la media in valore assoluto dei parametri ottenuti tra 500 e 1000 Hz per tutti i ricevitori con i valori di JND da normativa ISO 3382-1:2009.

Per quanto riguarda invece l'impostazione dei materiali, si è dovuto tenere conto non solo della loro reale disposizione e forma nel teatro, ma anche delle caratteristiche legate ai loro coefficienti di assorbimento e scattering necessariamente collegati alla loro composizione chimica. Si è cercato un equilibrio tra queste premesse in modo che la simulazione si avvicinasse il più possibile ai valori misurati.

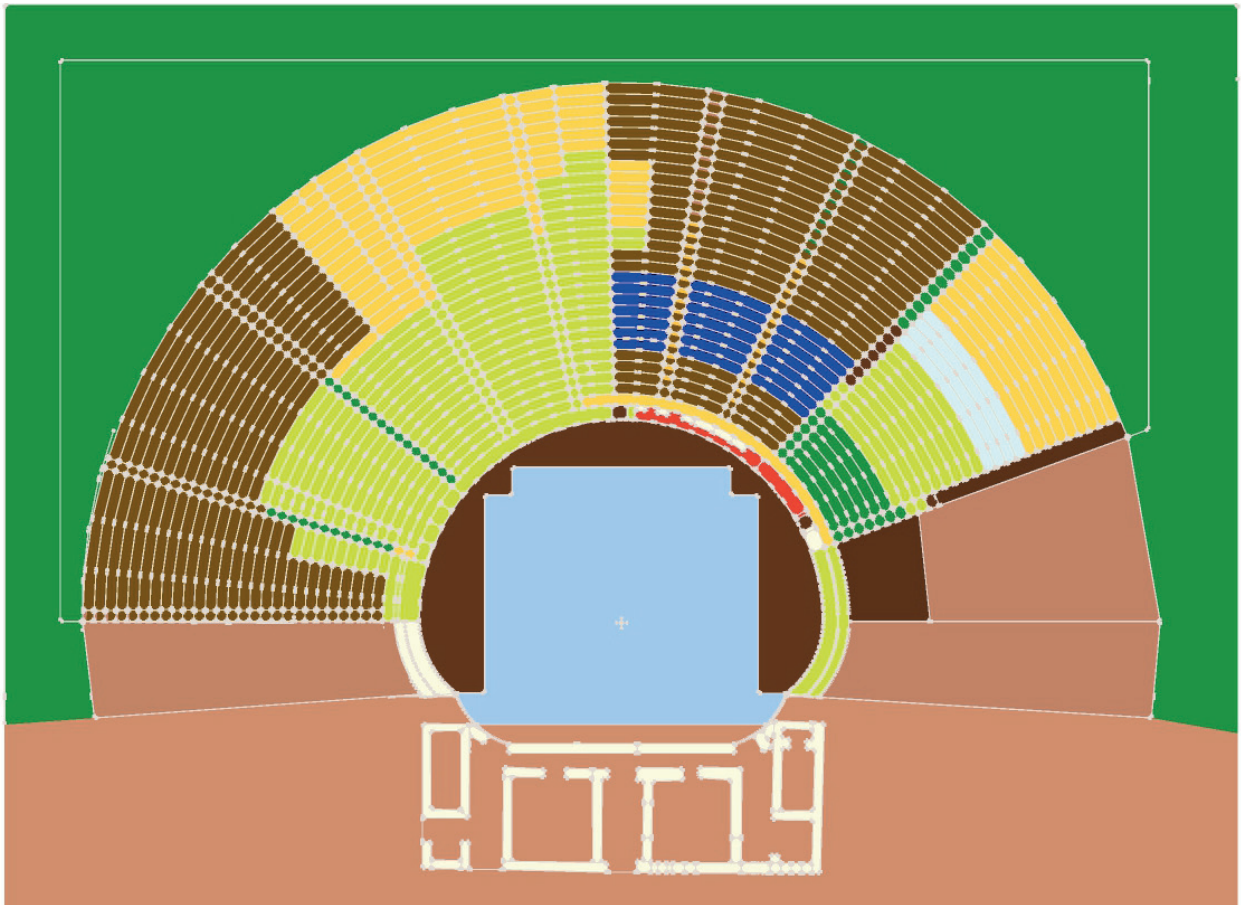
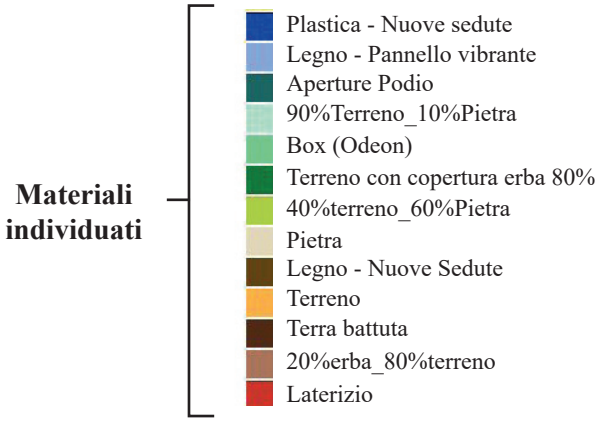


Fig. 6.1.3: Vista zenitale del modello SketchUp con i materiali assegnati.

Come già specificato, per riprendere il lavoro svolto in precedenza dal Politecnico di Torino e poter confrontare i risultati ottenuti, è stato necessario usare lo stesso modello di partenza: tuttavia sono stati modificati e aggiunti alcuni livelli, alla quale poi in Odeon sono stati attribuiti i coefficienti di assorbimento e di scattering: i colori utilizzati nella rappresentazione del modello tridimensionale indicano una tipologia diversa di materiale applicato.

Per ognuno dei materiali o di combinazioni di materiali individuate in percentuale, sono stati scelti dei coefficienti di assorbimento partendo dalla ricerca dei coefficienti usati per le precedenti simulazioni e confrontandoli con quelli utilizzati per le simulazioni riguardanti altri teatri, ad esempio quelli presentati alla conferenza di Patrasso nel 2011 riguardanti il progetto ERATO e adattandoli alle necessità della calibrazione, tenendo conto della natura dei materiali e della loro prestazione acustica. In alcuni casi, è stato necessario aggiungere informazioni provenienti da un' altra tipologia di articoli scientifici, non riguardanti i teatri antichi, che avevano l'obbiettivo di caratterizzare le prestazioni acustiche dei materiali naturali, come quella del terreno in base alla percentuale di umidità, alla profondità e alla percentuale di vegetazione che lo ricopre.

Di seguito sono riportati i livelli che sono stati individuati in SketchUp v2018 per la simulazione in Odeon v16, e i valori dei coefficienti di assorbimento α associati.



Tab 6.1.2: I coefficienti di assorbimento utilizzati per le simulazione con il software Odeon.

MATERIALI	Frequenze (Hz)								Scattering
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	707 Hz
ELEMENTI TERRA	0,25	0,35	0,42	0,43	0,44	0,3	0,21	0,19	0,8
PANNELLO VIBRANTE_LEGNO	0,4	0,4	0,3	0,19	0,03	0,03	0,03	0,03	0,3
PLASTICA	0,15	0,15	0,15	0,15	0,05	0,05	0,05	0,05	0,9
90%TERRENO_10%ERBA	0,24	0,33	0,39	0,41	0,36	0,25	0,12	0,08	0,52
20%ERBA_80%TERRENO	0,39	0,35	0,38	0,39	0,3	0,2	0,13	0,08	0,63
60%TERRENO_40%PIETRA	0,31	0,25	0,28	0,29	0,2	0,15	0,1	0,1	0,66
ERBA	0,2	0,25	0,36	0,37	0,38	0,28	0,19	0,18	0,1
PIETRA	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,55
TERRA BATTUTA	0,25	0,22	0,35	0,35	0,22	0,18	0,1	0,05	0,8
LEGNO	0,4	0,4	0,3	0,2	0,04	0,02	0,02	0,02	0,2
LATERIZIO	0,2	0,2	0,2	0,1	0,05	0,05	0,05	0,05	0,7
APERTURE PODIO	1	1	1	1	1	1	1	1	0,05

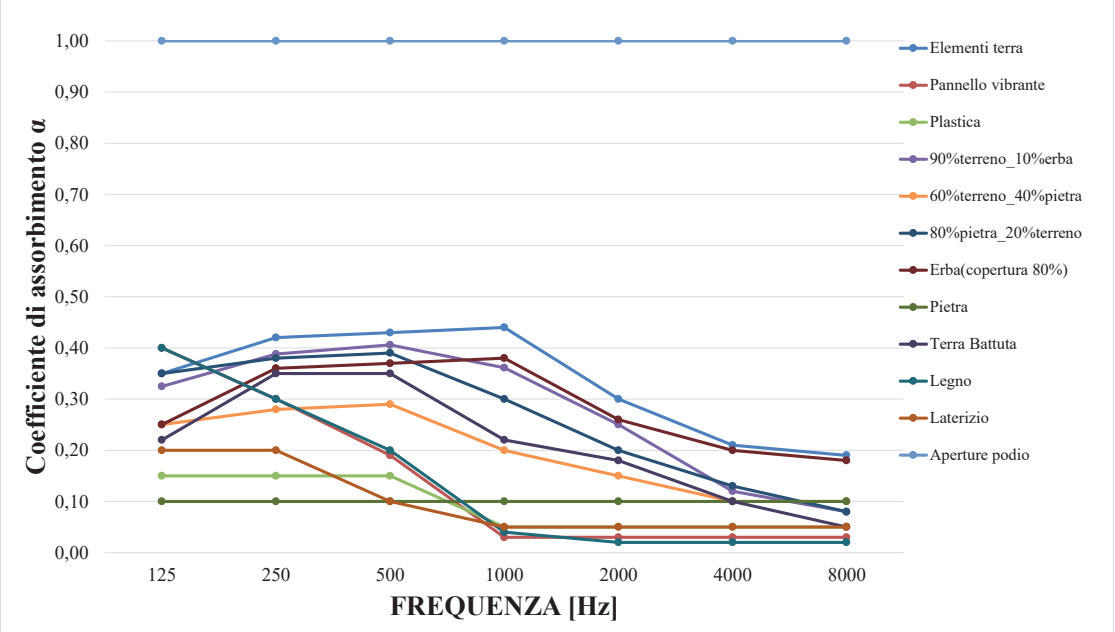


Fig: 6.1.4: Rappresentazione dei coefficienti di assorbimento utilizzati per le simulazione con il software Odeon.

Le fonti utilizzate per la determinazione dei coefficienti di assorbimento e scattering sono ricerche analoghe sul tema dei teatri antichi, ad eccezione dell'articolo di Yang, H.S., Kang, J., Cheal, C in cui la ricerca si concentra esclusivamente sulla valutazione della prestazione acustica di alcuni materiali organici, come il terreno e la vegetazione.
Per la determinazione dei coefficienti di assorbimento e scattering sono stati presi in considerazione quelli riportati nelle tabelle 5.3.1, 5.3.2, 5.3.3, 5.3.4, 6.1.3, 6.1.4.

Tab 6.1.3: Goussios, C., Chourmouziadou, K., Tsinikas, N, Kalliris, G., I coefficienti di assorbimento utilizzati

GOUSSIOS_ CHOURMOUDZIADOU_TSINIKAS_KALLIRIS ***NIKOPOLIS***		**Coef Assorbimento:** Frequenze (Hz) **125**	**250**	**500**	**1000**	**2000**	**4000**
sedute in alto	Mattoni	0,09	0,07	0,05	0,05	0,05	0,05
sedute in alto	Pietra	0,04	0,05	0,06	0,06	0,07	0,09
palco	Legno	0,15	0,11	0,1	0,07	0,06	0,07
copertura	Velarium	0,05	0,03	0,35	0,4	0,5	0,5

Tab 6.1.4: Yang, H.S., Kang, J., Cheal, C. I coefficienti di assorbimento delle vegetazione misurati in base alla copertura del suolo.

YANG_KANG_CHEAL ***ABSORPTION AND SCATTERING COEFFICIENTS OF VEGETATION***			**Coef Assorbimento:** Frequenze (Hz) **125**	**250**	**500**	**1000**	**2000**	**4000**
Terreno senza vegetazione	copertura 0%		0,25	0,5	0,65	0,9	0,85	0,82
Terreno con vegetazione	copertura 100%		0,55	0,8	0,85	1	0,9	0,6
	copertura 80%		0,65	0,75	0,8	0,85	0,75	0,65
	copertura 60%		0,5	0,6	0,8	0,95	0,85	0,75
	copertura 40%		0,3	0,55	0,8	0,95	0,85	0,8
	copertura 20%		0,25	0,5	0,8	0,9	0,85	0,75
Coefficienti di assorbimento in base alla percentuale di umidità del terreno.	umidità 25,4%		0,08	0,3	0,3	0,35	0,25	0,15
	20,40%		0,2	0,5	0,55	0,62	0,55	0,38
	23,8,%		0,22	0,4	0,42	0,45	0,35	0,2
	28,9		0,18	0,2	0,25	0,22	0,21	0,12
	34,1	0,15	0,01	0,18	0,2	0,2	0,15	0,01

6.1.2 I risultati e il confronto con i dati misurati

Dopo diversi tentativi, è stato possibile ottenere i valori considerati corretti per la taratura del modello: utilizzando il MAD come metodo di valutazione tra i valori simulati e misurati, questo risultava verificato per T_{20} e G. I dati riguardanti le misurazioni sono stati ricavati dall'articolo e sono stati utilizzati per il confronto MAD in base a JND come indicato nella tab 6.1.5.

Per i valori di JND utilizzati si fa riferimento alla tab. 5.3.5.

Tab. 6.1.5: La verifica di T_{20} e G con il metodo MAD in base a JND

|SIMULATO-MUSURATO_MAD T20 in frequenza|

	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
R1	0,29	0,14	0,03	0,03	0,00	0,01	0,02	0,04
R2	0,17	0,09	0,07	0,02	0,03	0,02	0,01	0,00
R3	0,07	0,01	0,02	0,01	0,03	0,07	0,08	0,07
R4	0,21	0,15	0,01	0,01	0,00	0,02	0,02	0,00
R5	0,22	0,03	0,03	0,01	0,00	0,01	0,04	0,04
R6	0,07	0,06	0,06	0,01	0,03	0,03	0,03	0,02
R7	0,24	0,00	0,02	0,00	0,02	0,02	0,03	0,03
R8	0,29	0,04	0,03	0,02	0,06	0,05	0,05	0,02
R9	0,09	0,13	0,03	0,04	0,00	0,06	0,05	0,02
media in frequenza	0,18	0,07	0,03	0,02	0,02	0,03	0,03	0,03

Media 500-1000Hz	0,018

|SIMULATO-MISURATO_MAD G in frequenza|

	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
R1	3,02	2,14	0,90	0,51	0,24	1,52	2,26	5,15
R2	4,47	4,32	0,65	0,59	1,24	0,53	0,93	1,95
R3	3,87	2,75	0,06	1,28	0,56	1,38	1,63	1,35
R4	4,10	3,94	1,01	0,92	0,16	1,07	1,18	5,05
R5	4,00	3,97	0,95	1,00	0,05	0,94	1,36	3,25
R6	4,42	3,37	0,10	0,50	0,21	1,26	0,56	1,35
R7	5,35	4,41	0,61	0,79	0,27	2,69	1,75	5,00
R8	4,74	4,18	0,74	0,85	0,22	1,59	1,26	3,15
R9	5,60	4,43	0,80	0,48	1,40	0,71	0,24	0,15
media in frequenza	4,40	3,72	0,65	0,77	0,48	1,30	1,24	2,93

Media 500-1000Hz	0,624

Successivamente verranno rappresentati i valori misurati e quelli simulati: si può notare che non si presenta un eccessivo scostamento tra le due tipologie per le frequenze comprese tra 250 Hz e 8000 Hz, mentre questo aumenta notevolmente se si considerano i valori di T_{20} registrati e simulati a 125 Hz. A questo proposito è stato affermato che la valutazione dell'Impulse Response-to-Noise Ratio, INR (dB) attesta la buona qualità delle misurazioni per tutte le frequenze ad eccezione di quella a 125 Hz . L'attendibilità delle misurazioni dipende dal fatto che il teatro si trovi in uno spazio aperto, dove il suono può disperdesi più velocemente non incontrando superfici riflettenti, e inoltre le misurazioni sono influenzate anche dall'umidità e dalla temperatura dell'aria, che ne influenzano di conseguenza la densità e la diffusione del suono attraverso di essa: questi fattori a differenza degli spazi chiusi sono variabili nel tempo.

Tab 6.1.6: L'attendibilità dei valori misurati in frequenza (tratto da Bo, E., 2017).

INR > 35 dB								
	Frequency (Hz)							
Theatre and Source	**125**	**250**	**500**	**1000**	**2000**	**4000**	**8000**	**Average 500-1000**
TYN – $S1_D$	69%	100%	96%	100%	100%	100%	100%	98%
TYN – $S2_D$	64%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
TYN – $S1_F$	65%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
SYR – $S1_F$	64%	96%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
SYR – $S2_F$	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
INR > 45 dB								
	Frequency (Hz)							
Theatre and Source	**125**	**250**	**500**	**1000**	**2000**	**4000**	**8000**	**Average 500-1000**
TYN – $S1_D$	0%	62%	73%	65%	81%	62%	89%	69%
TYN – $S2_D$	0%	64%	91%	91%	91%	73%	100%	91%
TYN – $S1_F$	20%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
SYR – $S1_F$	82%	46%	96%	96%	96%	96%	100%	96%
SYR – $S2_F$	45%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%

Nei grafici seguenti è raffigurato il confronto tra i valori ottenuti dalla simulazione e quelli misurati: è possibile notare che i valori ottenuti dalla simulazione tendono ad essere lievemente maggiori rispetto ai dati misurati nelle frequenze più basse, mentre la tendenza si inverte nelle frequenze più alte: ciò è dovuto ai coefficienti di assorbimento attribuiti ai diversi materiali, che per natura, e non essendo assimilabili a pannelli vibranti, ad eccezione delle sedute in legno e della pedana nell'orchestra, tendono ad assorbire una minore quantità di energia alle basse frequenze, mentre assorbono maggiormente alle medie e alte frequenze. Ciò nonostante, gli scostamenti tra le due tipologie non eccedono il 5% come da normativa, ad eccezione della frequenza 125 Hz.

Questi dati sono stati ottenuti tramite le simulazioni effettuate con il software Odeon, che calcola i valori in base agli standard della normativa ISO 3382-1, 2009, parti 1,2,3. In particolare per il calcolo di T_{20} è stato calcolato il tempo necessario, al cessare del suono, perchè questo si riducesse di 20 dB. Per ottenere questo valore Odeon applica una regressione lineare al tempo intercorso al passaggio da -5 a -25 dB e moltiplica il risultato per 3.

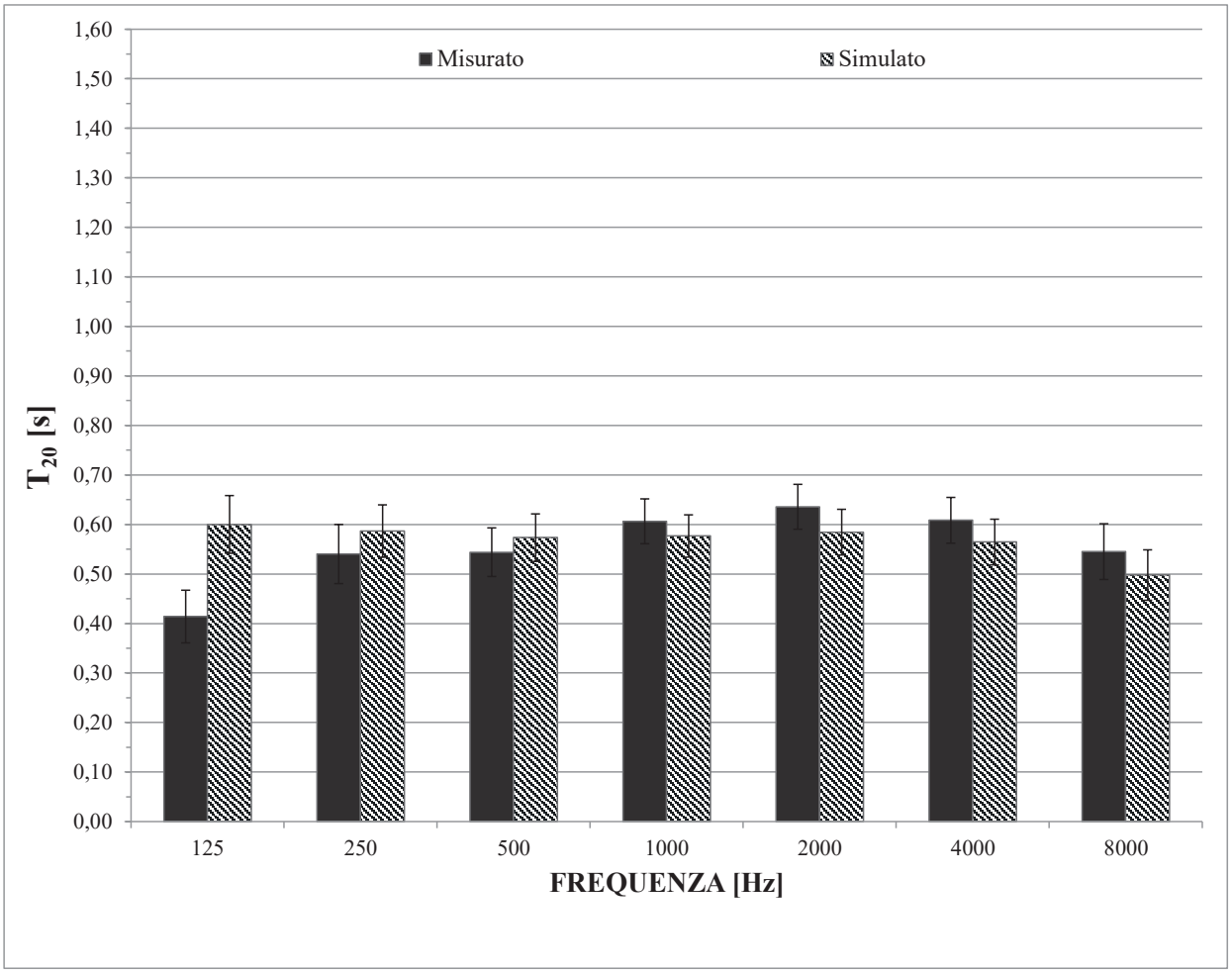


Fig. 6.1.5: I valori simulati e misurati del teatro di Tindari.

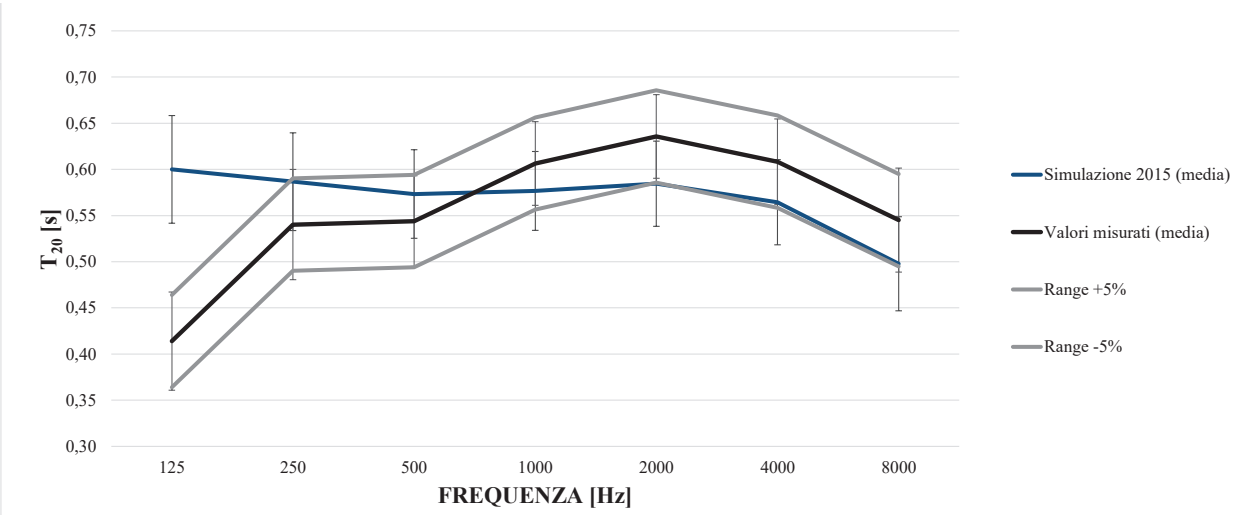


Fig. 6.1.6: I valori di T_{20} simulati del teatro di Tindari rientrano nel range di tolleranza JND del 5% per le frequenze comprese tra 250 e 8000 Hz.

Per quanto riguarda i parametri che descrivono l'indice di robustezza del suono G (dB) si può notare che in entrambi i casi sono influenzati dalla distanza (d) che intercorre tra la fonte e i ricevitori: i valori sono espressi in scala logaritmica nel grafico a diffusione e possono essere confrontati con l'ipotesi in campo aperto. La tabella sottostante rappresenta i valori che permettono di ricavare G_{mid} in base all'equazione $G_{mid} = A_i + B_i \log_{10}(d)$ per ognuna delle misurazioni e simulazioni effettuate, ossia 2 misurazioni ricavate dal dodecaedro (S1D) (S2D), una col petardo (S1F) e la simulazione (S1S). Il gap tra le curve misurazioni-simulazione del teatro e il campo aperto è circa 3 - 4 dB: inoltre si può affermare che l'indice i robustezza G sia relativamente basso poichè tra 500 e 1000 Hz varia da -8 a -1 dB nelle misurazioni e da -8.05 a -0.5 per le simulazioni.

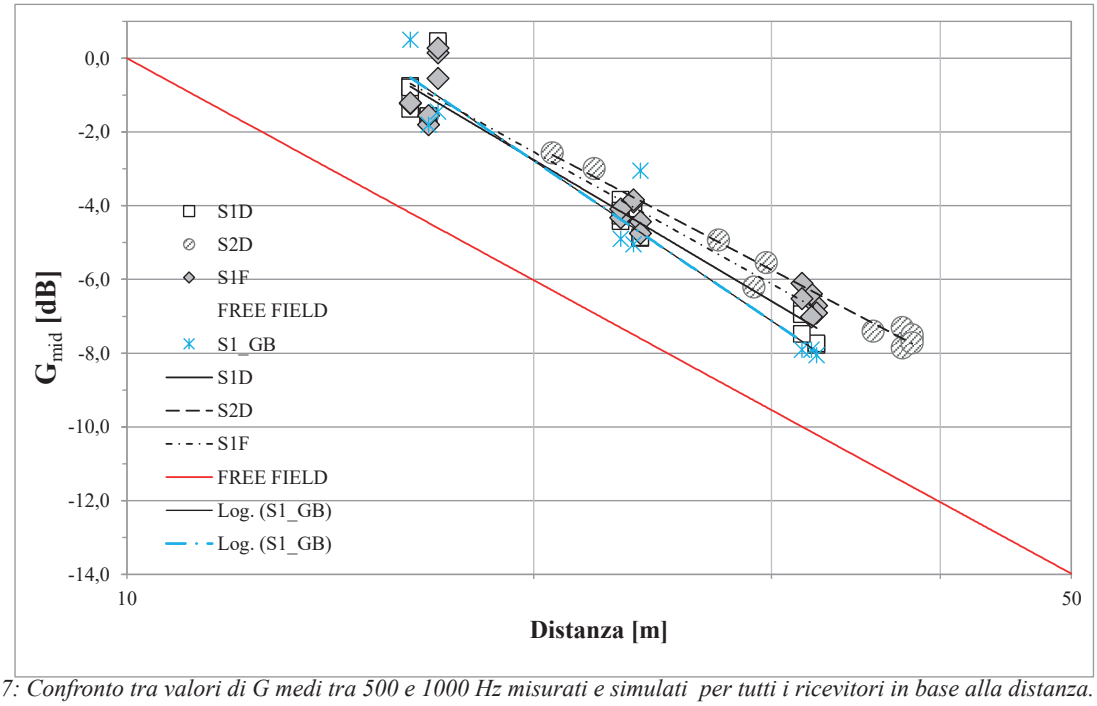


Fig. 6.1.7: Confronto tra valori di G medi tra 500 e 1000 Hz misurati e simulati per tutti i ricevitori in base alla distanza.

Tab 6.1.7: Parametri della regressione lineare per i valori di G_{mid} in base alla fig. 6.1.7 con relativo coefficiente R^2.

Fonte	A	B	R^2
Free field	20	-20	1
S1D	25,6	-21,8	0,95
S2D	22,7	-19,2	0,98
S1F	23,9	-20,3	0,94
S1S	29,3	-24,7	0,93

Di seguito vengono riportati i parametri C_{50} e C_{80} che descrivono rispettivamente l'indice di chiarezza del parlato e della musica: Dal confronto emerge che i valori simulati sono minori di quelli misurati, in particolare per quanto riguarda quelli misurati C_{50} nella banda tra 500 e 1000 Hz è 12.6 dB, mentre per il modello simulato 10.7 dB; per quanto riguarda C_{80}invece il valore medio alle stesse frequenze è 17.5 tra le misurazioni, mentre è 14.70 per la simulazione. A differenza di T_{20} gli indici di deviazione standard sono maggiori sia nelle misurazioni che nella simulazione: 2.5 dB per C_{50} in tutte le bande di frequenza per i valori misurati e 2.3 dB per quelli simulati, mentre scende a circa 1 in entrambi i casi per C80.

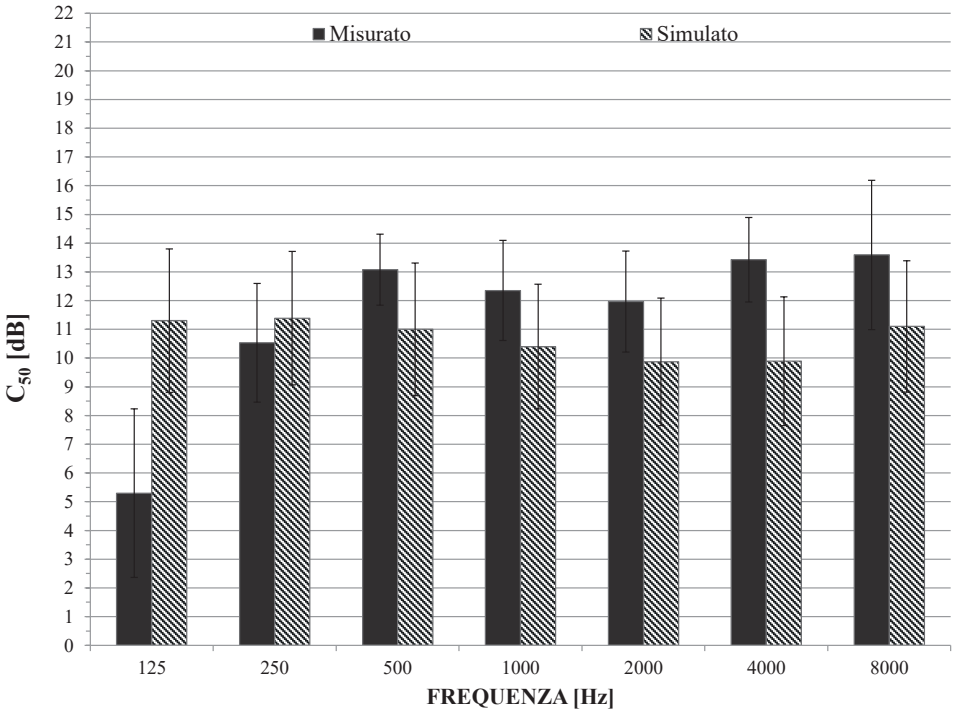


Fig 6.1.8: Confronto tra valori di C_{50} misurati e simulati in frequenza.

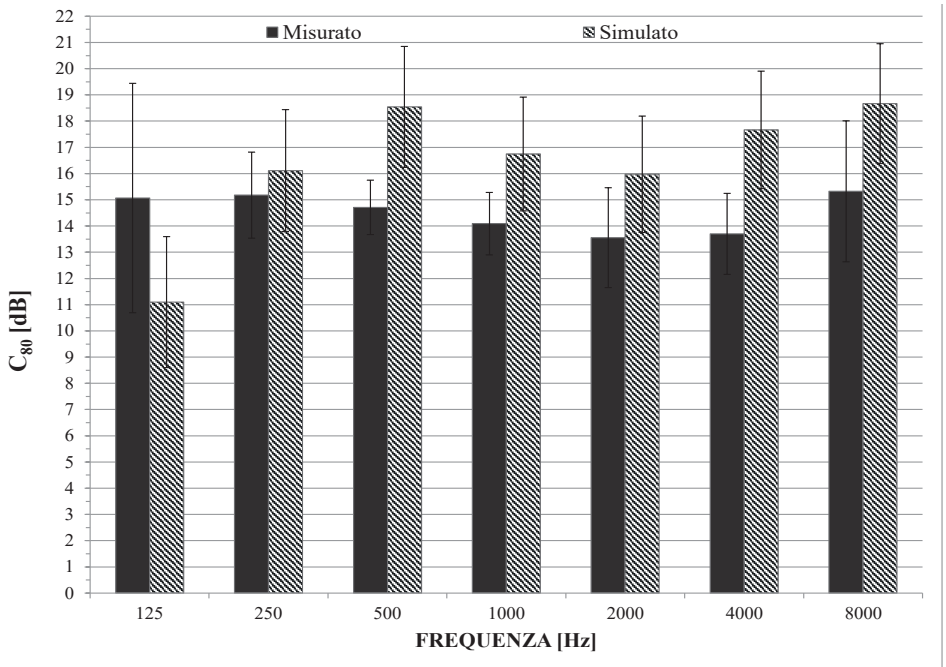


Fig.6.1.9: Confronto tra valori di C_{80} misurati e simulati in frequenza.

6.1.3 La simulazione del teatro occupato

In occasione degli spettacoli è consentito solamente di sedersi sulle tavole in legno e sulle sedie in plastica appositamente installate nella cavea e nell'orchestra, per evitare di danneggiare le pietre ripristinate durante gli ultimi interventi di restauro archeologico.

Fig. 6.1.10 *La disposizione del pubblico durante l'Indiegeno Fest 2017*

Per questo motivo per simulare la presenza degli spettatori sugli spalti è stato scelto di cambiare i coefficienti di assorbimento dei materiali dove si dispone il pubblico. Nello specifico i coefficienti modificati di riferiscono ai livelli Plastica-nuove sedute e Legno-nuove sedute: nel primo caso in base al *Building Bullettin 93* è stato scelto il materiale *Adults on timber seats, 1 per m2 per item* con i relativi coefficienti α per la stessa banda di frequenza 0,16; 0,24; 0,56; 0,69; 0,81; 0,78. Come in precedenza sono stati presi in considerazione T_{20} e G per la valutazione dell'acustica all'interno dello spazio misurato: per quanto riguarda T_{20} è possibile notare che sono diminuiti i valori per le frequenze maggiori o uguali a 1000 Hz, mentre quelle medio basse sono rimaste invariate. Questa variazione si può vedere nella tipologia di grafico utile prima a dimostrare che i valori di T_{20} fossero all'interno del margine di tollerabilità, nella condizione del teatro occupato invece i valori per le medio alte frequenze hanno uno scostamento superiore al 5% dai valori registrati con il teatro vuoto.

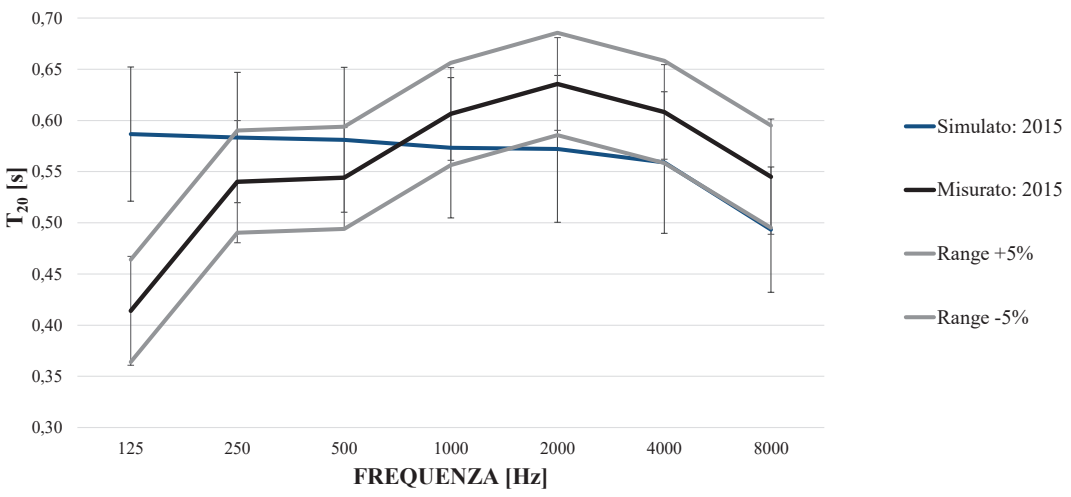


Fig 6.1.11: Confronto tra valori di T_{20} misurati nel teatro non occupato e quelli simulati del teatro occupato in frequenza

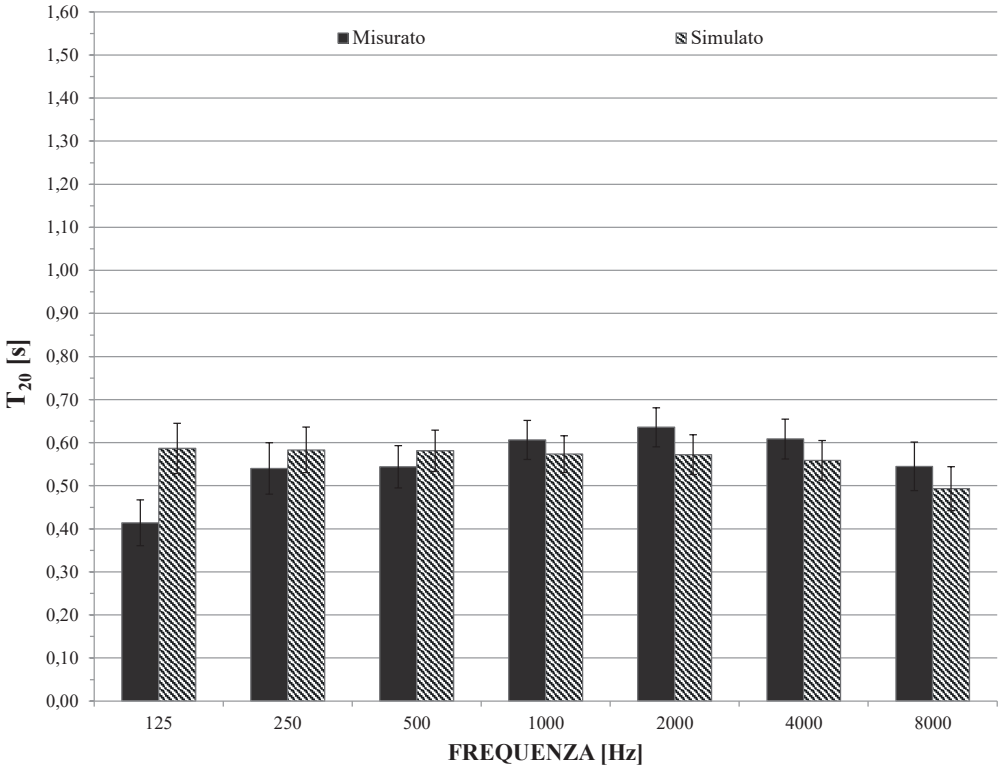


Fig 6.1.12: Confronto tra valori di T_{20} simulati nel teatro non occupato e quelli simulati del teatro occupato in frequenza

Da quanto emerge lo scostamento non è molto rilevante, questo può essere dovuto al fatto che il teatro al massimo della capienza non ha la possibilità di sfruttare al massimo tutti i suoi spazi per motivi di tutela del patrimonio architettonico.

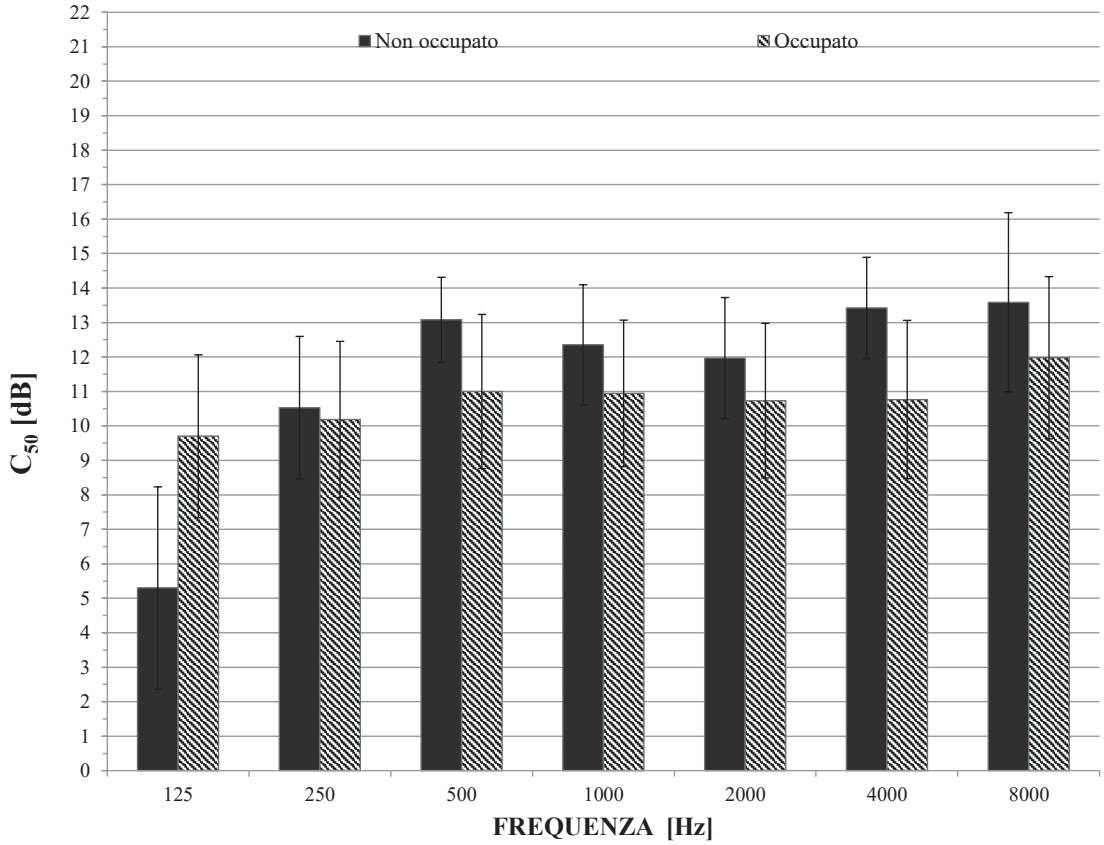


Fig 6.1.13: Confronto tra valori di T_{20} simulati nel teatro non occupato e quelli simulati del teatro occupato in frequenza

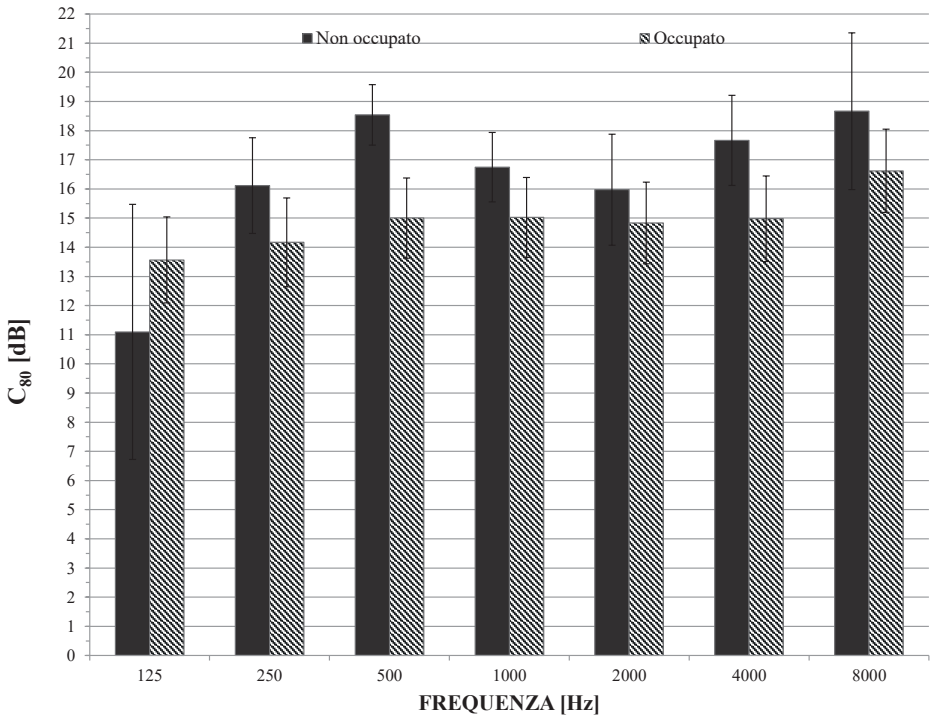


Fig 6.1.14: Confronto tra valori di T_{20} simulati nel teatro non occupato e quelli simulati del teatro occupato in frequenza.

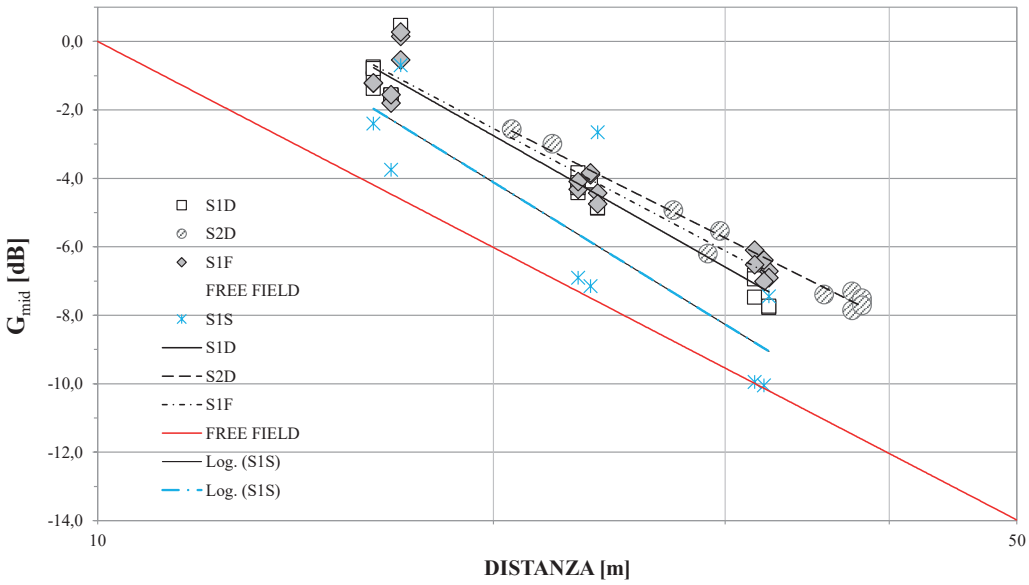


Fig 6.1.15: Confronto tra valori di G medi tra 500 e 1000 Hz misurati e simulati per tutti i ricevitori in base alla distanza. In azzurro i valori del teatro occupato, in grigio i valori misurati del teatro vuoto.

Tab 6.1.8: Parametri della regressione lineare per i valori di G_{mid} in base alla Fig. 6.1.15 con relativo coefficiente R^2.

Fonte	A	B	R_2
Free field	20	-20	1
S1D	25,6	-21,8	0,95
S2D	22,7	-19,2	0,98
S1F	23,9	-20,3	0,94
S1S	29,5	-24,9	0,93

Emerge invece in maniera più chiara la diminuzione dei valori dell'indice di robustezza G, in particolare all'aumentare della distanza: questo è dovuto al fatto che nell'orchestra sono presenti ulteriori spettatori seduti che impediscono di sfruttare la riflessione delle onde sonore che avverrebbe per via della pedana in legno e della terra battuta. Tuttavia questa simulazione non corrisponde esattamente a ciò che avviene durante le attuali rappresentazioni teatrali, poichè si tratta di uno studio dell'acustica passiva, mentre l'audio degli spettacoli attuali viene amplificato elettronicamente, sono quindi diverse le reali pozioni delle sorgenti sonore e l'intensità a cui il suono viene emesso.

6.2 La progressione acustica del teatro di Tindari nel tempo

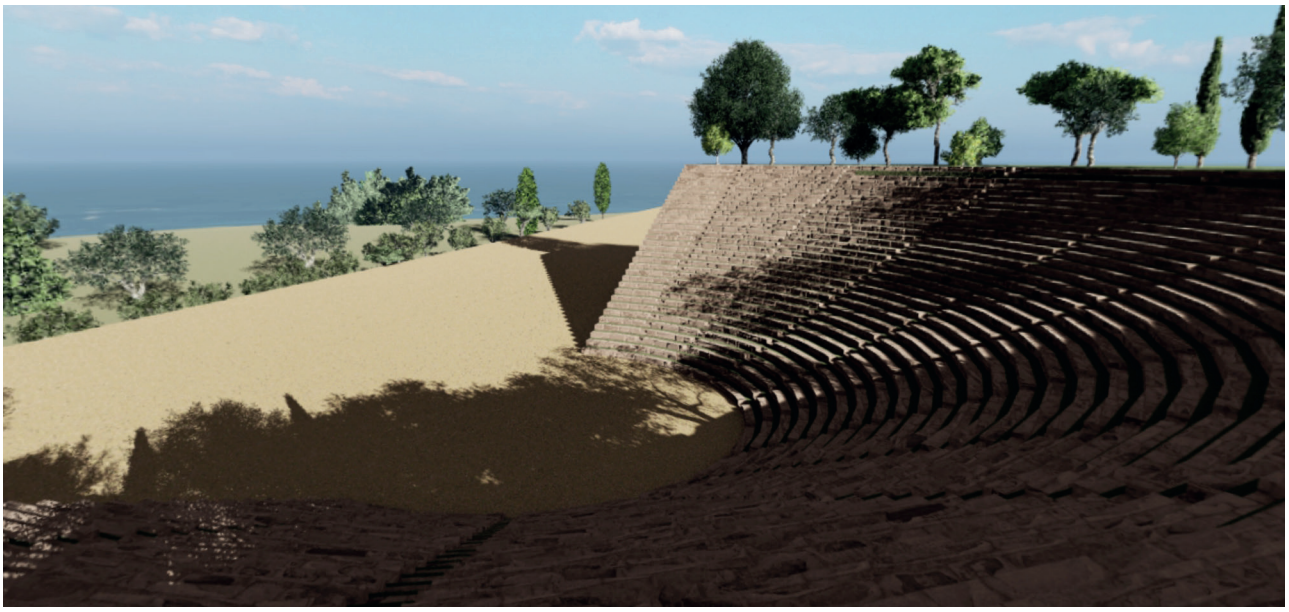


Fig 6.2.1: Il teatro di Tindari alla fine del IV secolo a.C.

Fig 6.2.2: Il teatro di Tindari intorno alla metà del III secolo a.C.

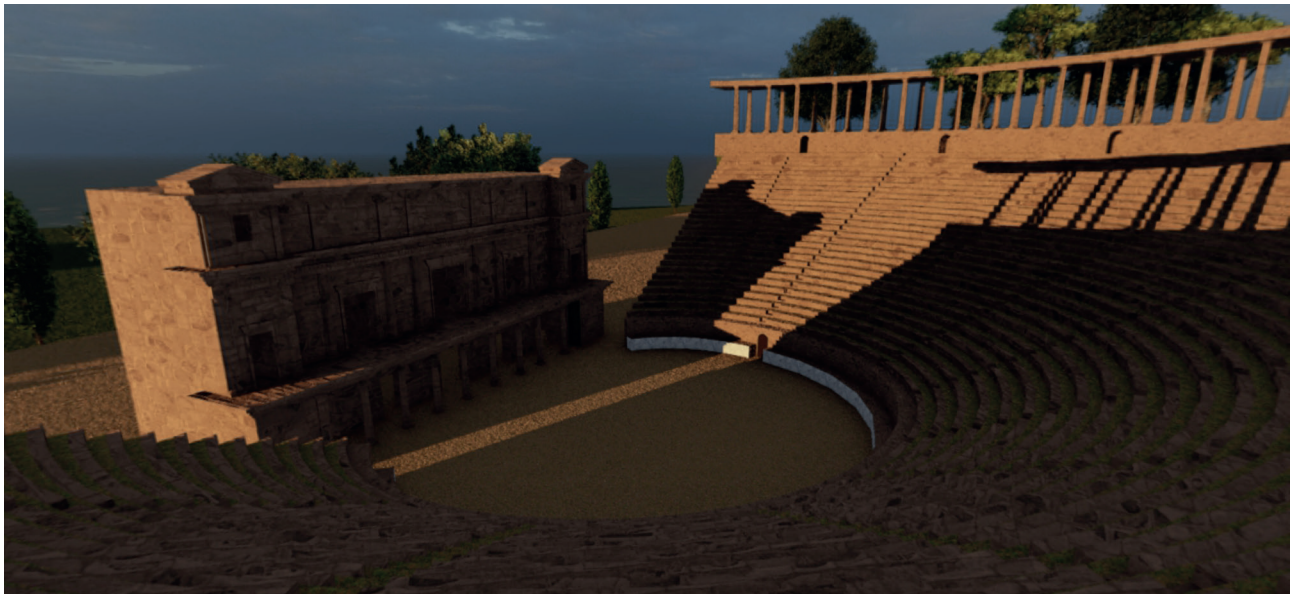


Fig 6.2.3: Il teatro di Tindari alla fine del I secolo a.C.

Fig 6.2.4: Il teatro di Tindari nel 1939.

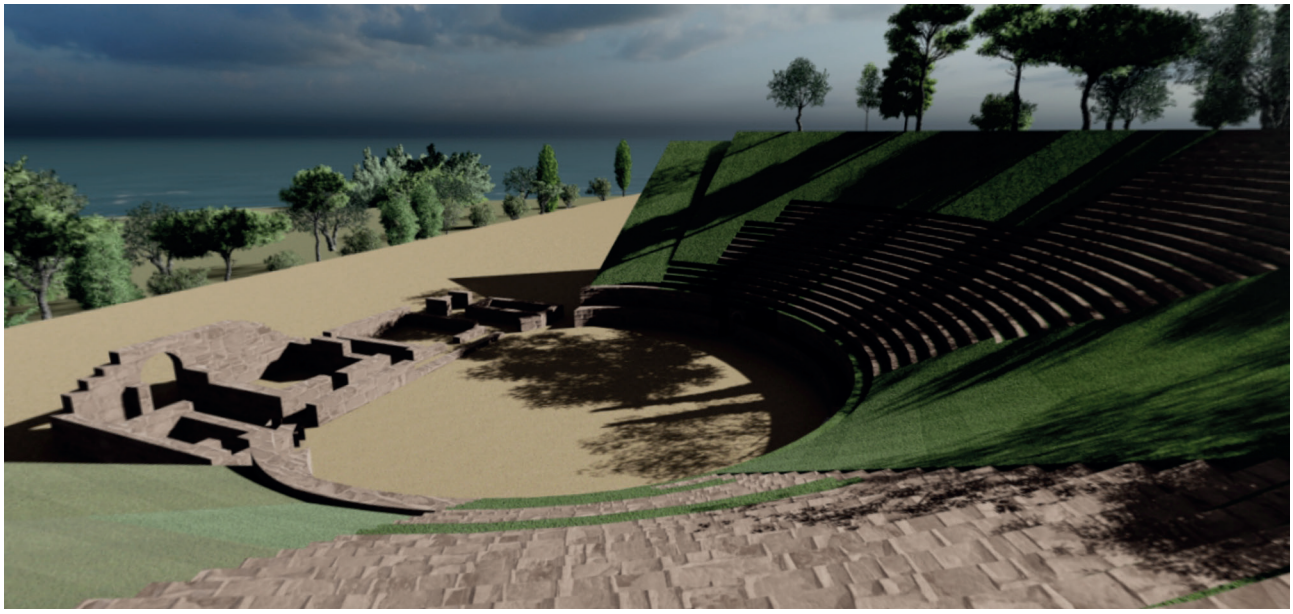


Fig 6.2.5: Il teatro di Tindari nel 1965.

Fig 6.2.6: Il teatro di Tindari nel 2015.

Come già anticipato nel paragrafo 4.1.2, il teatro di Tindari ha subito nel tempo diverse modifiche architettoniche che ne hanno influenzato la resa acustica.

Nei grafici seguenti è possibile vedere concretizzata l'influenza delle diverse forme e dei diversi materiali che hanno composto il teatro di Tindari nel tempo: si nota subito che quando era presente un maggior numero di strutture verticali, come la scena e il colonnato, si aveva una prestazione molto diversa da quella attuale sia in termini di tempo di riverberazione che di chiarezza; per quanto riguarda T_{20} infatti, si può notare che nella fase romana del I secolo a.C e in quella ellenistica del III secolo a.C si hanno prestazioni molto diverse rispetto alle altre epoche simulate che presentano una minore differenza tra loro in termini di resa acustica.

Tutti i modelli di simulazione seguenti si riferiscono alla condizione del teatro non occupato e perchè mediamente tra 500 e 1000 Hz il suono al termine dell'emissione si riduca di 20 dB, sono necessari 0,64 s per la simulazione della fase greca (TYNG), 0.86 s per la simulazione del teatro in epoca ellenistica (TYNH), 1,05 s nella la simulazione del periodo romano imperiale (TYNR), 0.51 s nel modello che simula la condizione dopo il primo restauro terminato nel 1939 (TYN1939), 0,55 s per quello del teatro nel 1965 dopo il secondo restauro (TYN1965), e infine 0,57 s per le caratteristiche fisiche presenti nel modello del 2015 (TYN2015). È evidente che laddove sono presenti superfici più estese di materiale che riflette la maggior parte delle onde sonore incidenti, a causa delle intrinseche proprietà fisiche legate anche alla composizione chimica, si ottiene un tempo di riverberazione più alto rispetto ai casi in cui sono presenti materiali porosi in maggiore quantità.

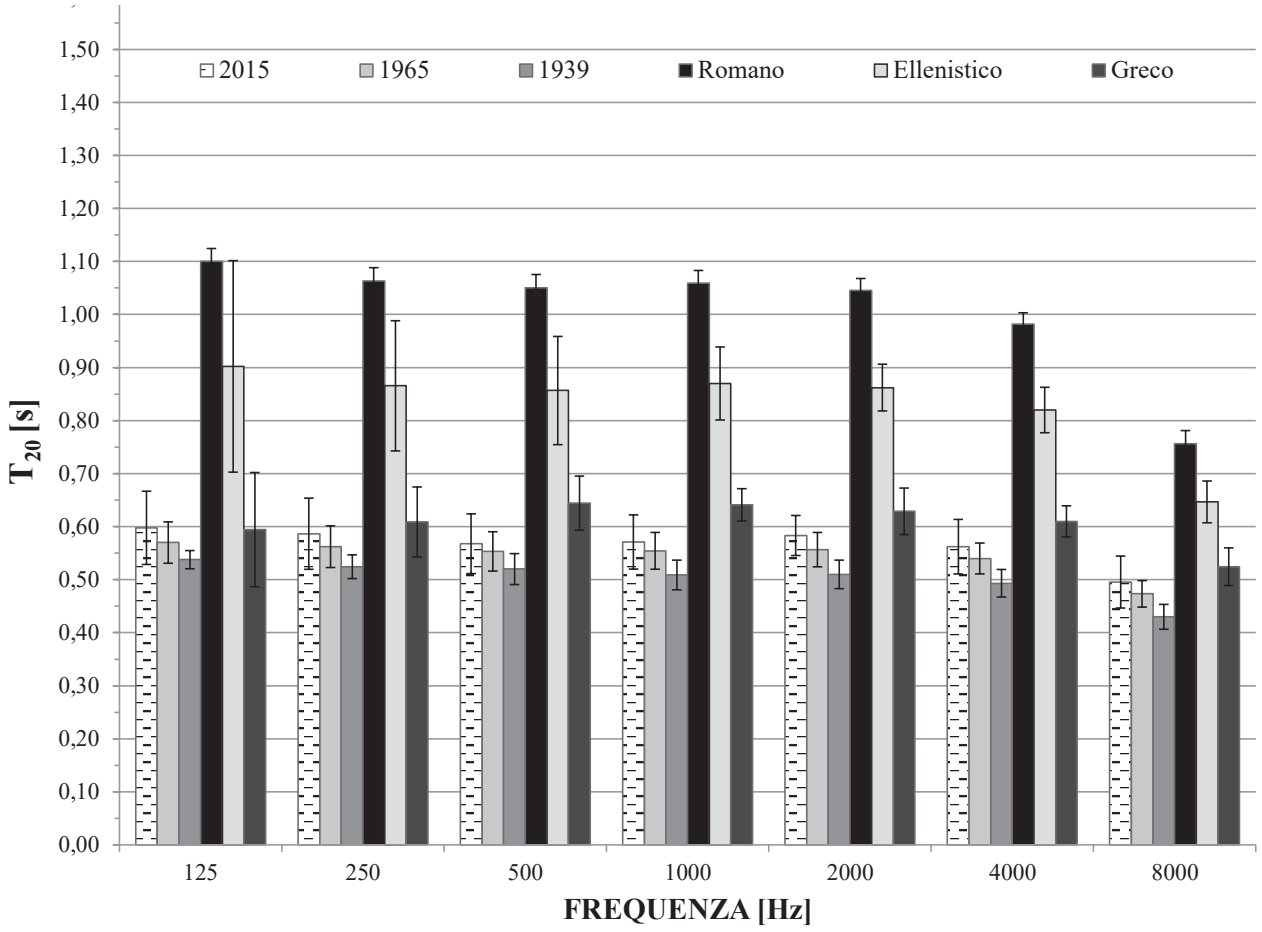


Fig 6.2.7: Confronto tra valori di T_{20} simulati in frequenza delle diverse fasi storiche del teatro di Tindari

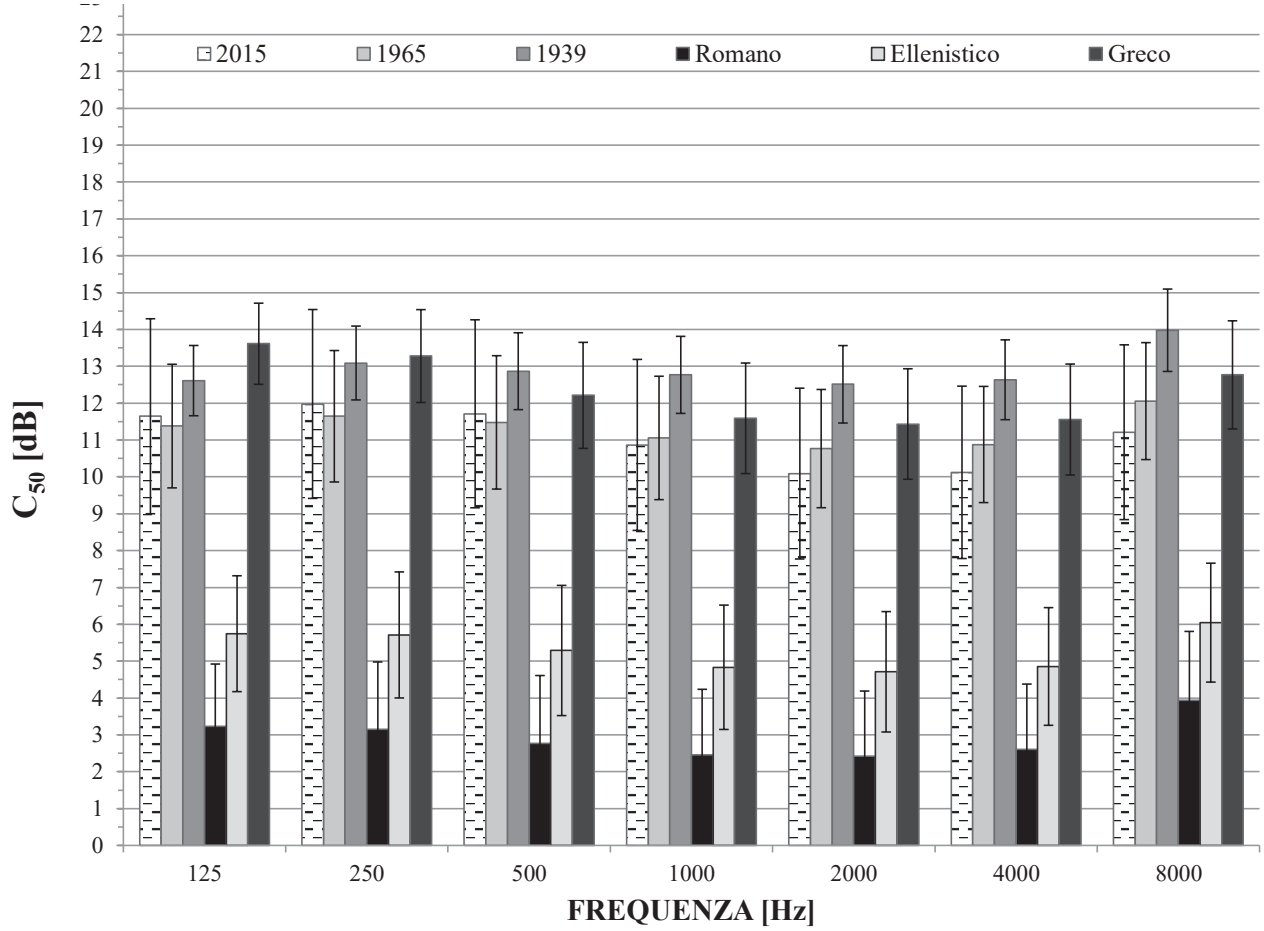


Fig 6.2.8: Confronto tra valori di C_{50} simulati in frequenza delle diverse fasi storiche del teatro di Tindari.

Per quanto riguarda la chiarezza del parlato si può notare come le due epoche storiche caratterizzate da valori mediamente alti di T_{20}, abbiano valori di C_{50} inferiori rispetto alle altre epoche, soprattutto alle medie frequenze. L' epoca storica che sembra avere la migliore prestazione da questo punto di vista, dato che la voce umana viene emessa solitamente a frequenze medio basse, sembra essere l'epoca greca, dove il modello TYNG non presenta nè la scena nè il colonnato, e le gradinate delle sedute sono composte da blocchi di pietra che ne individuano l'alzato e parte della seduta orizzontale. Il valore medio di C_{50} alle frequenze comprese tra 500 e 1000 Hz per TYNG è 11,9 dB, per TYNH è pari a 5,1 dB, 2,6 dB per TYNR, 12,9 dB per TYN1939, 11,3 dB per TYN1965 e 11,3 dB per TYN2015.

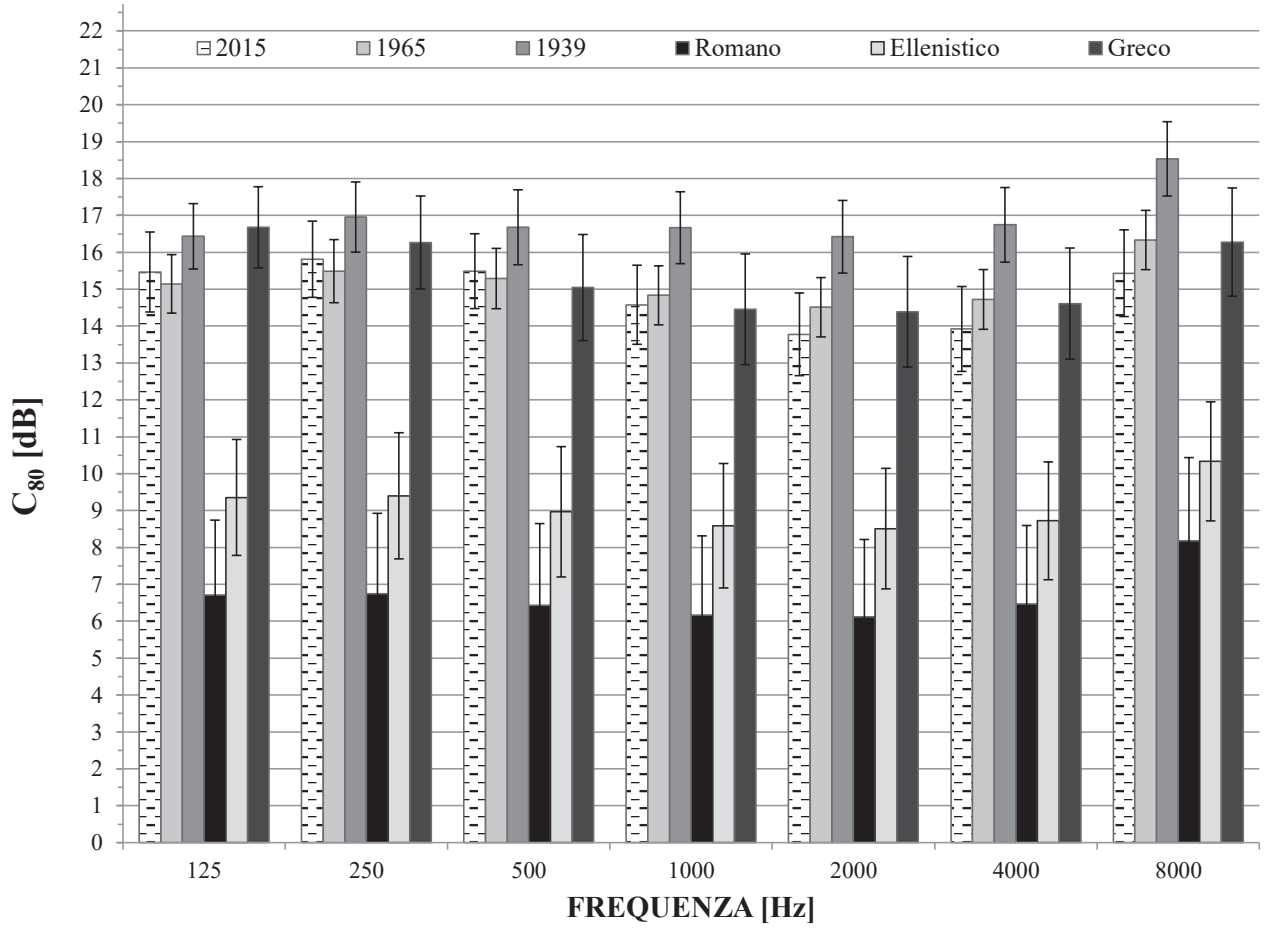


Fig 6.2.9: Confronto tra valori di C_{80} simulati in frequenza delle diverse fasi storiche del teatro di Tindari.

Lo stesso accade per il parametro C80, dove varia la quantità di tempo da 50 ms a 80 ms per valutare il rapporto tra l'energia pervenuta all'orecchio nello specifico in quel tempo, e l'energia totale pervenuta all'orecchio dell'ascoltatore. Con questo parametro si valuta la chiarezza dell'impulso musicale dove è ammessa una tolleranza maggiore rispetto alla valutazione della chiarezza del parlato.
Il valore medio di C_{80} alle frequenze comprese tra 500 e 1000 Hz per TYNG è 14,7 dB, 8,8 dB per TYNH, 6,0 dB per TYNR, 16,7 dB per TYN1939, 15 dB per TYN1965, e 15 per TYN2015.

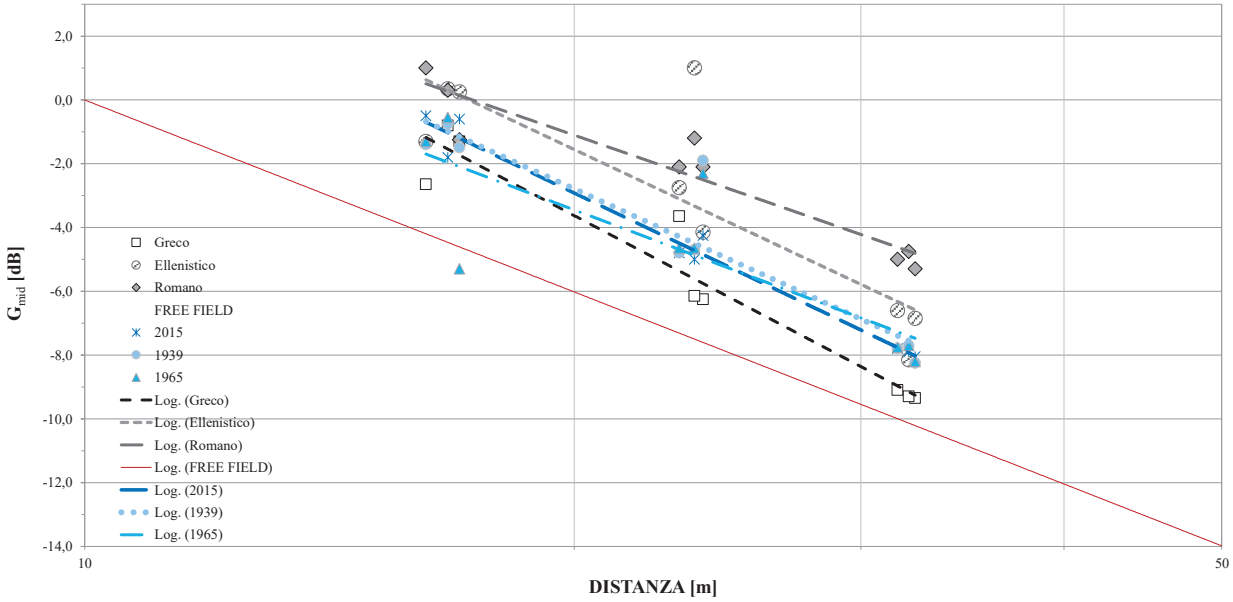


Fig. 6.2.10: Confronto tra valori di G medi tra 500 e 1000 Hz simulati per tutti i ricevitori in base alla distanza

Tab 6.2.1: Parametri della regressione lineare per i valori di G_{mid} in base alla fig. 6.2.10 con relativo coefficiente R^2.

Fonte	A	B	R^2
2015	28,77	-24,87	1,0
1965	21,54	-19,20	0,7
1939	27,35	-23,16	0,9
Romano	21,89	-17,67	0,9
Ellenistico	29,65	-23,99	0,7
Greco	31,31	-26,85	0,9
Free field	20,00	-20,00	1,0

Tuttavia i nuovi elementi aggiunti in epoca ellenistica e romana hanno svolto la funzione di diminuire lo sforzo vocale richiesto affinchè il suono raggiungesse anche le parti più lontane del teatro. Tutte le simulazioni evidenziano come la distanza sia un fattore di notevole incidenza sui valori dell'indice di robustezza simulati. I valori di G dei modelli TYNG, TYN2015, TYN1965 e TYN1939 usati per la simulazione, dove non era presente la scena, mostrano linee di tendenza con andamento simile e valori poco differenti, mentre TYNH e TYNR riportano valori maggiori.

6.3 Il confronto con altri teatri antichi: i valori misurati

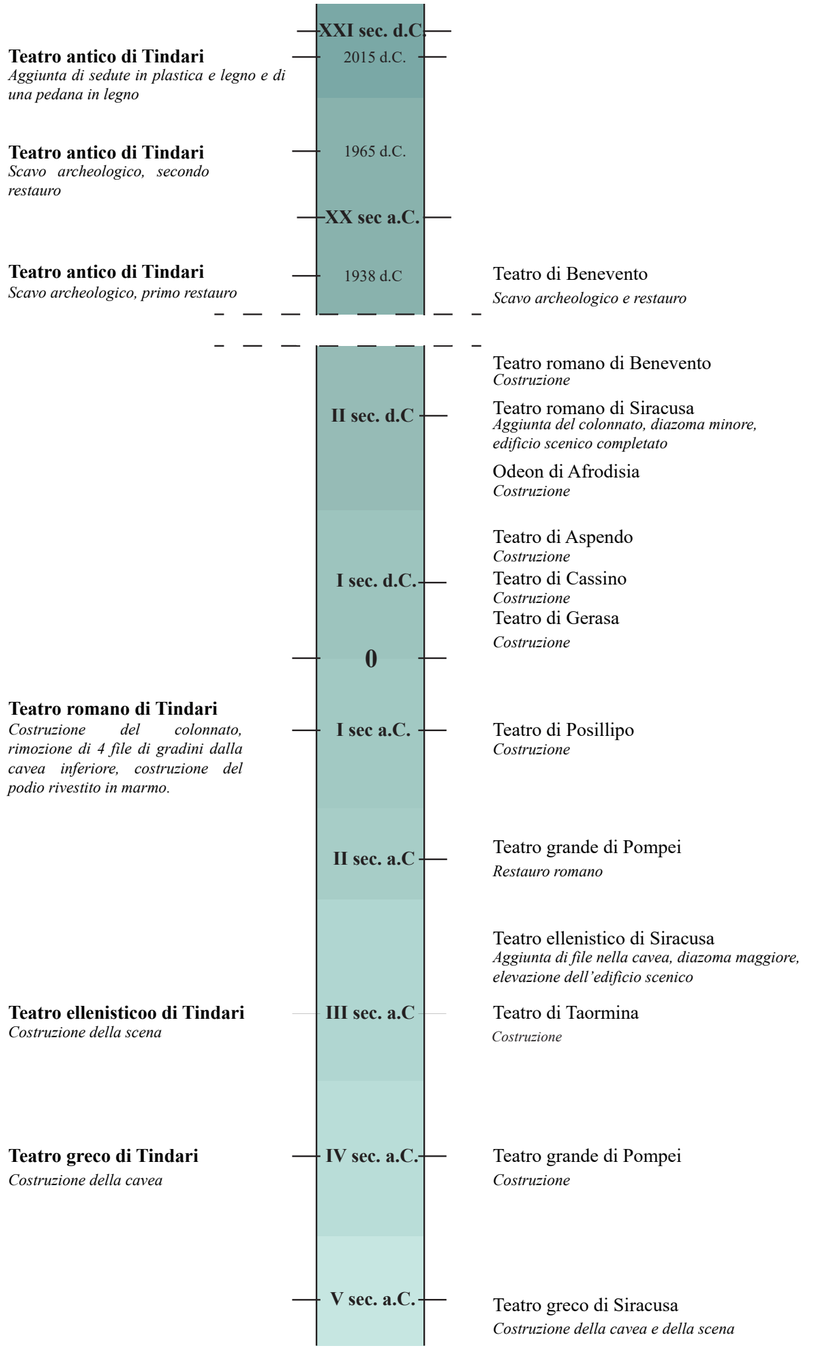


Fig 6.3.1: Il teatro di Afrodisia

Fig 6.3.2: Il teatro di Benevento

Fig 6.3.3: Il teatro di Benevento in epoca romana

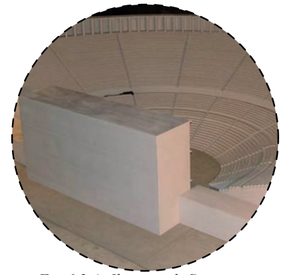


Fig 6.3.4: Il teatro di Siracusa in epoca romana

Fig 6.3.5: Il teatro di Aspendo

Fig 6.3.6: Il teatro di Cassino

Fig 6.3.7: Il teatro di Posillipo

Fig 6.3.8: Il teatro di Gerasa

Fig 6.3.9: Il teatro di Siracusa in epoca ellenistica

Fig 6.3.10: Il teatro di Taormina

Fig 6.3.11: Il teatro di Siracusa in epoca greca

Fig 6.3.12: Il teatro di Pompei

Fig 6.3.13: Il teatro di Tindari nel IV secolo a.C

Fig 6.3.14: Il teatro di Tindari nel III secolo a.C

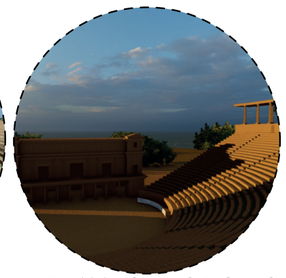


Fig 6.3.15: Il teatro di Tindari nel I secolo a.C

Fig 6.3.16: Il teatro di Tindari nel 1939

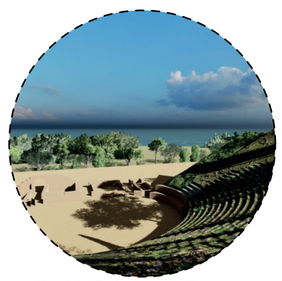


Fig 6.3.17: Il teatro di Tindari nel 1965

Fig 6.3.18: Il teatro di Tindari

I teatri antichi presi in considerazione nel confronto

Facendo riferimento a quanto mostrato nella precedente linea del tempo si procede ora al confronto tra le misurazioni dei parametri acustici allo stato di fatto del teatro antico di Tindari con quelli di alcuni teatri antichi misurati in precedenza da ricercatori di differenti Università, differenziandoli in base al loro periodo di costruzione. I periodi che sono stati determinati per la suddivisione verranno denominati come segue:

- Greco -V - IV secolo a.C
- Ellenistico - III secolo a.C
- Romano - II secolo a.C.-I secolo d.C

6.3.1 Misurazioni: Epoca greca - V - IV secolo a.C

Il teatro di Siracusa è stato costruito nel V secolo a.C: Pur avendo dall'origine forme più simili a quelle della cultura romana, la sua fondazione è greca. Ciò che rimane oggi è la *cavea* di 143 m e l'*orchestra* dal diametro pari a 29 m: la *scena* attualmente non versa in uno stato di conservazione ottimale. È possibile riconoscere i 9 settori della *cavea* divisi dalle 8 *klimakes:* la *cavea* è divisa in *ima, media, summa cavea.*

Fig 6.3.19: Il teatro di Siracusa

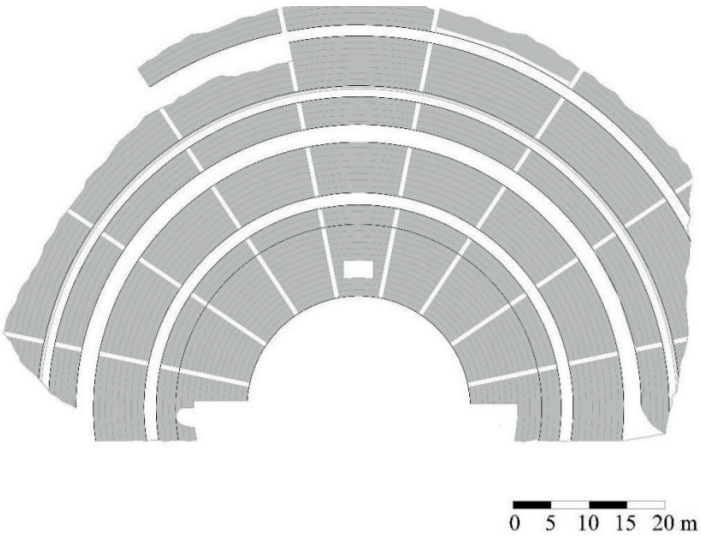


Fig 6.3.20: La pianta del teatro di Siracusa, (tratto da Bo, E., 2017).

Il teatro grande di Pompei è posto sulle pendici del costone su cui è costruito il tempio dorico. Il teatro, come era abituale nell'architettura greca, è posto in collegamento con il santuario per ribadire il significato profondamente religioso delle rappresentazioni teatrali. Anche se, in epoca ellenistica, era ormai perduto il connotato religioso rimase questa usanza architettonica. Si ipotizza che fosse stato fondato nel IV secolo a.C E che nonostante le numerose ristrutturazioni il teatro pompeiano ha mantenuto la struttura greca originaria. Nel II secolo a.C sono state fatte alcune modifiche: queste hanno interessato l'edificio scenico e il palco, ed è stato aggiunto un *velarium*. I resti visibili oggi sono del progetto realizzato da Marcus Artorius Primus in età Augustea. E' rimasta intatta l'orchestra con forma a ferro di cavallo al posto della più tradizionale romana ad emiciclo ma attualmente lo stato di conservazione non è ottimale e la cavea è quasi interamente ricoperta da terreno e erba, tuttavia è stato installato un telaio metallico, dove occasionalmente vengono appoggiate delle sedute in legno per renderlo fruibile, come accade a Tindari. Sono attualmente visibili alcuni resti della scena.

Fig. 6.3.21: il teatro grande di Pompei

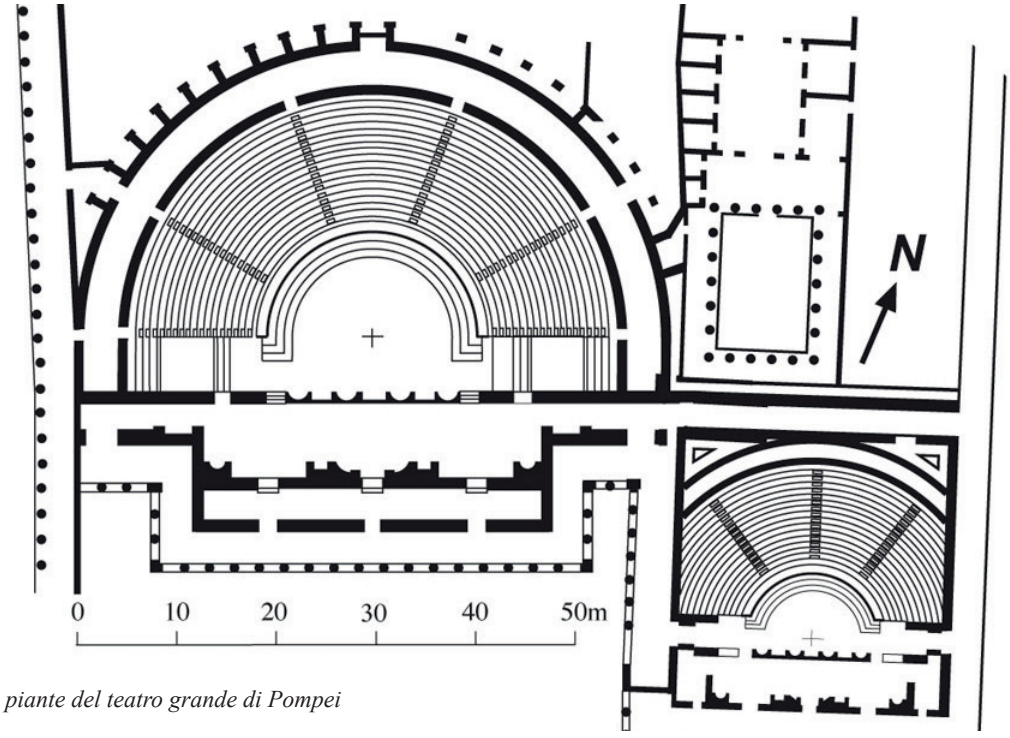


Fig. 6.3.22: la piante del teatro grande di Pompei

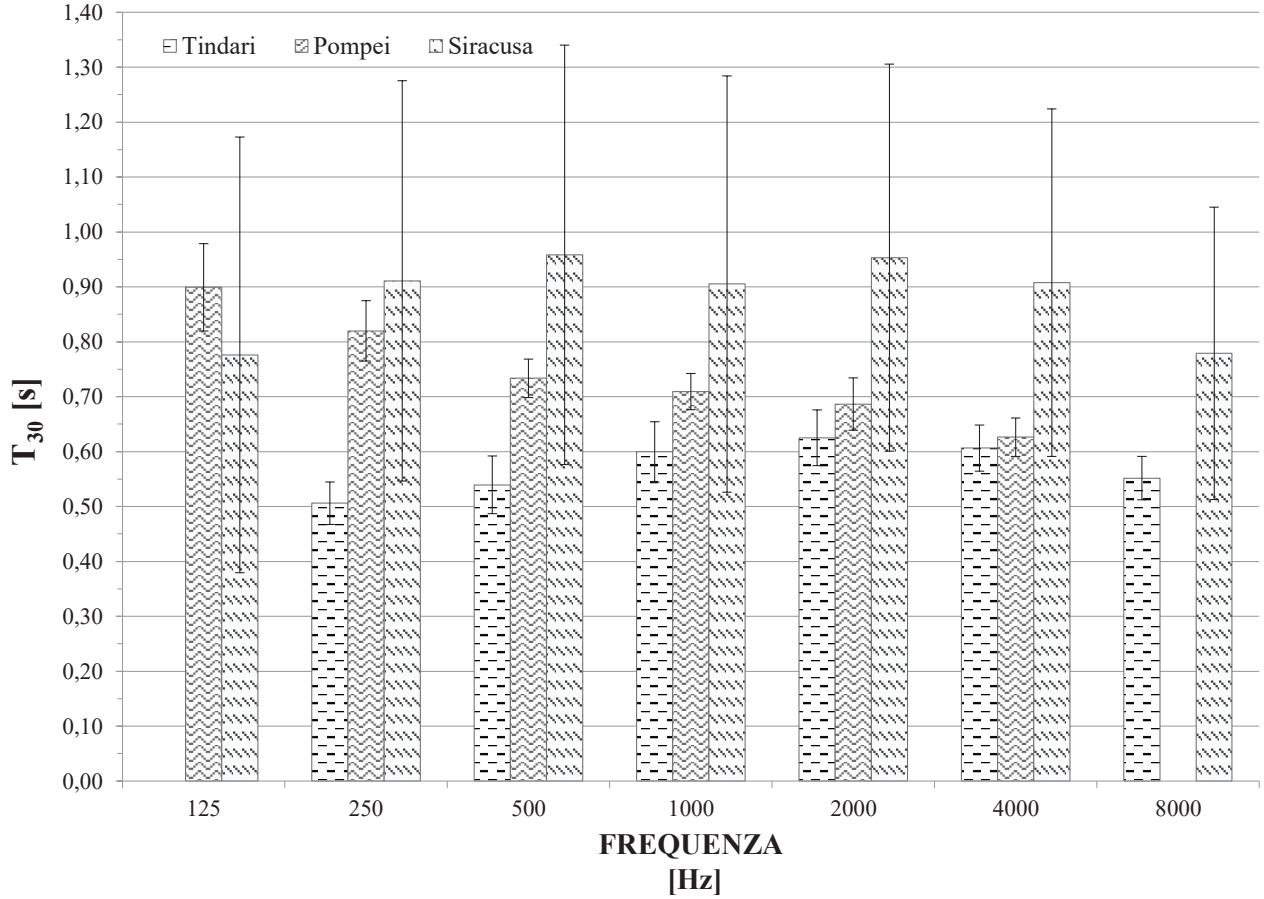


Fig. 6.3.23: I valori misurati di T_{30} in frequenza per tutti i ricevitori dei teatri costruiti tra il V e il IV secolo a.C. nella condizione attuale di conservazione.

Per quanto riguarda il tempo di riverberazione si nota come quello del teatro di Pompei sia superiore, soprattutto alle basse frequenze: ciò che differisce tra il teatro di Tindari e quello di Pompei è l'altezza dei resti della scena, che contribuisce a creare eco a causa delle onde sonore riflesse in misura maggiore rispetto ai resti della scena del teatro di Tindari dove si ha solo una parte minima della stessa altezza. Le misurazioni del teatro di Pompei utilizzate per il confronto sono state ottenute dalle registrazioni effettuate con la sorgente sonora posta nell'orchestra, per poter paragonare meglio le misure con il teatro di Tindari, dove la sorgente misurata era posta al centro dell'orchestra. A differenza del teatro di quello inoltre, sono presenti alcune sedie in plastica che data la natura del materiale e le direzioni verso sui sono rivolti gli schienali riflettono le onde sonore dirette emesse dalla sorgente verso la scena retrostante che è a sua volta riflettente. Entrambi tuttavia hanno sedute in legno e in plastica, in diversa percentuale e disposizione.

Tuttavia sembra essere ancora superiore il tempo di riverberazione del teatro di Siracusa per tutte le frequenze misurato nella condizione attuale di conservazione.

Alle frequenze comprese tra 500 e 1000 Hz il valore di T_{30} del teatro di Tindari è pari a 0.57 s, quello misurato nel teatro di Pompei è pari a 0.72 s, mentre quello nel teatro di Siracusa 0,93 s .

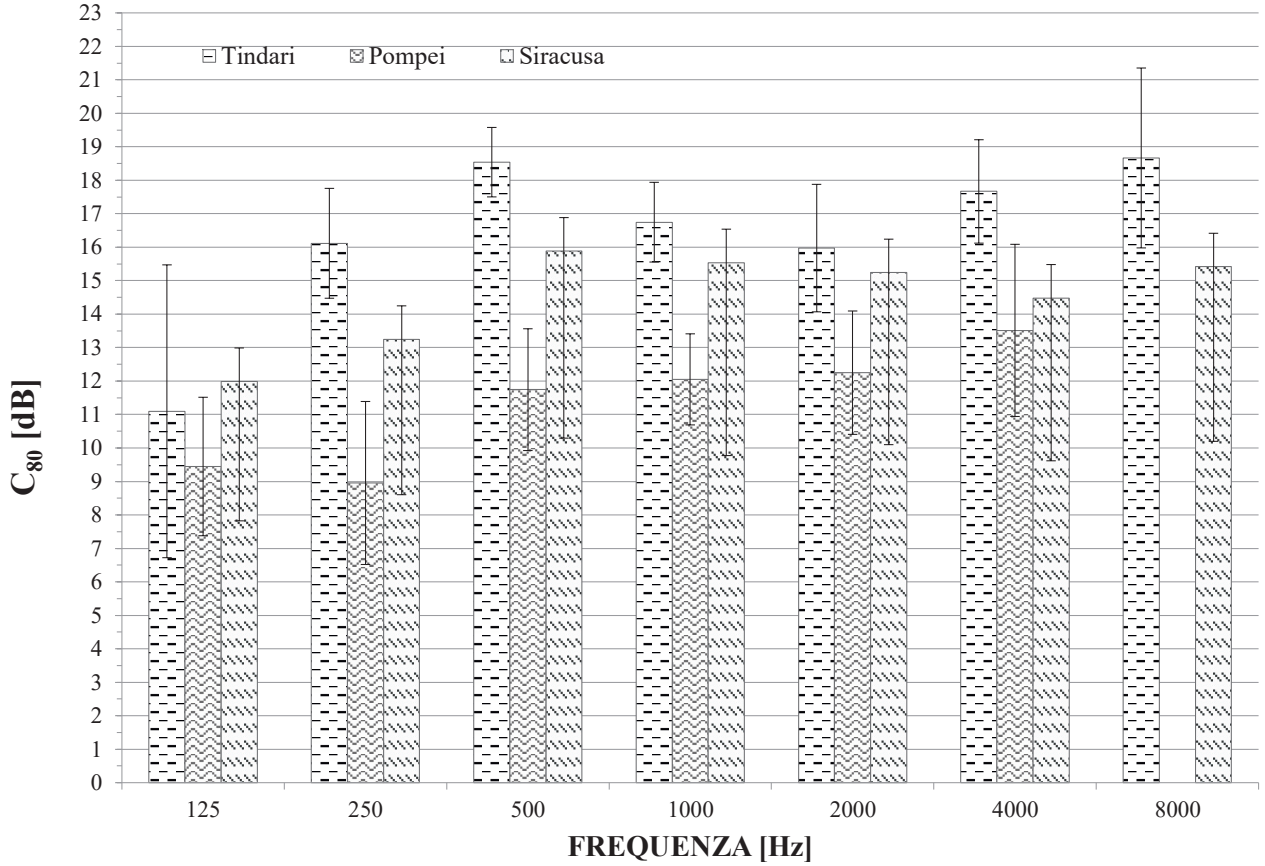


Fig. 6.3.24: I valori misurati di C_{80} in frequenza per tutti i ricevitori dei teatri costruiti tra il V e il IV secolo a.C. nella condizione attuale di conservazione.

Come accade solitamente, il teatro in cui si registra il tempo di riverberazione minore è quello con il livello di chiarezza più alto: ciò è accaduto anche in questo caso dove nel teatro di Tindari sono stati registrati valori nettamente superiori a quelli del teatro di Pompei, specialmente alle frequenze medio basse. I valori relativi al teatro di Siracusa invece si trovano a metà tra quelli di Tindari e quelli di Pompei, tuttavia Tindari sembra avere il livello di chiarezza migliore tra questi casi studio.
Il valore medio di C_{80} tra 500 e 1000 Hz per il teatro di Tindari è pari a 17,6 dB, quello del teatro di Pompei è pari a 11,9 dB, mentre quello del teatro di Siracusa 15,7 dB.

6.3.2 Misurazioni: Epoca ellenistica - III secolo a.C

Il teatro di Taormina invece è stato costruito dai greci intorno al III secolo a.C e successivamente modificato e ampliato dai romani. Ciò che è visibile oggi sono i resti de II secolo d.C, Il diametro massimo è 120 m e per dimensione in Sicilia, è inferiore solo al teatro di Siracusa. Attualmente c'è una parte mancante al centro della scena, si vede sullo sfondo il Mar Ionio e l'Etna, e la capienza oggi è di circa 5500 posti a sedere. La scena è alta 35 m e ampia 40 m, mentre l'orchestra ha un diametro di 35 m. Attualmente ospita il festival *Taormina Arte* in cui vengono trattati temi riguardanti il cinema, teatro, danza e musica durante i mesi estivi.

Fig. 6.3.25: il teatro di Taormina attualmente

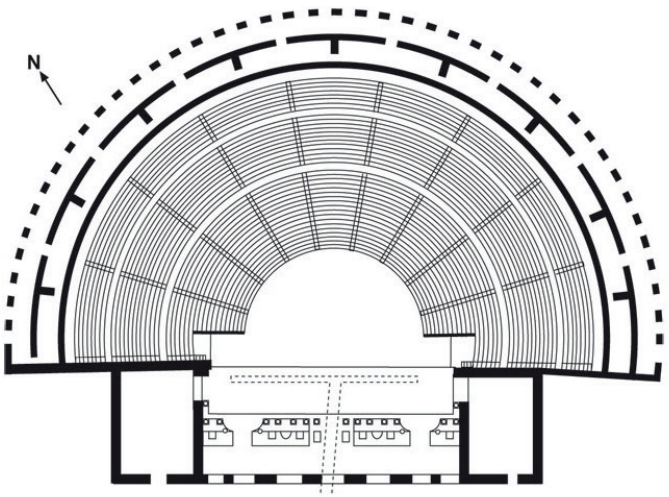


Fig. 6.3.26: la pianta del teatro di Taormina

Il teatro di Taormina presenta un edificio scenico e di conseguenza una superficie di riflessione più ampia di quella del teatro di Tindari, e il suo diametro è circa il doppio, di conseguenza è possibile notare che si ha un indice di chiarezza praticamente dimezzato rispetto a quello del teatro di Tindari e un tempo di riverberazione quasi raddoppiato.
Il valore medio di T_{30} misurato tra 500 e 1000 Hz del teatro di Taormina è infatti1,05 s.
Per quanto riguarda C80 invece, il valore medio nella stessa banda di frequenza del teatro di Taormina è pari a 9,6 dB.

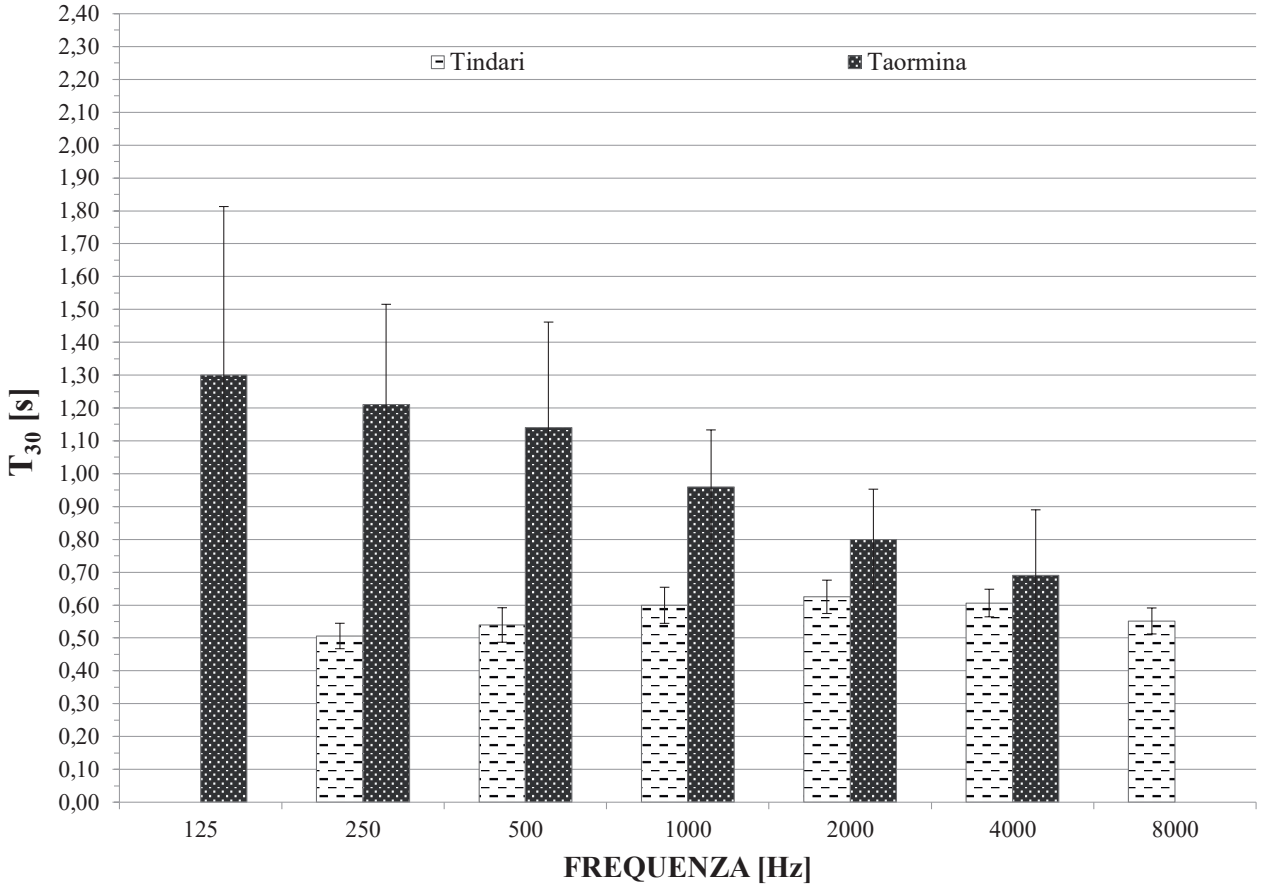


Fig. 6.3.27: I valori misurati di T_{30} in frequenza per tutti i ricevitori dei teatri costruiti tra il III e il II secolo a.C. nella condizione attuale di conservazione.

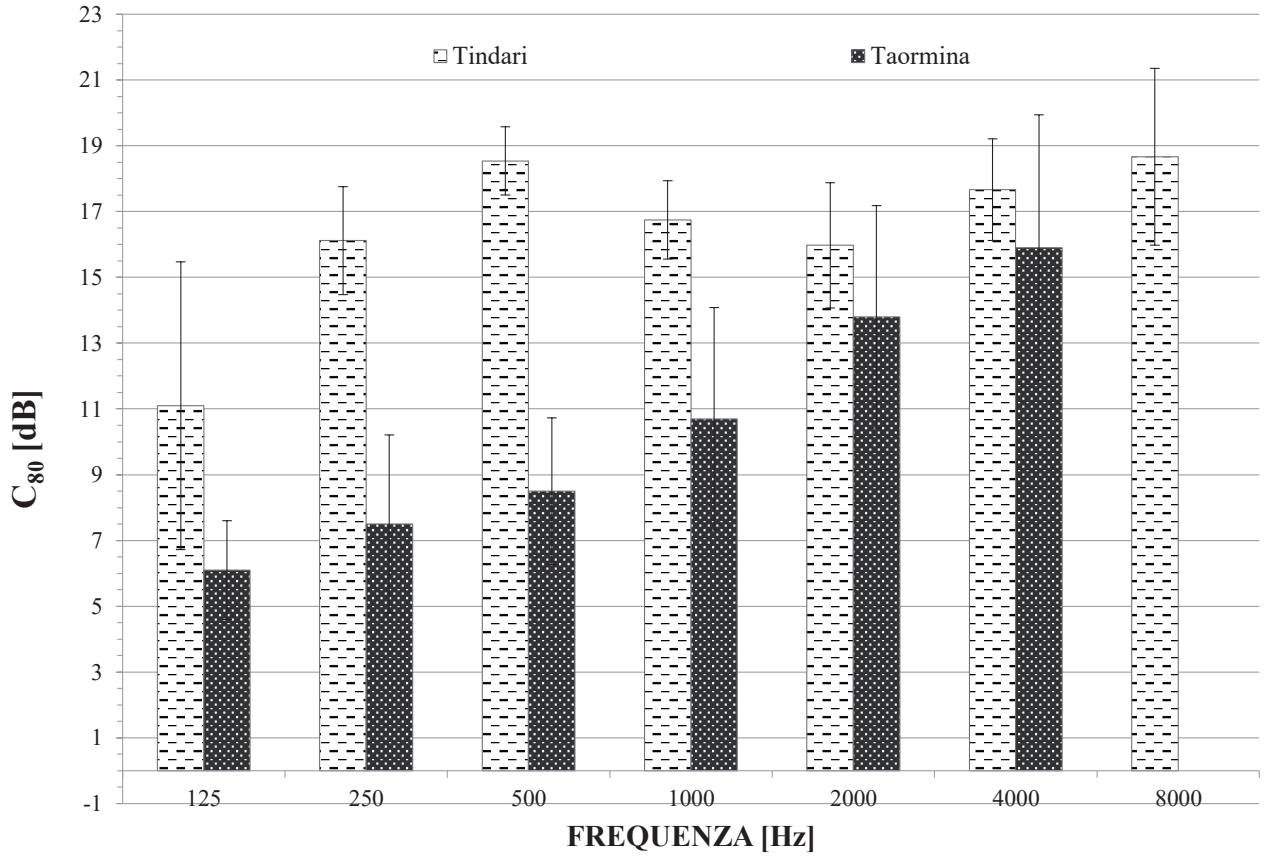


Fig. 6.3.28: *I valori misurati di C_{80} in frequenza per tutti i ricevitori dei teatri costruiti tra il III e il II secolo a.C. nella condizione attuale di conservazione.*

6.3.3 Misurazioni: Epoca romana - I secolo a.C - II secolo d.C.

In questi secoli sono stati edificati i teatri antichi di Aspendo, Gerasa, Afrodisia, Cassino, Posillipo e Benevento. Il teatro di Aspendo, che si trova nell'odierna Turchia sulla costa meridionale affacciata su Mediterraneo, dista 47 km dalla moderna città di Antalya. Si tratta di un manufatto di epoca romana ben conservato: è stato costruito durante il regno di Marco Aurelio (161-180 d.C.) e si ipotizza che al momento dell'edificazione di età romana fosse già presente un teatro più antico. In maniera analoga a quanto accaduto nel teatro di Tindari, successivamente, nel terzo secolo d.C È stato costruito un podio per proteggere il pubblico durante gli spettacoli dei gladiatori. In seguito il teatro è stato usato in epoca bizantina durante l'impero dei Selgiuchidi, e il sultano Alâeddin Keykubat nel XIII secolo rinnovò il teatro e lo trasformò in un palazzo: egli costruì l'ingresso al palazzo utilizzando l'apertura centrale della scena. Si tratta dell'unico esempio in Turchia di teatro che presenta la cavea unita all'edificio scenico: il diametro massimo della *cavea* è circa 98 m e le gradinate che la compongono sono state costruite in arenaria e i sue livelli inferiore e superiore sono separati da un *diazoma*. La gradinata è composta da 41 file di sedute della dimensione di 67 cm in profondità e 43 in altezza ed è divisa da 10 scalinate: la pendenza media delle gradinate è pari a 33°. È ancora attualmente presente un colonnato alto 26 composto da 59 volte a botte che avevano la funzione di dividere gli accessi alle sedute dall'alto e si stima che avesse una capacità di 15000 persone.

A differenza del teatro di Tindari erano presenti gli *aditi maximi*, ingressi laterali rivolti agli attori e al pubblico. A differenza dei teatri greci, i *parodoi* erano quindi stati sfruttati per la costruzione delle torri degli *aditi maximi* all'interno del quale venivano anche ricavati i posti per le tribune d'onore.

Fig 6.3.29*: Il teatro di Aspendo https://turkeyanatolia.com/aspendos_ancieny_city/*

Il confronto tra il teatro di Aspendo e quello di Tindari può essere fatto tenendo in considerazione alcuni delle differenze tra alcuni fattori relativi alla geometria e ai materiali:

- Diametro: Il diametro del Teatro di Aspendo è 95,5 m mentre quello del teatro di Tindari 76 m.
- Edificio scenico: la principale causa della marcata differenza che si potrà notare nei valori relativi al tempo di riverberazione T_{20} è la presenza o assenza dell'edificio scenico, trattandosi inoltre, nel caso di Aspendo, di una costruzione molto elevata e realizzata in pietra arenaria, che dal punto di vista acustico contribuisce molto alla riflessione delle onde sonore. Nel teatro di Tindari invece per quanto riguarda la scena sono presenti solo alcuni blocchi lapidei ricomposti durante il restauro eseguito negli anni '60 da Bernabò Brea, di conseguenza, l'energia sonora che si propaga dietro alla fonte sonora non incontra un ostacolo in grado di riflettere le onde verso tutti gli spettatori.
- *Parodoi:* con la costruzione delle torri laterali che collegano la scena e la cavea nel teatro di Aspendo il suono viene riflesso anche nelle parti dove solitamente nei teatri greci si trova l'apertura dei *parodoi,* i corridoi laterali della cavea utilizzati per l'accesso al teatro da parte degli attori, e trattandosi di un'apertura il suono aveva la possibilità di disperdersi senza creare un eccessivo effetto di eco, specie alle basse frequenze, analogo a quello che avviene ad esempio agli angoli delle stanze. Al contrario di Aspendo, il teatro di Tindari anche in epoca greca e romana, quando la scena era ancora presente, le aperture dei *parodoi* svolgevano questa funzione.
- Materiali: Nel teatro di Aspendo sono presenti principalmente materiali riflettenti dal punto di vista acustico, invece nel teatro di Tindari per via della diversa costruzione delle sedute attuali, anche il terreno e il legno hanno un ruolo fondamentale nella valutazione della resa acustica: il primo si trova infatti nell'orchestra e sulla superficie superiore delle sedute, sorrette invece da alzate in pietra. Mentre il secondo si trova nelle nuove sedute e nell'orchestra nella forma di pedana utilizzata per gli spettacoli.

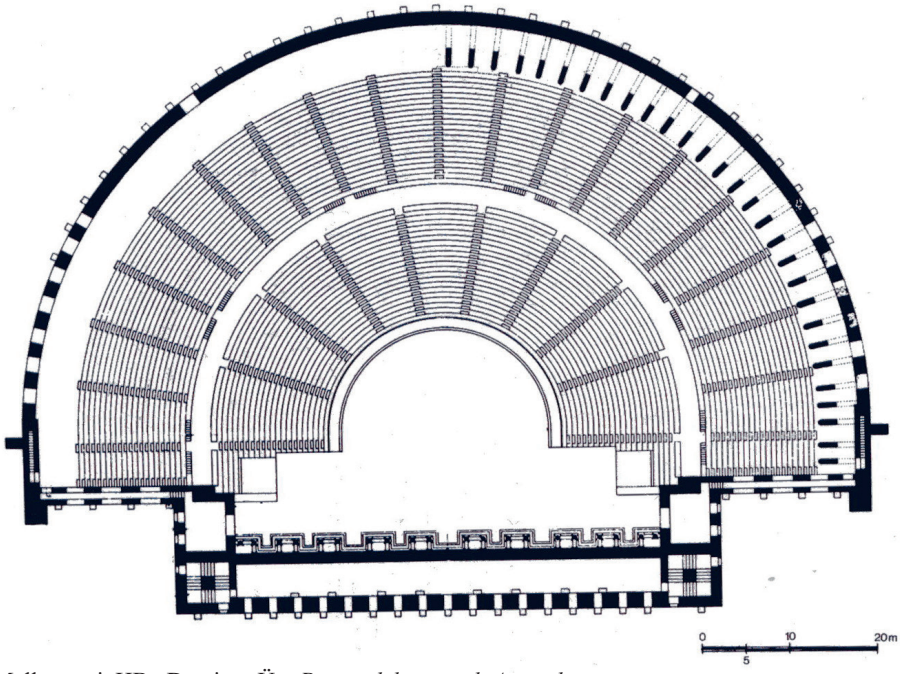


Fig 6.3.30: Mallampati, HB., Demirer, Ü., *Pianta del teatro di Aspendo.*

L'*odeon* di Afrodisia è stato costruito nel II secolo d.C in questa provincia dell'Impero Romano, nella città che porta il nome della dea Afrodite: essendo una città prospera dotata di una certa indipendenza dal potere centrale romano, era presente un teatro all'aperto, e uno al chiuso per i concerti. L'*odeon* di Afrodisia è stato analizzato nell'ambito del progetto ERATO, in cui sono state fatte le misurazioni allo stato attuale di conservazione e una simulazione dello stato originario in epoca romana a confronto con l'odeon di Aosta.

Fig 6.3.31: Rindel, JH., Gade, AC., Lisa, M., The virtual reconstruction of the Ancient Roman Concert Hall in Aphrodisias, Turkey, 2015.

La città di Gerasa si trova nell'attuale Giordania nel nord est del paese vicino al confine con la Cisgiordania. La città è stata costruita nel II secolo a.C e conquistata dai romani nel 63 a.C. Nella città di impianto romano sono presenti due teatri antichi, piazze, strade e terme. Il teatro meridionale ha un diametro di 70,5 m e oggi è uno dei maggiori edifici di Gerasa: la sua costruzione è iniziata alla fine del I secolo d.C ed è stato completato alla fine del II secolo d.C. La *cavea* è divisa in due parti da un *diazoma*, e la parte inferiore è stata scavata nella collina, mentre la parte superiore è stata costruita al di sopra. Attualmente la cavea è formata da 30 gradinate e ha una capienza di 3000 persone, inoltre pare essere piuttosto ripida, poichè l'angolo di inclinazione è pari a 43° E ogni gradino è profondo 60 cm e alto 55 cm.
Il palco che si trova nell*'orchestra* invece è alto 1,5 m ed è diviso in 4 parti, mentre la scena dietro al palco presenta 3 porte utilizzate dagli attori durante le performance. La parte rimanente della scena è alta 8,5 m.

Il teatro di Gerasa, essendo di costruzione romana, riprende nella forma e nei materiali quello di Taormina, per cui anche in questo caso sono presenti evidenti differenze per quanto riguarda i materiali e la forma degli elementi che lo compongono. È tuttora presente la parte inferiore della scena, inoltre sono presenti gli *aditi maximi,* ovvero le costruzioni angolari che raccordano la cavea con la scena, utilizzate per ricavarne tribune d'onore, favorendo il fenomeno dell'eco soprattutto in prossimità delle estremità della cavea. Il diametro maggiore nel teatro di Gerasa tuttavia si avvicina a quello di Tindari (76 m).

Fig. 6.3.32*: Il teatro di Gerasa*

l Teatro Romano di Cassino si trova nel cuore dell'antica Casinum. La sua costruzione avvenne in età augustea sfruttando quello che era un naturale declivio del monte. Riportato alla luce nel 1936 è stato restaurato nel 1959 e nel 2001. Oggi ospita importanti manifestazioni culturali, soprattutto durante il periodo estivo. Di forma semicircolare ha una ampiezza di 53,50 metri e può accogliere oggi fino a 1000 spettatori.
In origine erano presente una *ima* e una *summa cavea*, ma a seguito dei degradi infine della demolizione il teatro è stato abbandonato per un lungo periodo: sulle rovine del teatro antico sono state costruite nuove strutture.
Il restauro del teatro è stato completato 20 anni fa, ed è stata ricostruita solo la *cavea* inferiore, e un palco in legno: la *cavea* è stata ricostruita in pietra e malta e le sedute misurano 0.7 m in profondità e 0.4 m in altezza.

Fig. 6.3.33*: Il teatro di Cassino*

Dopo la battaglia di Azio (31 a.C.), l'equite e liberto Publio Vedio Pollione decise di trascorrere il resto dei suoi giorni tra la Gaiola e la baia di Trentaremi, *Pausilypon* ossia "sollievo dal dolore". Fece costruire un complesso architettonico composto da una villa, un teatro da 2000 posti, un odeon, un ninfeo e vasche termali.
I reperti appartenenti a questo sito archeologico dal 2002 sono tutelati dall'istituzione dell'Area marina protetta Parco Sommerso di Gaiola.
Il teatro di Posillipo è ancora in uso oggi ed è stato costruito seguendo l'inclinazione della collina orientato verso il mare: la *cavea* semicircolare ha un diametro di 50 m, mentre quello dell'orchestra è di 10 m: si ipotizza che in origine il teatro fosse rivestito di marmo e che fossero montati alcuni *velaria* sopra alla *cavea* che poteva ospitare fino a 2000 spettatori. La scena non più visibile a chiusura dell'*orchestra* aveva una profondità pari a 4.8 m e una lunghezza pari a 26 m.

Fig. 6.3.34*: Il teatro di Posillipo*

Il teatro di Benevento è stato costruito nel II secolo d.C ed era in grado di ospitare fino a 10000 spettatori. L'orchestra aveva un diametro di 30 m, mentre la cavea di 93 m, diviso tra *ima,* e *summa cavea,* costituiva infatti uno dei più ampi teatri romani; era presente un palco lungo 44.2 m e rialzato di un metro da terra. Il teatro è stato distrutto parzialmente a causa di un terremoto e poi è stato abbandonato dopo le invasioni barbariche: durante i secoli a seguire, sono stati costruiti alcuni edifici all'interno dell'*orchestra,* che sono stati demoliti durante il restauro nel 1930, che ha inoltre ricomposto i resti della scena e della *cavea.* La parte inferiore della cavea è stata ricostruita utilizzando mattoni in terracotta, mentre la parte superiore è stata ricomposta parzialmente e non è attualmente accessibile ai visitatori. Attualmente il teatro ha una capacità pari a 1800 spettatori distribuiti su 15 gradini e il teatro a partire dal 1950 è sempre stato in uso regolarmente.

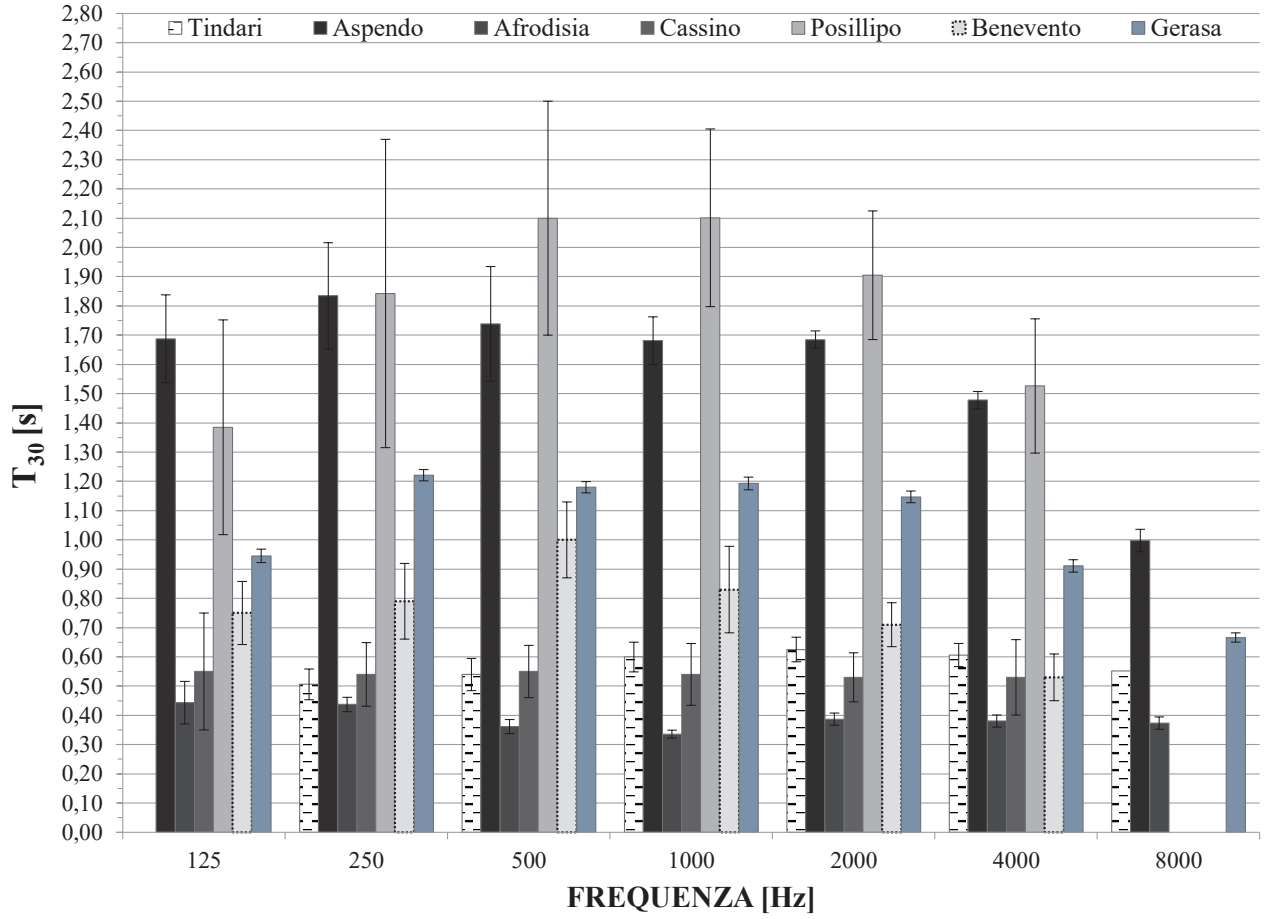


Fig. 6.3.35*: I valori misurati di T_{30} in frequenza per tutti i ricevitori dei teatri costruiti tra il I secolo a.C E Il I secolo d.C. nella condizione attuale di conservazione.*

Nel grafico si hanno due divisioni nette tra i teatri con un tempo di riverberazione T_{30} molto elevato, che riguarda i teatri di Aspendo e Posillipo, e invece gli altri teatri con valori più usuali per i teatri antichi all'aperto.

Nei primi due teatri romani citati sono stati registrati valori elevati, nello specifico nel primo, il valore medio di T_{30} per le frequenze tra 500 e 1000 Hz è pari a 1,71 s, mentre nel secondo caso raggiunge 2,10 s: in ordine discendente si ha poi il teatro di Gerasa dove T30 è pari a 1,09 s, a seguire Benevento dove questo parametro è stato misurato pari a 0,92 s nella stessa banda di frequenza, ma nelle frequenze più basse e più alte risulta inferiore: a seguire si colloca il teatro di Tindari dove questo parametro è pari a 0.57 s, a seguire il teatro di Cassino in cui T_{30} alle medie frequenze è pari a 0.55 s, e infine il teatro di Afrodisia dove questo è pari a 0.35 s.

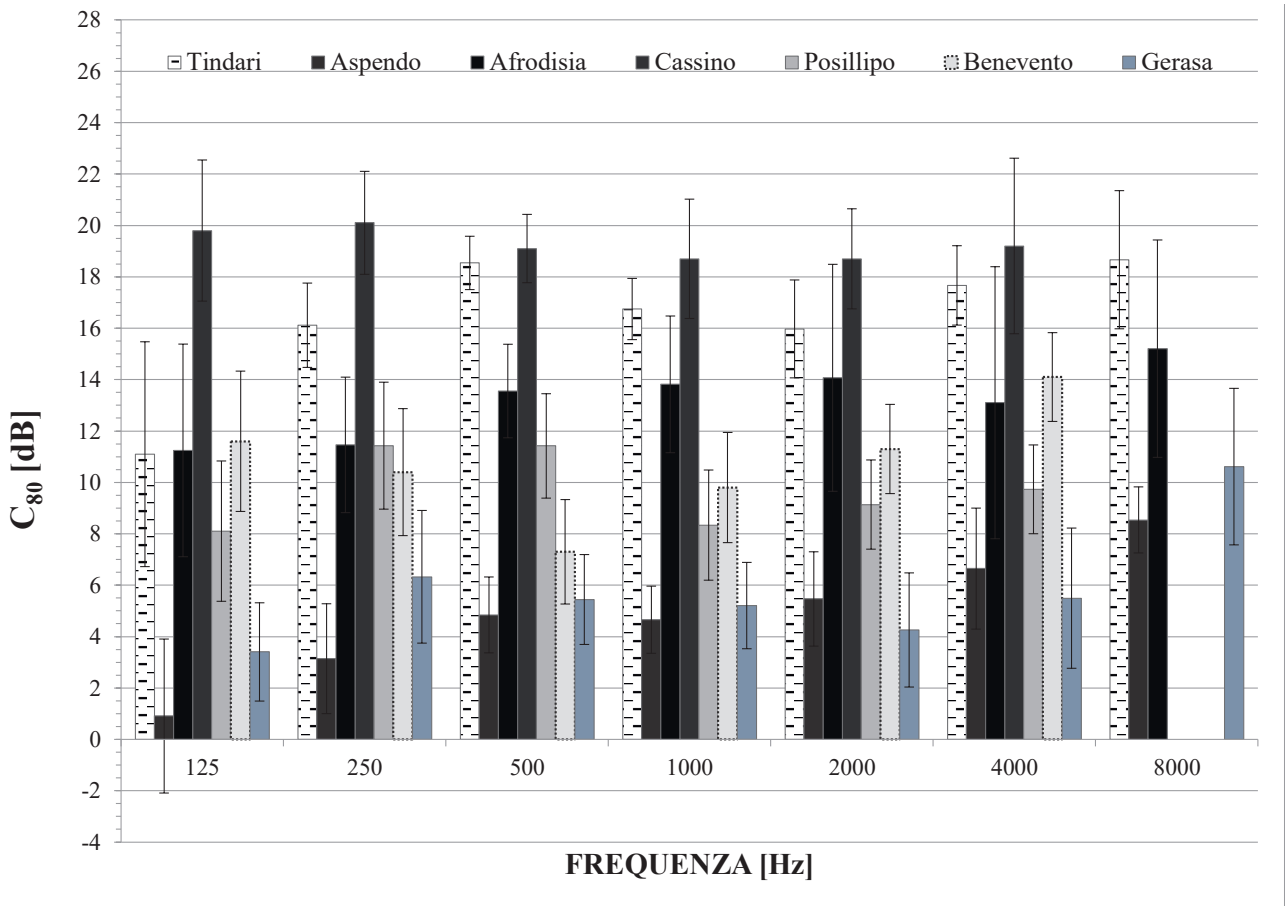


Fig. 6.3.36*: I valori misurati di C_{80} in frequenza per tutti i ricevitori dei teatri costruiti tra il I secolo a.C E Il I secolo d.C. nella condizione attuale di conservazione. I*

Di conseguenza i teatri che hanno un livello di chiarezza migliore per l'ascolto della musica in base ai valori misurati risultano essere il teatro di Cassino, Tindari e Afrodisia.

Nelle frequenze tra 500 e 1000 Hz il valore medio di C_{80} per il teatro di Cassino è 18.9 dB, mentre quello del teatro di Tindari 17.6 dB, quello del teatro di Afrodisia 13.7 dB, mentre per il teatro di Posillipo 9,9 dB, 5,3 dB nel teatro di Gerasa, 8,55 dB nel teatro di Benevento e solo 4,7 dB nel teatro di Aspendo, dove ciò che influisce molto è il collegamento tra scena e cavea, che aumenta l'estensione della superficie riflettente.

							Media500 -1000 Hz		Media125-8000 Hz
Teatro	**Costruzione**	**Porticato**	**Scena**	**Altezza della scena**	**Diametro Cavea**	**Inclinazione Cavea**	**T30 [s]**	**C80 [dB]**	**G [dB]**
Siracusa	V sec. a.C	No	No	-	143	22,5° - 20,8°	0,93	15,71	-6,30
Taormina	III sec. a.C	Yes	Yes	30	120	unk	1,05	9,60	-
Aspendo	I sec. d.C	Yes	Yes	26	98	33°	1,71	4,75	-4,52
Benevento	II sec. d.C	Yes	Yes	unk	93	unk	0,92	8,55	-
Afrodisia	I sec. d.C	No	No	-	90	unk	0,35	13,69	-
Tindari	IV sec. a.C	No	No	-	76	27°	0,57	17,64	-4,15
Gerasa	I sec. d.C	No	Yes	8,5	63	43°	1,19	5,33	-0,57
Pompei	IV sec. a.C	No	Yes	3,2	58	unk	0,72	11,90	-
Cassino	I sec. d.C	No	No	-	53	30°	0,55	18,90	-
Posillipo	I sec. a.C	No	No	-	47	unk	2,10	9,88	-

Tab. 6.3.1: Le misurazioni dei teatri presi in considerazione nei confronti

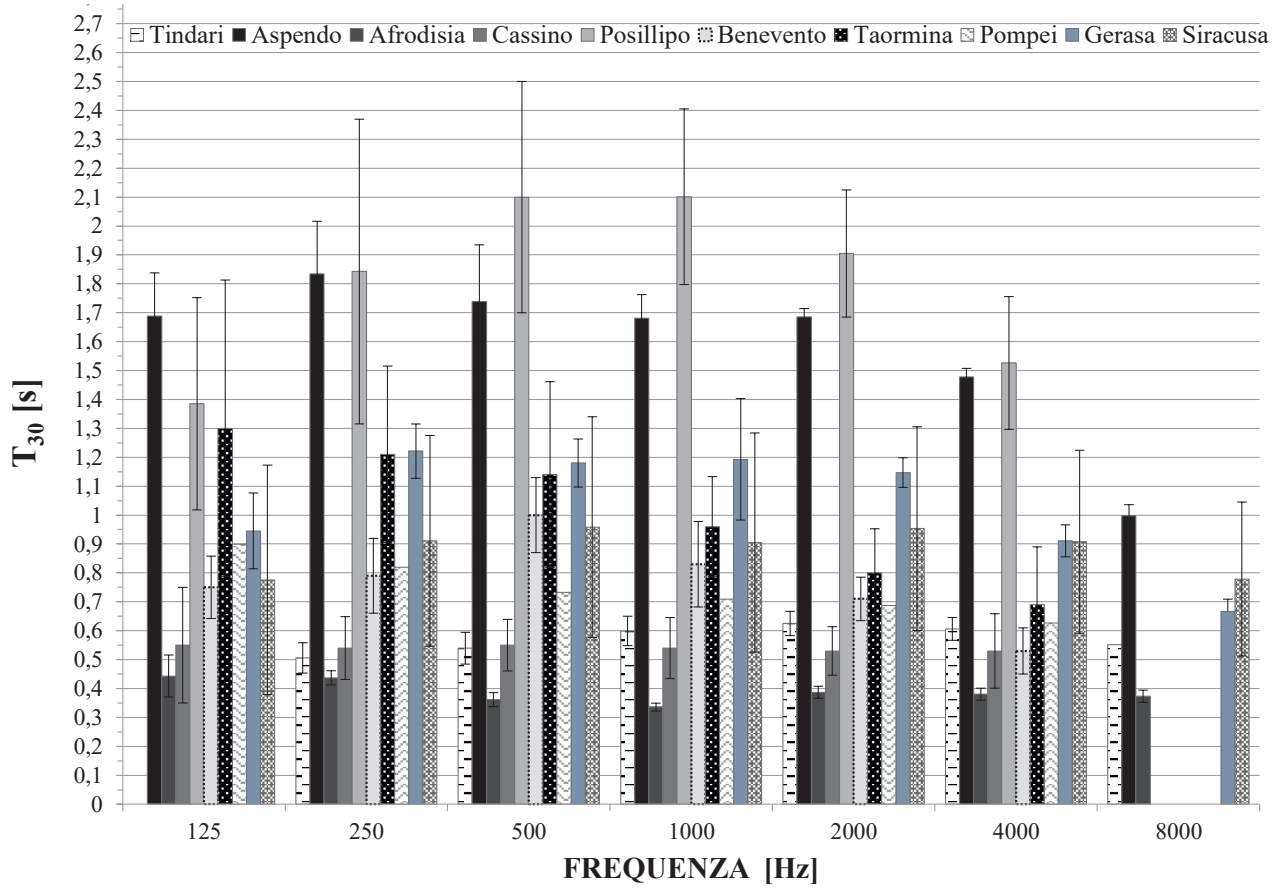


Fig. 6.3.37*: I valori misurati di T_{30} in frequenza per tutti i ricevitori di tutti i teatri trattati in precedenza nella condizione attuale di conservazione. Il riempimento a tinta unita indica i teatri di fondazione romana mentre quello a motivo i teatri greci.*

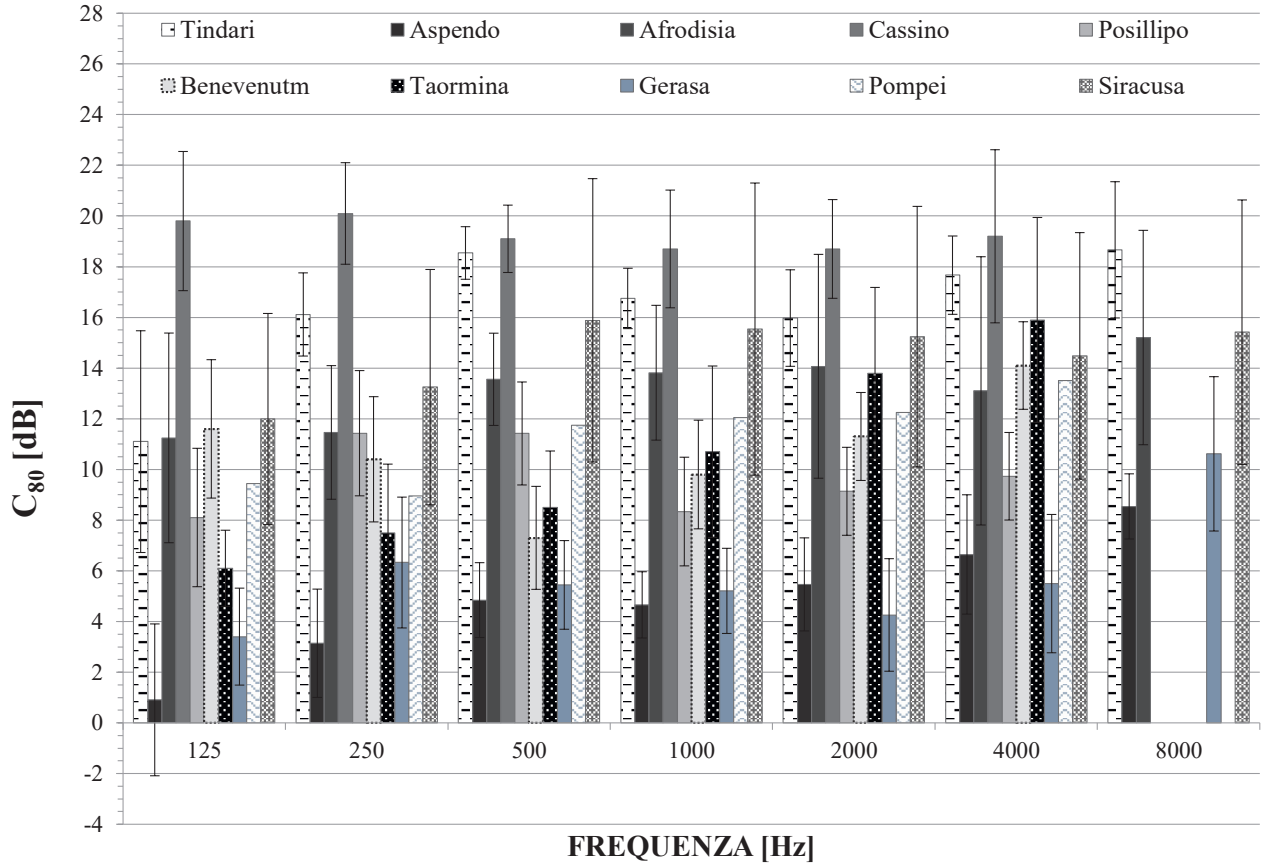


Fig. 6.3.38*: I valori misurati di C_{80} in frequenza per tutti i ricevitori di tutti i teatri trattati in precedenza nella condizione attuale di conservazione. Il riempimento a tinta unita indica i teatri di fondazione romana mentre quello a motivo i teatri greci.*

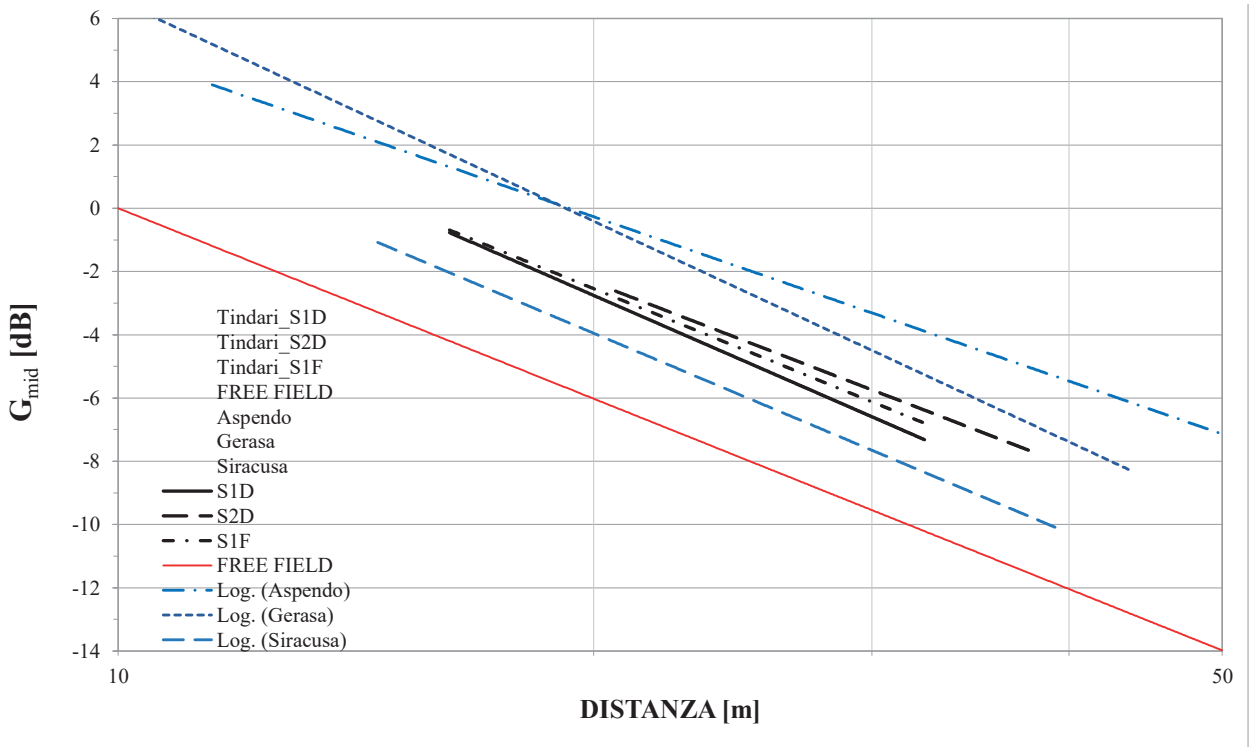


Fig. 6.3.39: Confronto tra valori di G medi tra 500 e 1000 Hz misurati per tutti i ricevitori in base alla distanza

Tab 6.3.2: Parametri della regressione lineare per i valori di G_{mid} in base alla fig. 6.3.39 con relativo coefficiente R^2.

Fonte	A	B	R^2
S1D_Tyn	25,6	-21,8	0,94
S2D_Tyn	22,7	-19,2	0,97
S1F_Tyn	23,9	-20,3	0,94
SYR	23,4	-21,0	0,99
ASP	22,2	-17,3	0,74
JER	29,741	-23,2	0,84

6.4 Il confronto con i teatri simulati di Benevento e Siracusa

La ricostruzione dell'acustica dei teatri antichi permette di valorizzare la storia e la funzione di questi edifici, ricreando l'esperienza acustica del passato senza la necessità di intervenire con un progetto invasivo sui resti archeologici per ottenerne l'effetto: si tratta di una tipologia di ricostruzione virtuale che è in grado di fornire stimoli sensoriali della condizione storica di progetto in modo accurato pur lasciando intatto l'edificio in questione. Questo metodo per ripercorrere il passato sta iniziando a essere utilizzata anche nel campo dell'acustica legata ad edifici storici.

Per quanto riguarda i teatri antichi attraverso i dati reperiti è possibile confrontare anche lo sviluppo acustico nei secoli di altri due teatri antichi, Siracusa e Benevento: come nel paragrafo 6.3 verranno esposti in ordine cronologico.

6.4.1 Simulazioni: Epoca greca - IV secolo a.C

Il teatro di Siracusa, come quello di Tindari ha subito diverse modifiche nel tempo: il suo sviluppo può essere diviso tra l'età greca, ellenistica e romana.
In epoca greca veniva chiamato Timoleonte e si ipotizza che la sua costruzione fosse iniziata nel V sec a.C e la sua cavea formata da 37 gradinate inclinate di 20°. Il diametro massimo della cavea era circa 85 m e si ergeva per 11 metri fuori terra: il raggio dell'orchestra era 12 m e non era presente alcun *diazoma* inizialmente, erano inoltre presenti i *parodoi* ai lati della scena. L'edificio scenico è stato costruito insieme alla cavea, al contrario di quanto accaduto nel teatro di Tindari, era largo 23 m e alto 8.6 m, con una fila di 10 colonne che creavano un portico largo 3 m. Di fronte alla fila di colonne era presente un parapetto in legno. È stato stimato che il teatro di Siracusa in epoca greca potesse ospitare 5000 spettatori

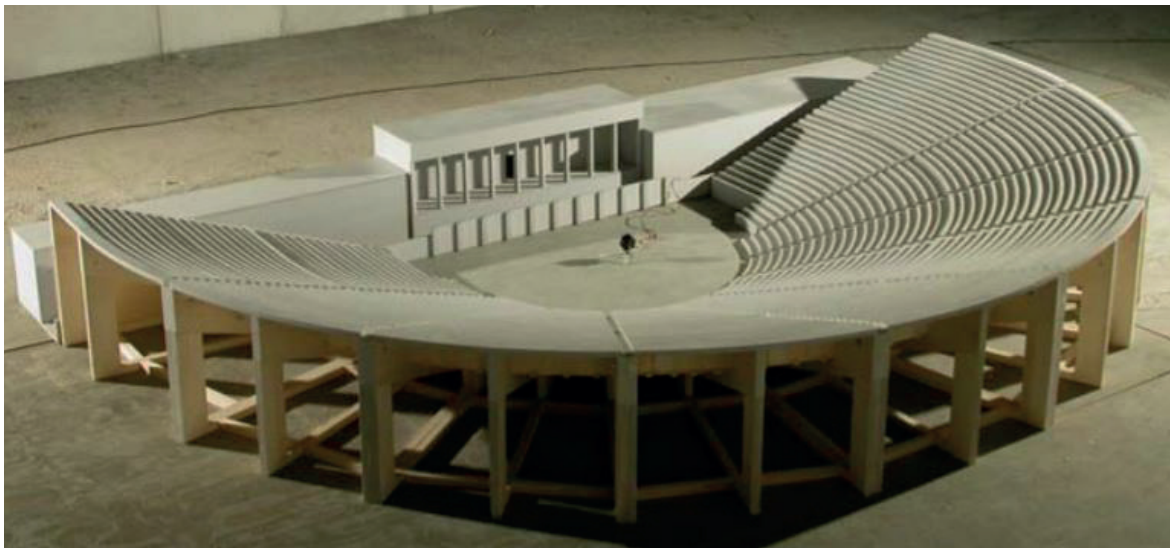


Fig. 6.4.1: Il teatro di Siracusa i epoca greca. (tratto da Farnetani, A., 2005).

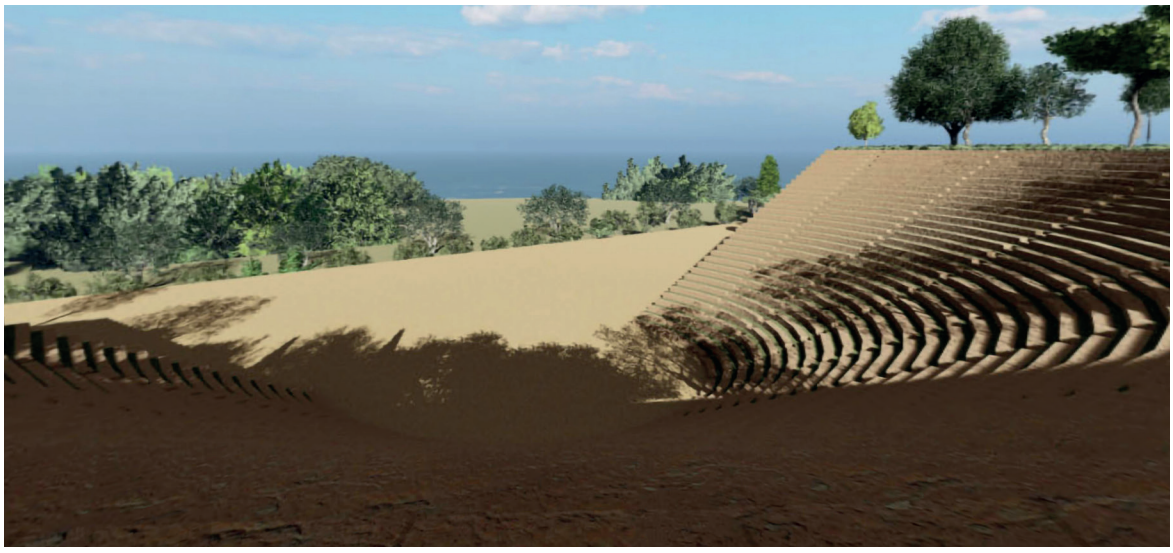


Fig. 6.4.2: Il teatro di Tindari in epoca greca

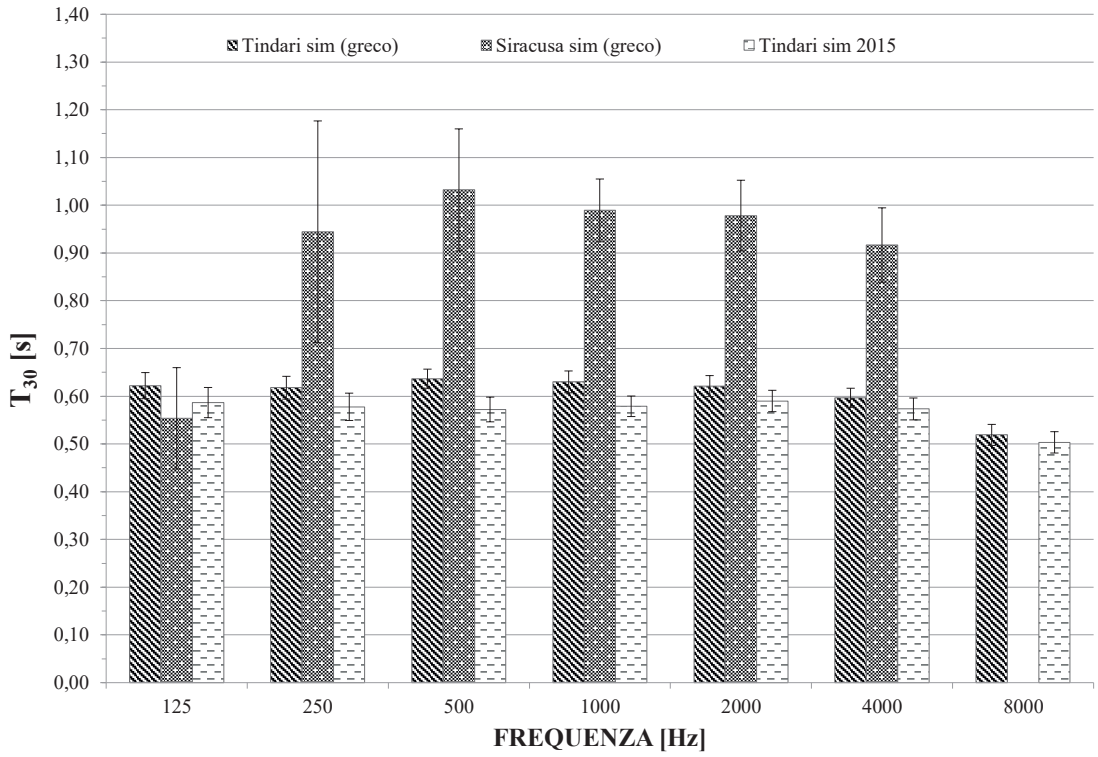


Fig. 6.4.3: *I valori simulati di T_{30} in frequenza per tutti i ricevitori dei teatri di Tindari e Siracusa nel IV secolo a.C..*

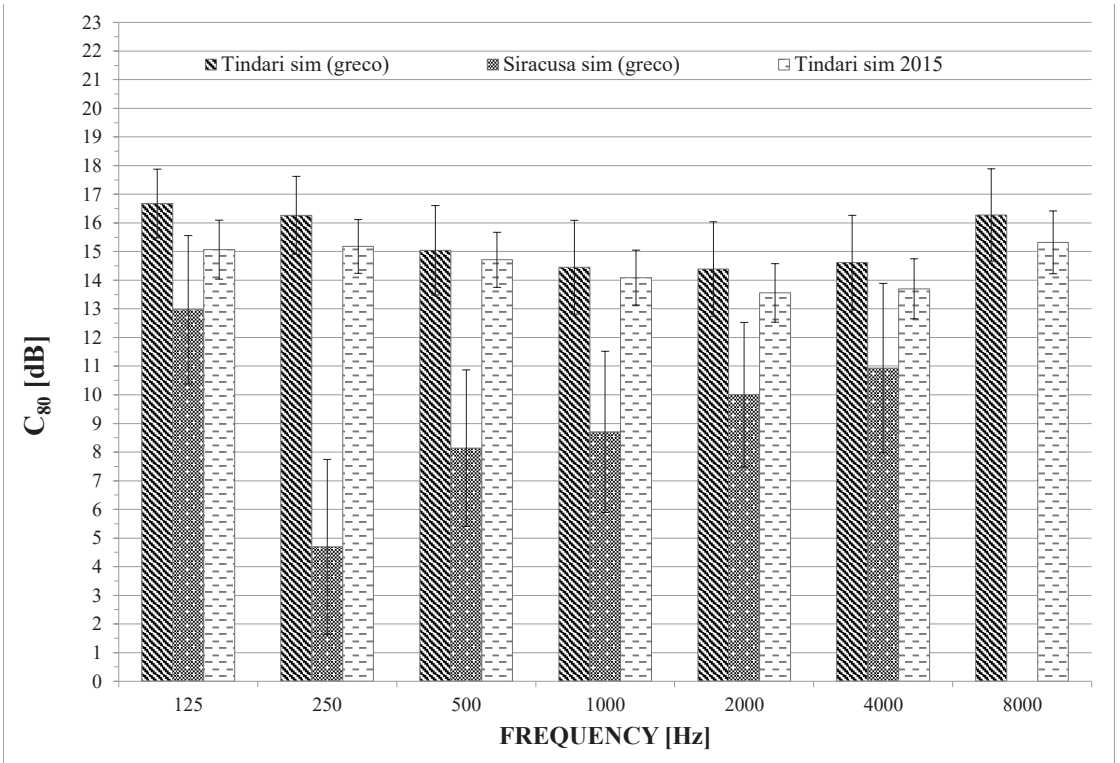


Fig. 6.4.4: *I valori simulati di C_{80} in frequenza per tutti i ricevitori dei teatri di Tindari e Siracusa nel IV secolo a.C..*

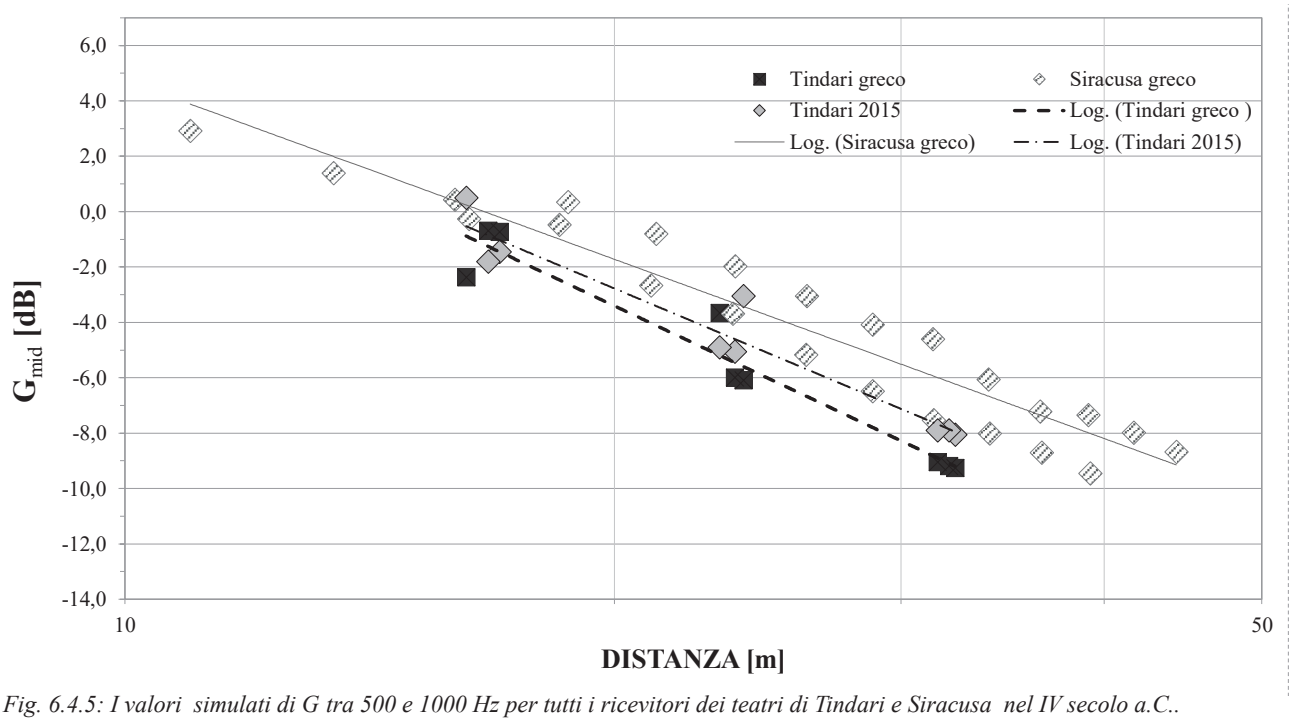


Fig. 6.4.5: I valori simulati di G tra 500 e 1000 Hz per tutti i ricevitori dei teatri di Tindari e Siracusa nel IV secolo a.C..

Tab 6.4.1: Parametri della regressione lineare per i valori di G_{mid} in base alla fig. 6.4.5 con relativo coefficiente R^2.

Fonte	A	B	R^2
Tindari 2015	29,33	-24,68	0,93
Tindari greco	22,70	-21,78	0,98
Siracusa greco	23,90	-20,31	0,94

I dati del teatro di Tindari simulato nella condizione del 2015 sono stati mantenuti nei grafici di T_{30}, C_{80} e G per permettere un confronto tra passato e presente.

Il teatro di Siracusa dai confronti analitici sembra riportare un tempo di riverberazione più alto, e dal punto di vista geometrico si può notare dalle foto che ciò che ha favorito questi valori è probabilmente la presenza della scena in pietra, che convoglia le onde sonore disperse dietro alla fonte sonora nella direzione della cavea. Questo accade per la maggior parte delle frequenze, in particolare da 250 Hz a 4000 Hz dove lo scarto tra le due simulazioni è mediamente di 0.35 s.

Il valore medio di T_{30} tra 500 e 1000 Hz per il modello di simulazione del teatro di Siracusa in epoca greca è 1,01 s, mentre per il teatro di Tindari nel IV secolo a.C è 0,63 s.

Per quanto riguarda la chiarezza della musica, quella del teatro di Siracusa sembra essere qualitativamente inferiore rispetto a quella del teatro di Tindari nella stessa epoca, in particolare si nota che C_{80} risulta basso alle frequenze medie e medio basse ad esclusione di 125 Hz, per poi aumentare progressivamente all'aumentare della frequenza.

Il valore medio di C_{80} tra 500 e 1000 Hz per il modello di simulazione del teatro di Siracusa in epoca greca è 8,4 dB, mentre quello del teatro di Tindari è pari a 14,7 dB.

6.4.2 Simulazioni: Epoca ellenistica - III secolo a.C

In epoca ellenistica invece alla cavea del teatro di Siracusa sono stati aggiunti 31 fine di gradinate, in totale erano quindi 68, e la capienza era incrementata fino a 15000 spettatori. È stato aggiunto un *diazoma* e il diametro massimo della *cavea* è diventato 143 m: inoltre è stato aggiunto un colonnato alto circa 5 m.

Nel teatro di Tindari invece la modifica più significativa apportata intorno al III secolo è la costruzione dell'edificio scenico.

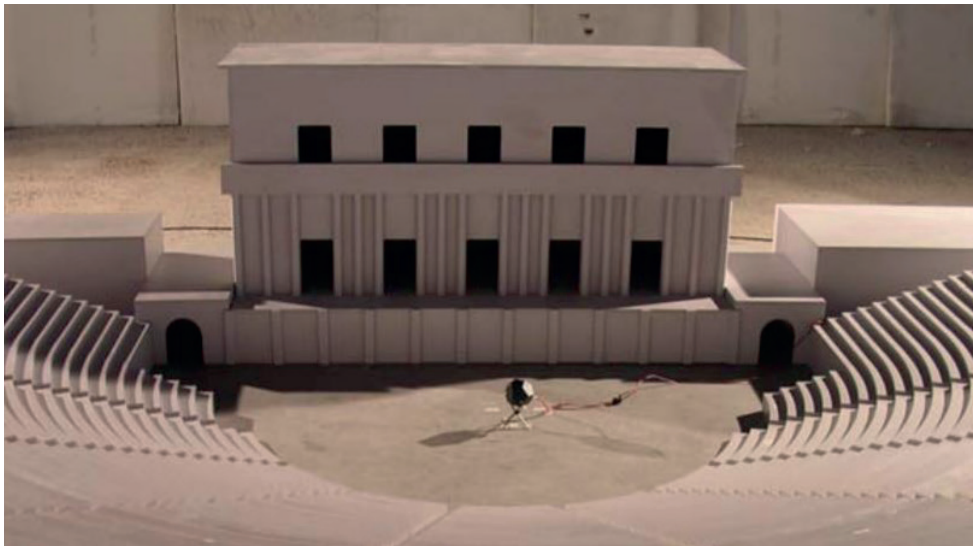


Fig. 6.4.6: *La scena del teatro di Siracusa in epoca ellenistica (tratto da Farnetani, A., 2005).*

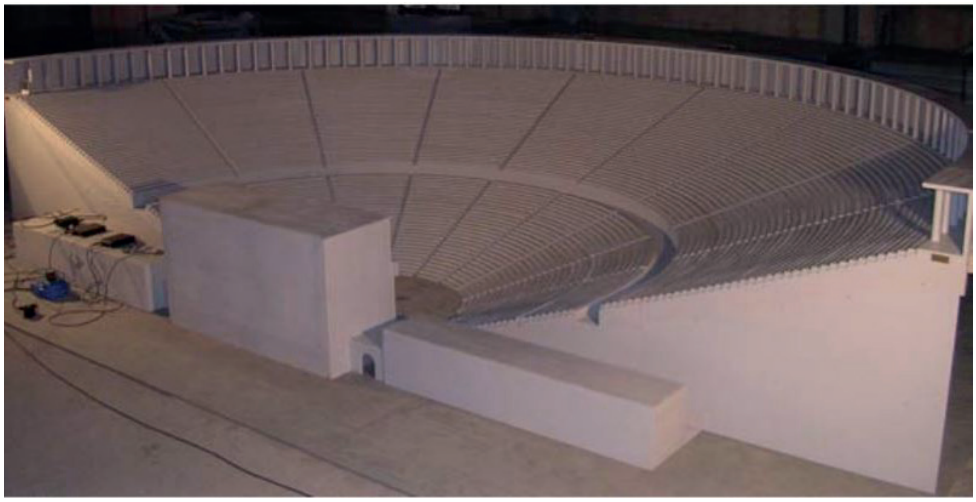


Fig. 6.4.7: *Il teatro di Siracusa in epoca ellenistica (tratto da Farnetani, A., 2005).*

Fig. 6.4.8: *Il teatro di Tindari in epoca ellenistica*

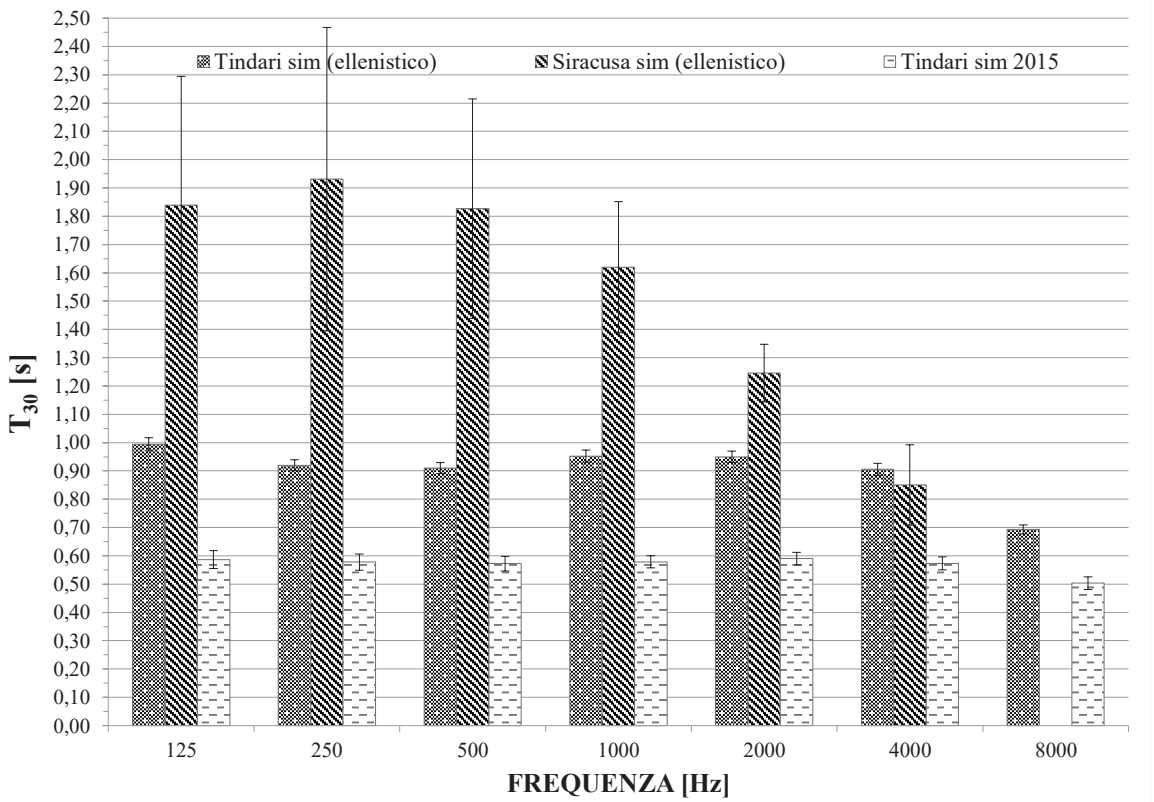


Fig. 6.4.9: *I valori simulati di T_{30} in frequenza per tutti i ricevitori dei teatri di Tindari e Siracusa nel III secolo a.C..*

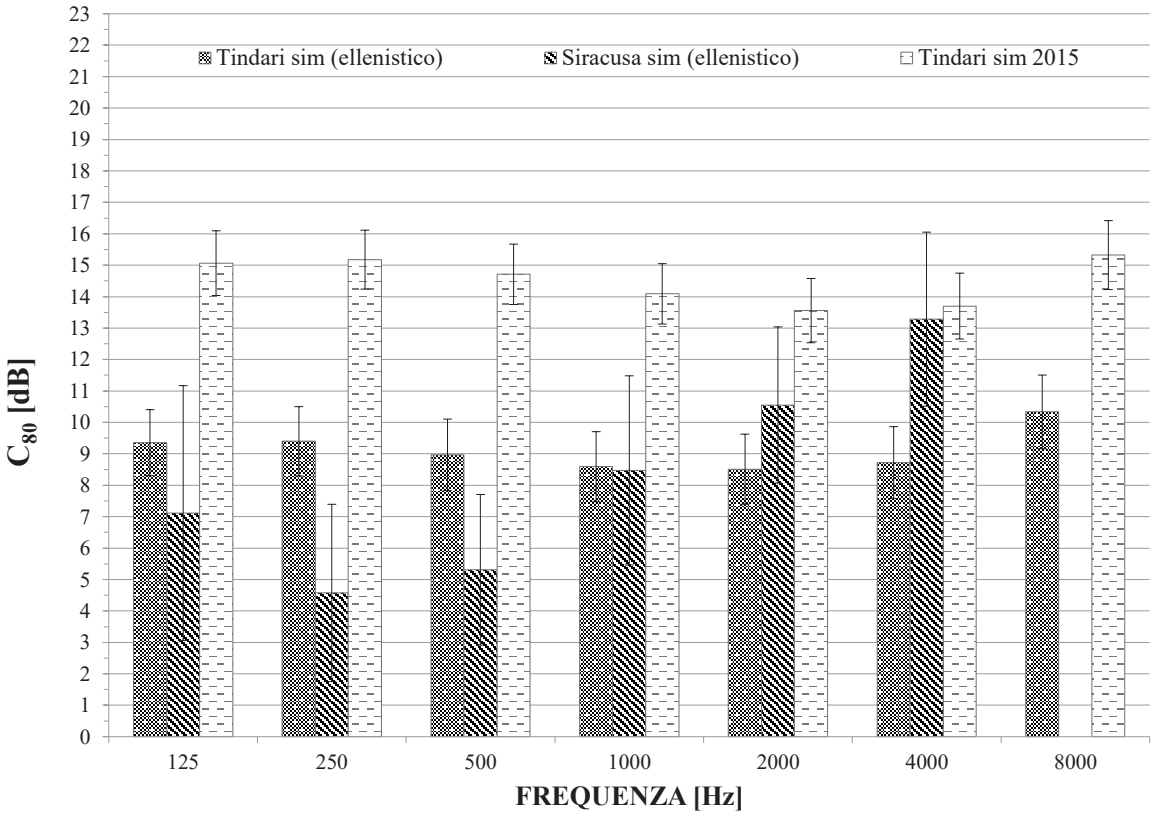


Fig. 6.4.10: *I valori simulati di T_{30} in frequenza per tutti i ricevitori dei teatri di Tindari e Siracusa nel III secolo a.C..*

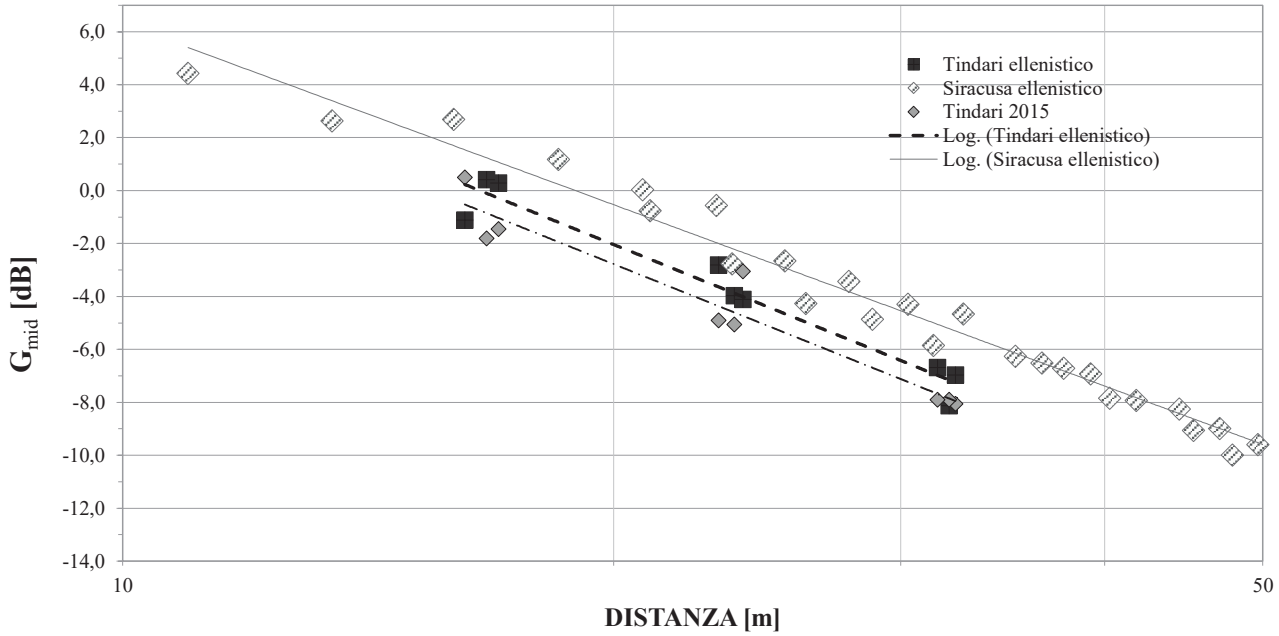


Fig. 6.4.11: *I valori simulati di G tra 500 e 1000 Hz per tutti i ricevitori dei teatri di Tindari e Siracusa nel III secolo a.C..*

Fonte	A	B	R^2
Tindari 2015	29,33	-24,68	0,93
Tindari ellenistico	30,32	-21,78	0,95
Siracusa ellenistico	29,07	-22,76	0,98

Tab 6.4.2: Parametri della regressione lineare per i valori di G_{mid} in base alla fig. 6.4.11 con relativo coefficiente R^2.

Il tempo di riverberazione del teatro di Siracusa è nettamente superiore a quello simulato tramite il modello di calcolo della condizione ellenistica: ciò si può ricondurre al fatto che ne teato di Siracusa in quel periodo storico sono stati fatti ampliamenti in pietra a livello architettonico che hanno aumentato la superficie di riflessione delle onde sonore, dove invece prima si trovava il terreno, e perciò il suono veniva assorbito più facilmente. È stata sopraelevata la scena creando un ulteriore piano e di conseguenza estendendo la facciata: inoltre è stato eretto un colonnato intorno alla parte superiore della cavea che dal punto di vista acustico limita anch'esso la dispersione delle onde sonore, con la conseguente creazione del fenomeno dell'eco all'interno della cavea. Di conseguenza il livello di chiarezza con il modello di simulazione del teatro di Siracusa risulta inferiore a quello di Tindari, mentre l'indice di robustezza risulta superiore in maniera costante a parità di distanza.

Il valore medio di T_{30} tra 500 e 1000 Hz per il modello di simulazione del teatro di Siracusa in epoca ellenistica è 1,72 s, mentre per il teatro di Tindari nel III secolo a.C è 0,93 s.

Per quanto riguarda la chiarezza della musica, quella del teatro di Siracusa sembra essere qualitativamente inferiore rispetto a quella del teatro di Tindari nella stessa epoca, specialmente alle medie frequenze.

Il valore medio di C_{80} tra 500 e 1000 Hz per il modello di simulazione del teatro di Siracusa in epoca ellenistica è 6,9 dB, mentre quello del teatro di Tindari è pari a 8,8 dB.

6.4.3 Simulazioni: Epoca romana - II secolo a.C - II secolo d.C

Nel II secolo a.C Il teatro originariamente greco di Siracusa è stato modificato dai romani. Come è accaduto per il teatro di Tindari sono stati rimosse 4 file della cavea per allargare l'*orchestra*, e inoltre è stato creato un *diazoma* minore. Nel II secolo d.C invece è stato costruito il teatro romano di Benevento, la cui cavea aveva in origine un diametro pari a 80 m, poteva contenere fino a 10000 spettatori e l'edificio scenico al fondo dell'orchestra misurava 44 m in larghezza e 3,5 m in altezza. Si ipotizza inoltre che le superfici fossero ricoperte di marmo, a causa dei ritrovamenti all'interno del sito archeologico. Nel teatro di Tindari invece questo materiale era posizionato intorno all'orchestra, e svolgeva la funzione di rivestimento del podio creato dalla sottrazione delle 4 file di sedute: è stata mantenuta la scena e si ipotizza che fosse stato costruito un colonnato intorno alla *cavea*.

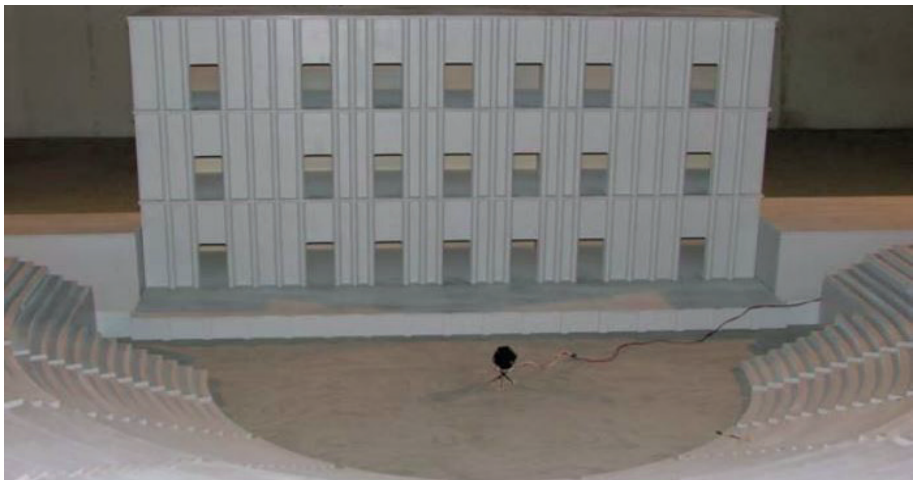


Fig. 6.4.12:La scena del teatro di Siracusa in epoca romana (tratto da Farnetani, A., 2005).

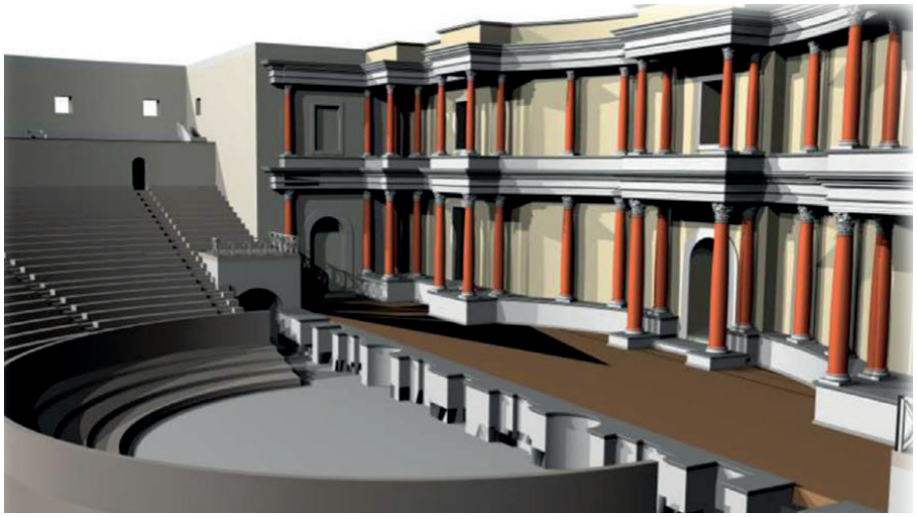


Fig. 6.4.13: La ricostuzioe del teatro di Benevento in epoca romana (tratto da Berardi, U., Iannace, G.,2020)

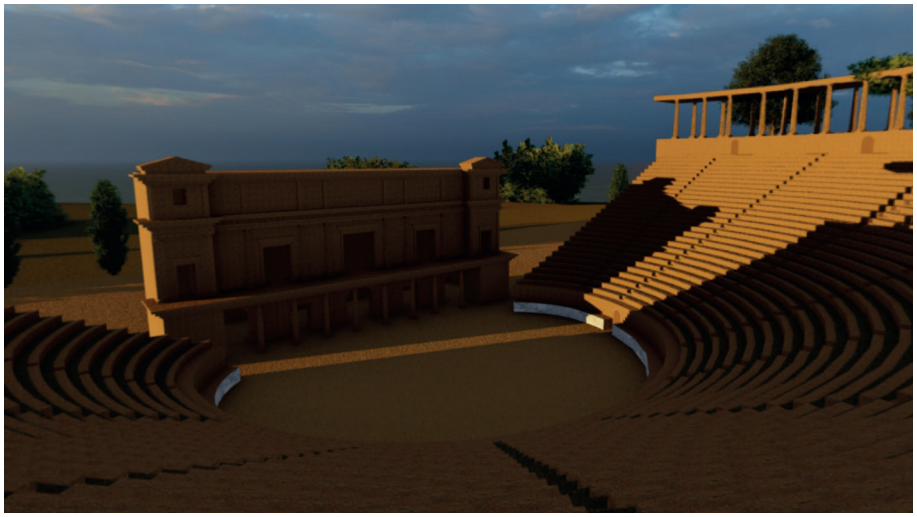


Fig. 6.4.14: Il teatro di Tindari in epoca romana imperiale.

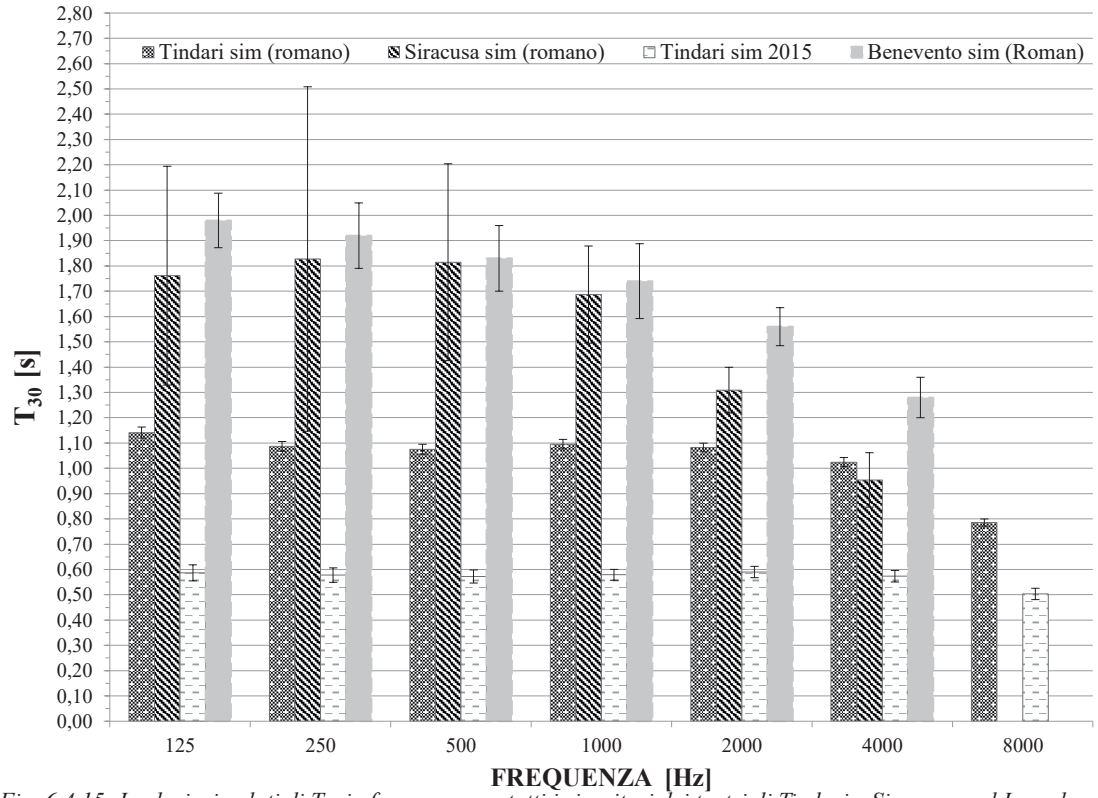


Fig. 6.4.15: I valori simulati di T_{30} in frequenza per tutti i ricevitori dei teatri di Tindari e Siracusa nel I secolo d.C..

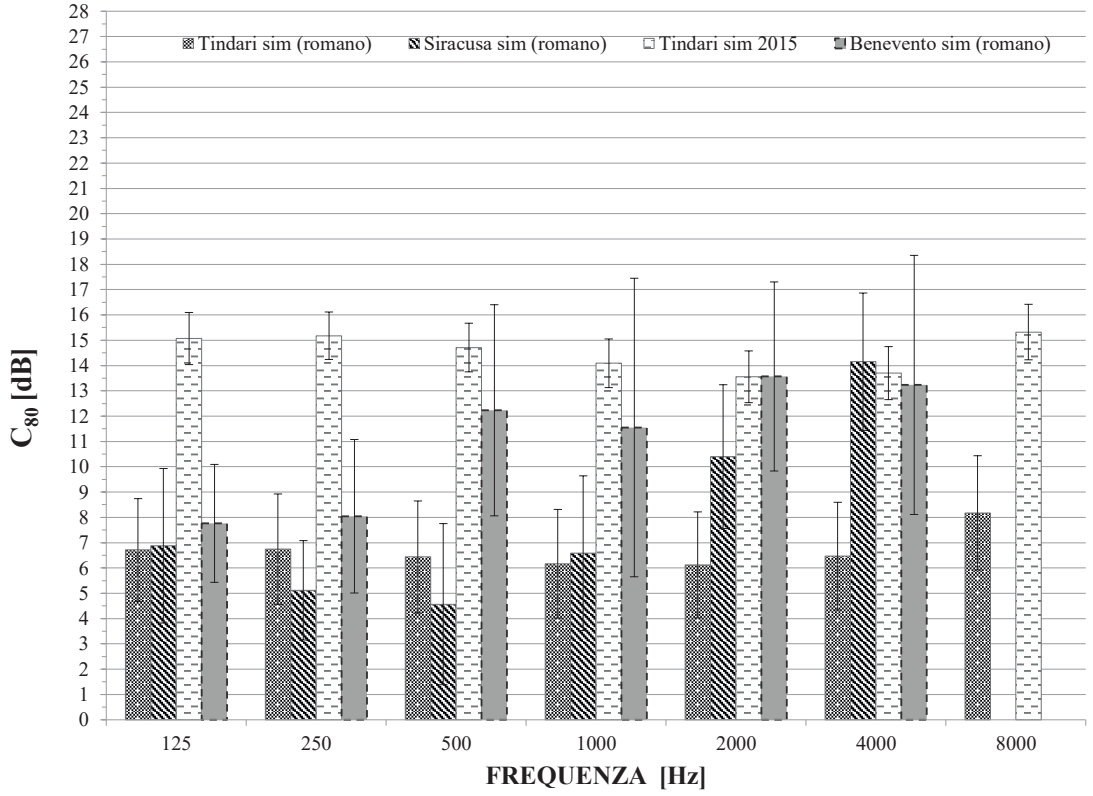


Fig. 6.4.16: I valori simulati di C_{80} in frequenza per tutti i ricevitori dei teatri di Tindari e Siracusa nel I secolo d.C..

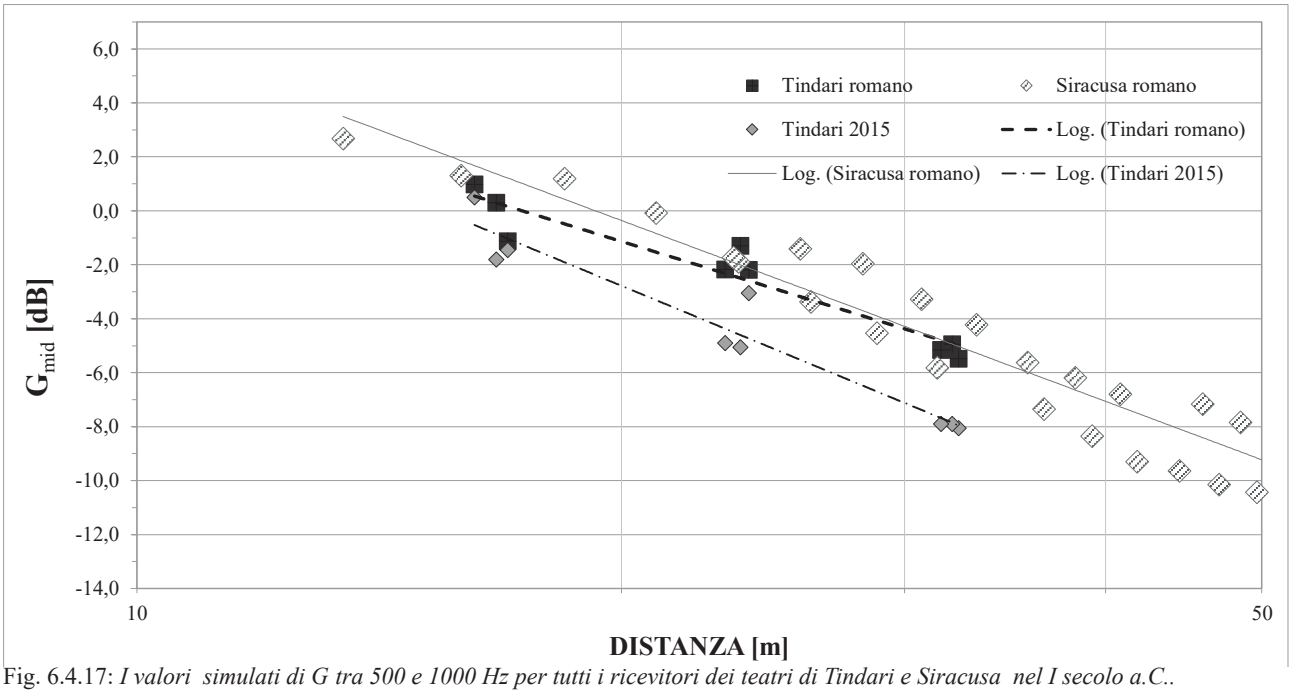


Fig. 6.4.17: *I valori simulati di G tra 500 e 1000 Hz per tutti i ricevitori dei teatri di Tindari e Siracusa nel I secolo a.C..*

Tab 6.4.3: Parametri della regressione lineare per i valori di G_{mid} in base alla fig. 6.4.17 con relativo coefficiente R^2.

Fonte	A	B	R^2
Tindari 2015	29,33	-24,68	0,93
Tindari romano	22,82	-18,32	0,95
Siracusa romano	28,63	-22,27	0,98

La tendenza dei dati riferiti ai teatri di Benevento e Siracusa sembra analoga per quanto riguarda T_{30}, mentre per ciò che concerne i valori di C_{80} è evidente che siano maggiori di quelli di Siracusa e Tindari.

Il valore medio di T_{30} tra 500 e 1000 Hz per il modello di simulazione del teatro di Siracusa in epoca romana è 1,75 s, per il teatro di Tindari è 1,09 s, e per quello di Benevento in origine 1,79 s. Per quanto riguarda la chiarezza della musica invece è degno di nota il fatto che il teatro di Benevento pur avendo alti valori di T_{30}, abbia anche un livello di chiarezza della musica superiore alle aspettative. Il valore medio di C_{80} tra 500 e 1000 Hz per il modello di simulazione del teatro di Siracusa in epoca romana è 5,6 dB, quello del teatro di Tindari è pari a 6,3 dB, e quello di Benevento 11,9 dB .

6.5 Il confronto con i Teatri simulati per il progetto ERATO

Come già anticipato nel paragrafo 3.2 i ricercatori che hanno preso parte al progetto ERATO svoltosi hanno svolto un lavoro simile a quanto presentato per il teatro di Tindari: in quel caso però sono stati simulati unicamente teatri di epoca romana, scegliendo alcuni teatri all'aperto, cioè Aspendo, Gerasa e Siracusa e altri che in origine erano al chiuso, cioè gli *odeon* di Aosta e Afrodisia.

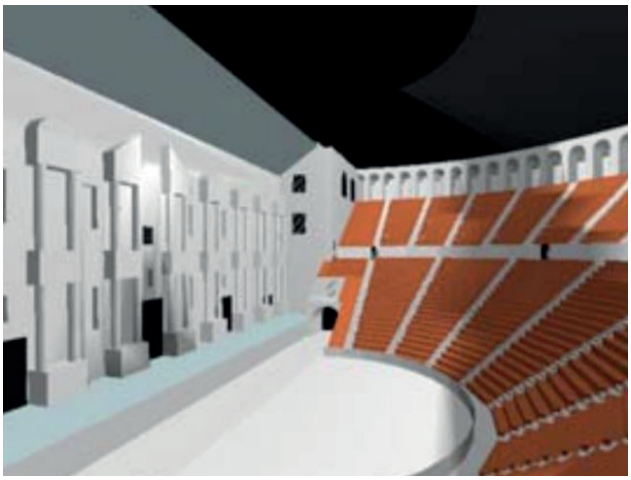


Fig. 6.5.1: Modello di calcolo del teatro di Aspendo in epoca romana (tratto da Rindel, JH., Nielsen, M.L., 2006)

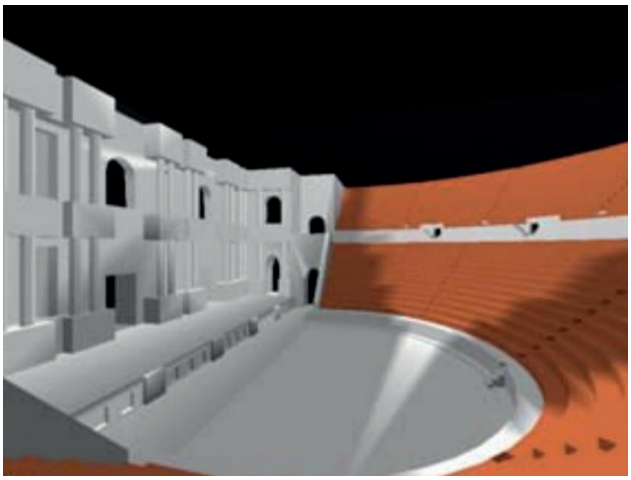


Fig. 6.5.2: Rindel, JH., Nielsen, M.L Modello di calcolo del teatro di Gerasa in epoca romana (tratto da Rindel, JH., Nielsen, M.L., 2006)

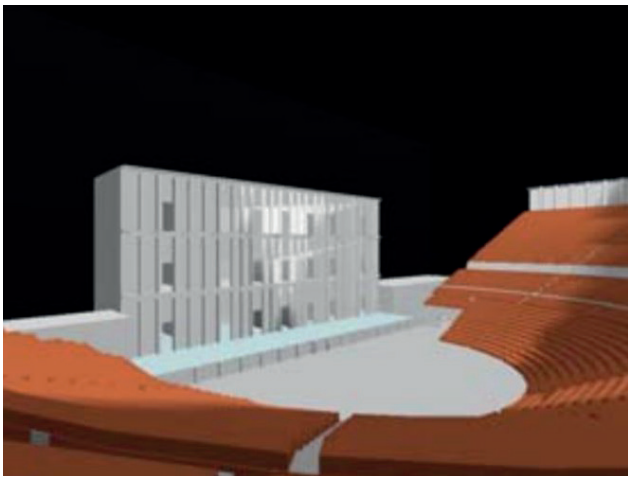


Fig. 6.5.3:Modello di calcolo del teatro di Siracusa in epoca romana (tratto da Rindel, JH., Nielsen, M.L., 2006).

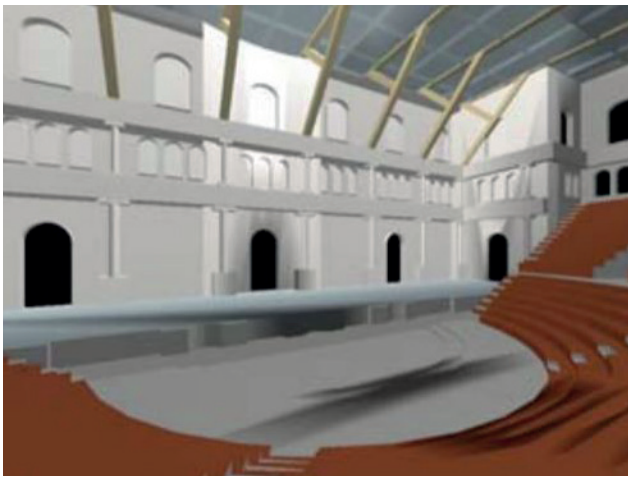


Fig. 6.5.4: Modello di calcolo dell'odeon di Aosta in epoca romana (tratto da Rindel, JH., Nielsen, M.L., 2006).

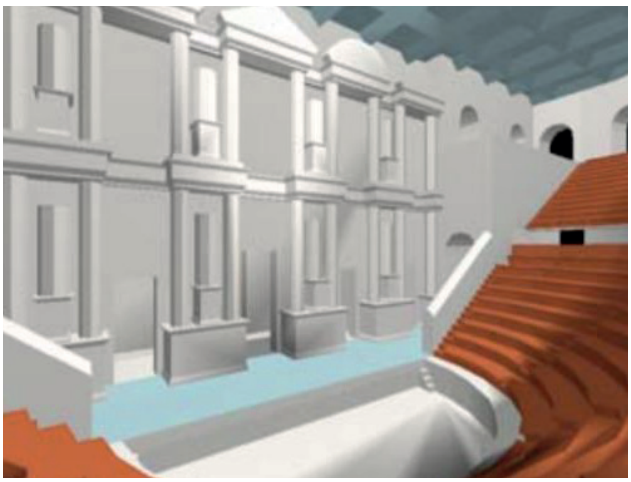


Fig. 6.5.5: Modello di calcolo dell'odeon di Afrodisia in epoca romana (tratto da Rindel, JH., Nielsen, M.L., 2006).

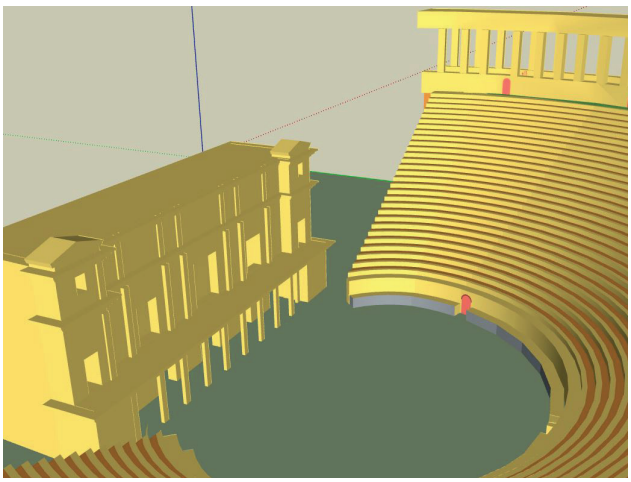


Fig. 6.5.6: Modello di calcolo del teatro di Tindari in epoca romana.

Di seguito si trova un confronto tra la simulazione del teatro di Tindari in epoca romana e le simulazioni dello stesso periodo realizzate in occasione de progetto ERATO: i parametri utilizzati per il confronto sono il valore medio tra 500 e 1000 Hz di T_{30}, G e C_{80} per tutti i ricevitori

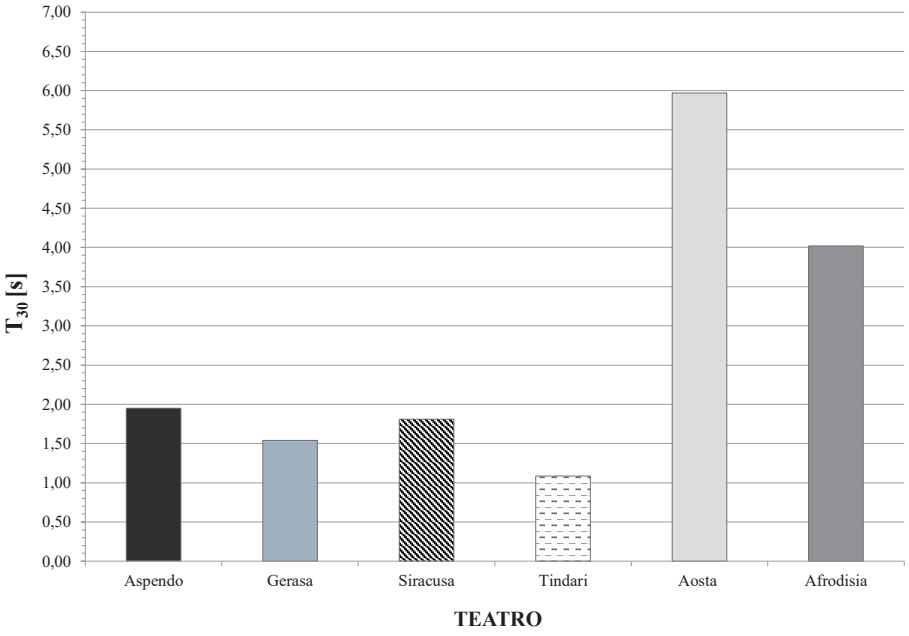


Fig. 6.5.7: I valori medi di T_{30} tra 500 e 1000 Hz dei teatri simulati in epoca romana nell'ambito del progetto ERATO a confronto con quelli del teatro di Tindari simulato in epoca romana.

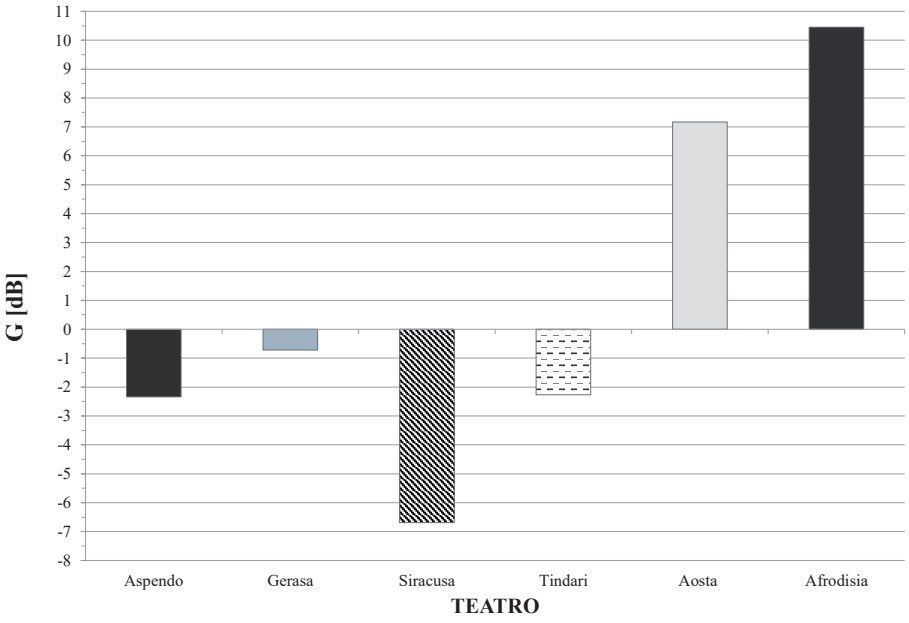


Fig. 6.5.8: I valori medi di G tra 500 e 1000 Hz dei teatri simulati in epoca romana nell'ambito del progetto ERATO a confronto con quelli del teatro di Tindari simulato in epoca romana.

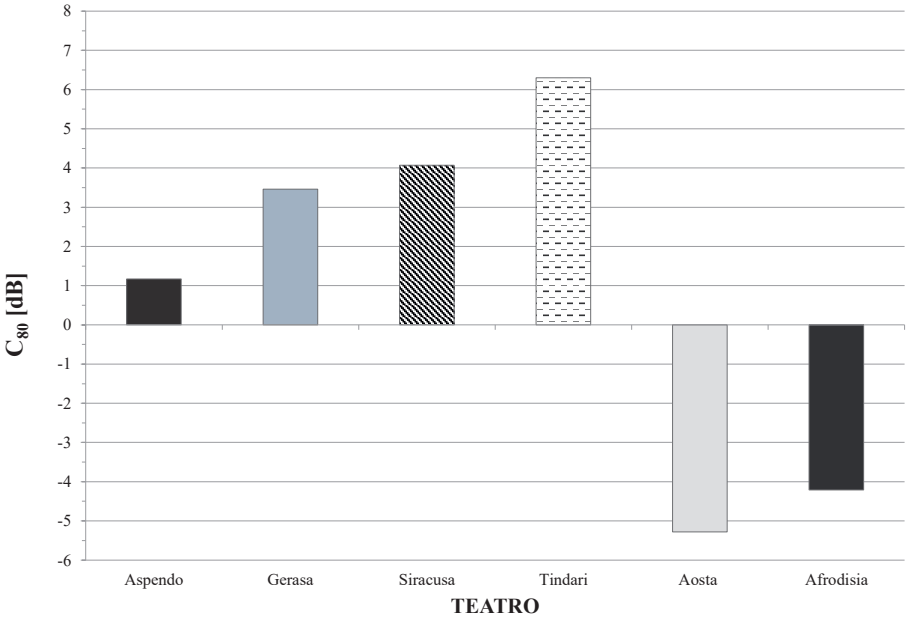


Fig. 6.5.9: I valori medi di C_{80} tra 500 e 1000 Hz dei teatri simulati in epoca romana nell'ambito del progetto ERATO a confronto con quelli del teatro di Tindari simulato in epoca romana.

Dai risultati ottenuti è possibile infatti vedere chiaramente il motivo per cui gli *odea* fossero dedicati principalmente agli spettacoli musicali, mentre i teatri all'aperto fossero riservati solitamente a quelli in cui il parlato era preponderante: si nota infatti che la presenza della copertura determina un tempo di riverberazione molto alto, che sfiora addirittura i 6 s nella fascia tra 500 e 1000 Hz per la simulazione dell'*odeon* di Aosta, mentre i teatri sprovvisti di copertura restano al di sotto dei 2 s. Questo determina necessariamente che la chiarezza nei teatri all'aperto fosse maggiore di quella nei teatri coperti, per questo motivo il parlato era più comprensibile dove non era presente la copertura. Questa tuttavia incrementava però notevolmente l'indice di robustezza dei teatri al coperto come si può vedere nel nella figura 6.5.8.

Il teatro di Tindari in epoca romana imperiale a confronto con gli altri teatri simulati in base alle caratteristiche presenti in quel periodo risulta essere quello con l'indice di chiarezza più alto nella banda tra 500 e 1000 Hz: per quanto riguarda il tempo di riverberazione è possibile affermare che questo si avvicini di più a quello del teatro di Gerasa, mentre per quanto riguarda l'indice di robustezza è più simile a quello del teatro di Aspendo, che è pù basso di quello di Gerasa, era necessari quindi uno sforzo vocale di poco maggiore perchè il suono raggiungesse le ultime file. Per quanto riguarda gli Odeon invece dalle simulazioni si nota che G e T_{30} sono piuttosto alti e questo è dovuto a un maggior numero di superfici riflettenti che contribuiscono alla riflessione sonora che fanno sì che sia necessario uno sforzo vocale minore in uno spazio chiuso affinchè questo sia sentito, in confronto a quanto accadrebbe se si trattasse di uno spazio aperto. Il numero eccessivo di riflessioni tuttavia favorisce il fenomeno dell'eco, specialmente se lo spazio al chiuso viene simulato non occupato come in questo caso, mentre ciò non accade negli spazi aperti dove il tempo di riverberazione è minore.

Capitolo 7

Auralizzazioni

7.1 Impostazione dei modelli di calcolo

Il processo di auralizzazione, in analogia al procedimento di visualizzazione, consente di ascoltare l'effetto sonoro prodotto all'interno del teatro di Tindari in posizioni prestabilite, in modo da creare un file utile a confrontare i diversi segnali simulati per ogni modello storico.

Per simulare l'esperienza acustica in un determinato spazio è necessario possedere un file audio parlato o musicale anecoico, cioè registrato in una camera anecoica in modo che non si verifichino fenomeni di eco, così che il segnale sia formato unicamente dall'impulso diretto: successivamente il software processa numericamente il file anecoico, attraverso la convoluzione, in modo da simulare l'esperienza di ascolto e ciò che influisce sull'audio oltre alla geometria e ai materiali impiegati è anche la posizione dell'ascoltatore rispetto alla fonte sonora.

Le convoluzioni calcolate con Odeon uniscono i file delle risposte all'impulso (IR) utilizzati per simulare la spazialità con il file anecoico di partenza in modo da permettere l'esperienza dell'ascolto all'interno dello spazio simulato.

È stato scelto di calcolare auralizzazioni di tipo binaurale, cioè il suono è stato convoluto in modo da essere ascoltato in cuffia, perchè si considera che deve essere ascoltato da due orecchie: il software calcola perciò il BRIR (Binaural Room Impulse Response) formato da due segnali, uno per ogni orecchio, che possono differire leggermente tra loro a seconda della direzionalità del suono emesso dalla sorgente e riflesso dall'ambiente.

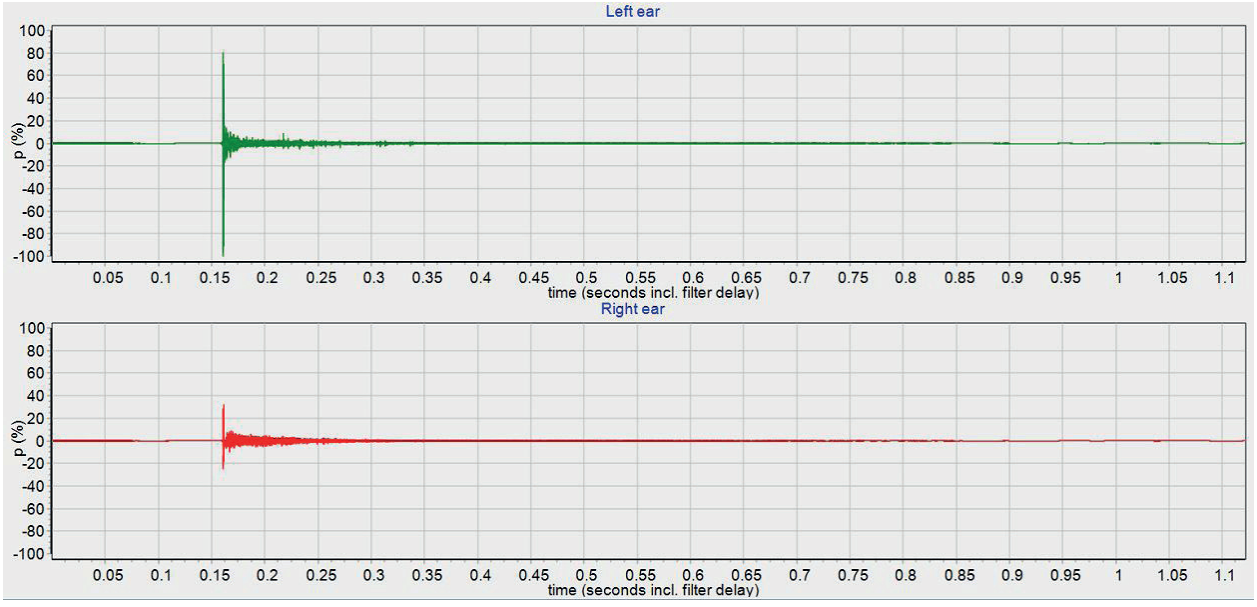


Fig. 7.1.1: Il BRIR di un Single point response del modello di simulazione del teatro di Tindari nel 2015.

Per i calcoli relativi ai parametri acustici utili a confrontare il teatro di Tindari con altri teatri antichi è stata utilizzata una sorgente sonora di tipo omnidirezionale: per le auralizzazioni è stato scelto di utilizzare diverse impostazioni a seconda della tipologia di file sonoro.

Dal software Odeon sono stati scelti un segnale anecoico parlato denominato *Agora short* e uno musicale denominato *Piano Autumn Leaves* che sono stati simulati per tutti i modelli delle fasi storiche del teatro di Tindari. Prima di procedere con la convoluzione è stato impstata la fonte sonora S1 come *Tlkraise_NAURAL.SO8* senza alcun incremento al segnale emesso come mostrato di seguito:

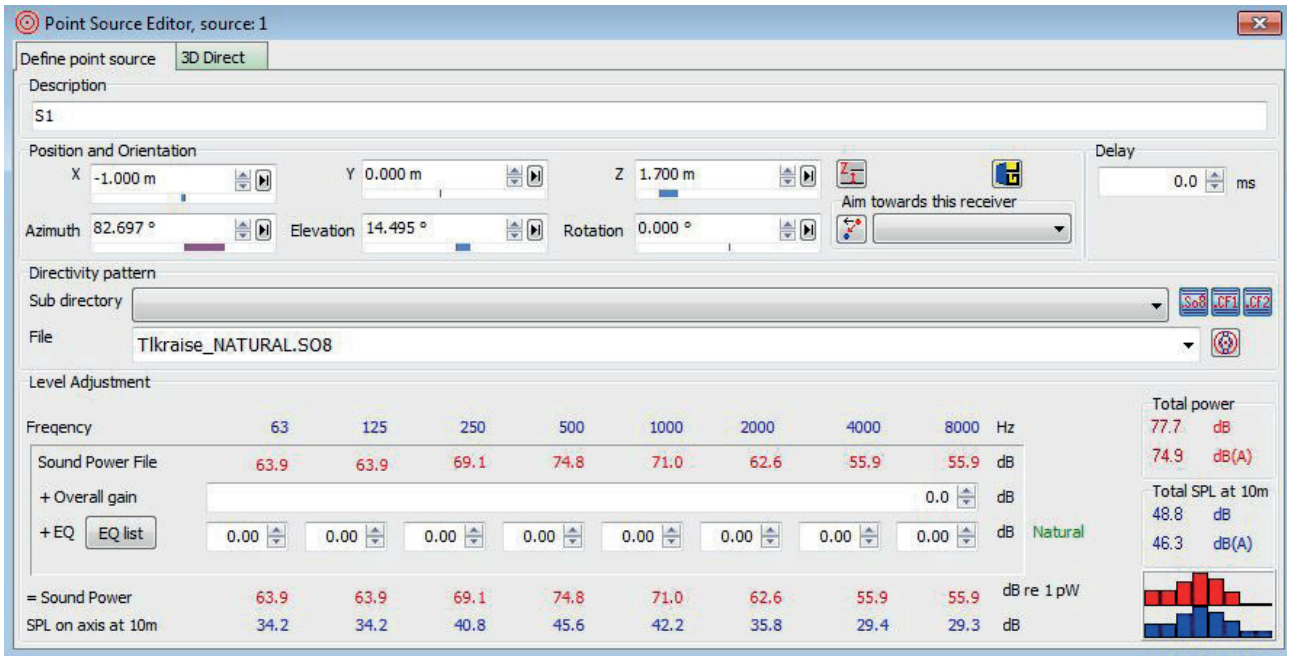


Fig. 7.1.2: le impostazioni della sorgente S1 utilizzate per le auralizzazioni del parlato.

Nell'immagine seguente vengono invece riportate le impostazioni riferite alle auralizzazioni.

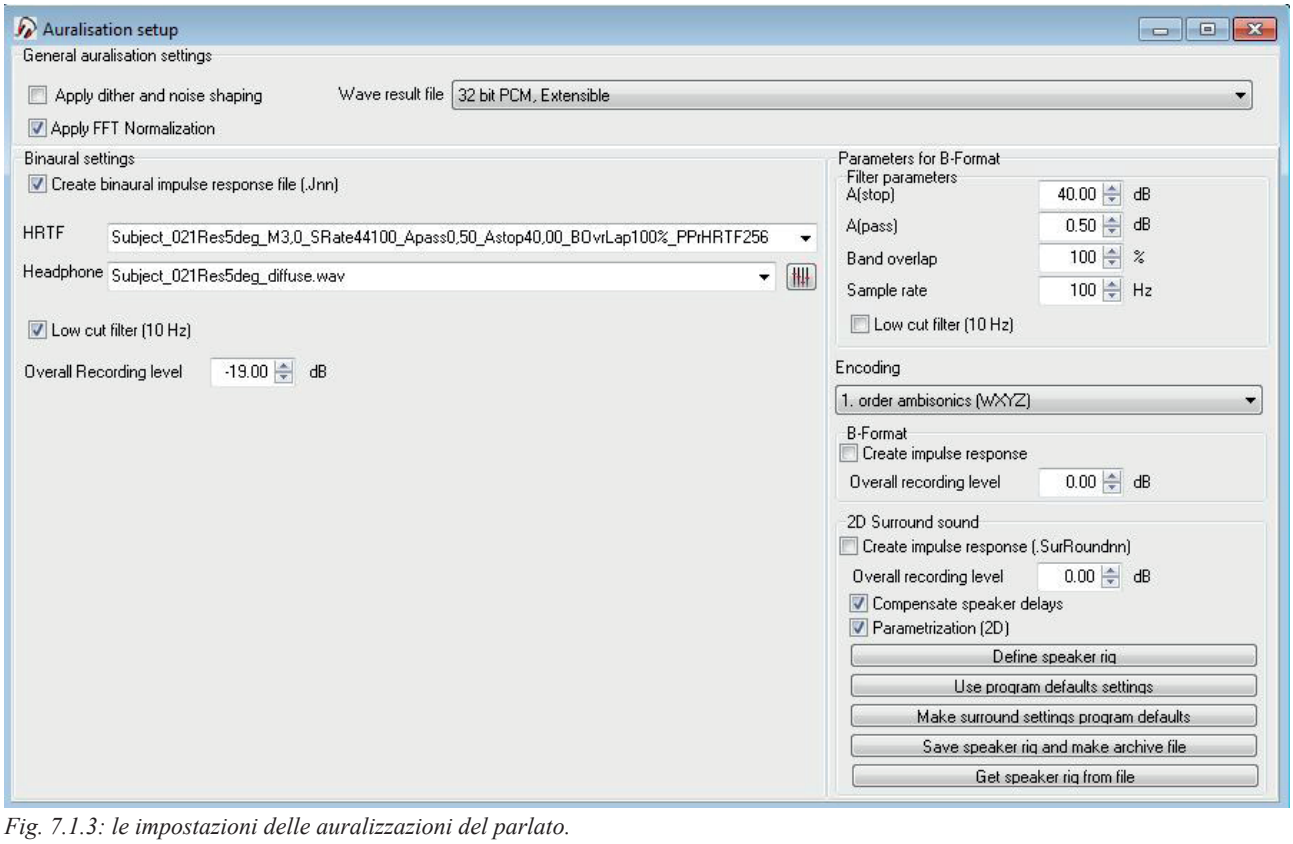


Fig. 7.1.3: le impostazioni delle auralizzazioni del parlato.

Overall Recording Level è stato impostato in modo da ottenere i seguenti livelli *Max. Out:* questi valori non devono essere maggiori di 0 per non riprodurre un suono distorto, a causa dell'intensità eccessiva del segnale.

Job list - Binaural mode (Headphone = Subject_021Res5deg_diffuse.wav)

Convolve Binaural RIR with Signal file

Conv. no.	Enabled	Signal Sub Path	Signal file	Time	Channel	Calib.	Job no.	Receiver	Job descr.	Rcd. lev.	Max. out
1	☑		Agora short	0:10'07	Average	☐	1	1 towards -X	S2R1	0.00	-17.72
2	☑		Agora short	0:10'07	Average	☐	2	2 towards -X	S2R2	0.00	-9.39
3	☑		Agora short	0:10'07	Average	☐	3	3 towards -X	S2R3	0.00	-9.69
4	☑		Agora short	0:10'07	Average	☐	4	4 towards -X	S2R4	0.00	-13.45
5	☑		Agora short	0:10'07	Average	☐	5	5 towards -X	S2R5	0.00	-7.84
6	☑		Agora short	0:10'07	Average	☐	6	6 towards -X	S2R6	0.00	-7.26
7	☑		Agora short	0:10'07	Average	☐	7	7 towards -X	S2R7	0.00	-9.63
8	☑		Agora short	0:10'07	Average	☐	8	8 towards -X	S2R8	0.00	-5.67
9	☑		Agora short	0:10'07	Average	☐	9	9 towards -X	S2R9	0.00	-2.05
10	☑		(none)		Average	☐	(none)			0.00	-99.00
11	☑		(none)		Average	☐	(none)			0.00	-99.00
12	☑		(none)		Average	☐	(none)			0.00	-99.00

Fig. 7.1.4: I risultati delle convoluzioni

Per tutti i segnali audio invece, avendo scelto il suono di un pianoforte come segnale anecoico è stata utilizzata nuovamente una sorgente omnidirezionale e di conseguenza le impostazioni sono variate come si mostra nelle seguenti immagini:

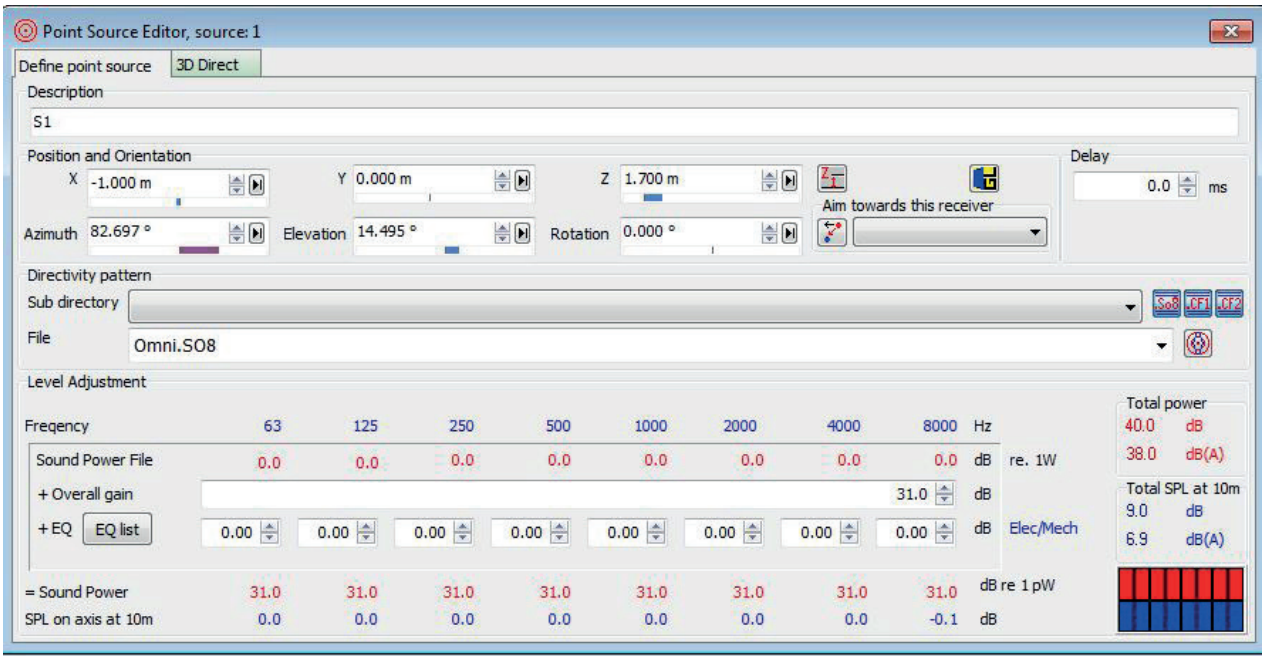


Fig. 7.1.5: le impostazioni della sorgente S1 utilizzate per le auralizzazioni della musica.

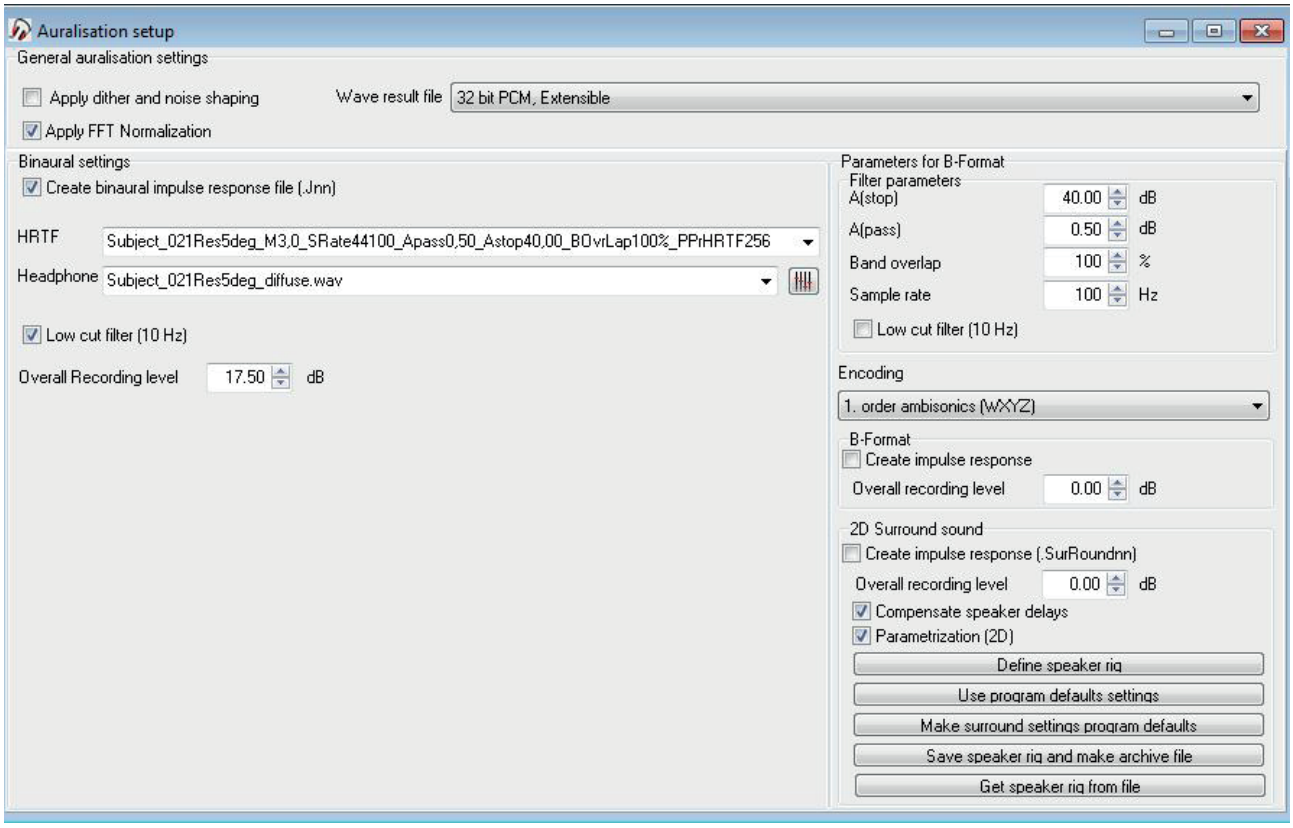
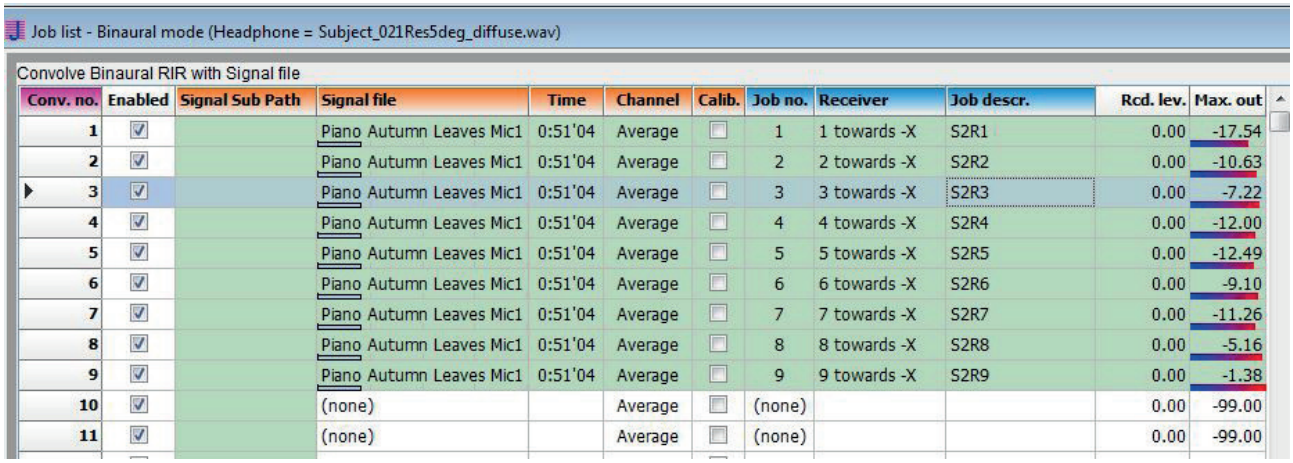


Fig. 7.1.6: le impostazioni delle auralizzazioni per la musica.



Conv. no.	Enabled	Signal Sub Path	Signal file	Time	Channel	Calib.	Job no.	Receiver	Job descr.	Rcd. lev.	Max. out
1	☑		Piano Autumn Leaves Mic1	0:51'04	Average	☐	1	1 towards -X	S2R1	0.00	-17.54
2	☑		Piano Autumn Leaves Mic1	0:51'04	Average	☐	2	2 towards -X	S2R2	0.00	-10.63
3	☑		Piano Autumn Leaves Mic1	0:51'04	Average	☐	3	3 towards -X	S2R3	0.00	-7.22
4	☑		Piano Autumn Leaves Mic1	0:51'04	Average	☐	4	4 towards -X	S2R4	0.00	-12.00
5	☑		Piano Autumn Leaves Mic1	0:51'04	Average	☐	5	5 towards -X	S2R5	0.00	-12.49
6	☑		Piano Autumn Leaves Mic1	0:51'04	Average	☐	6	6 towards -X	S2R6	0.00	-9.10
7	☑		Piano Autumn Leaves Mic1	0:51'04	Average	☐	7	7 towards -X	S2R7	0.00	-11.26
8	☑		Piano Autumn Leaves Mic1	0:51'04	Average	☐	8	8 towards -X	S2R8	0.00	-5.16
9	☑		Piano Autumn Leaves Mic1	0:51'04	Average	☐	9	9 towards -X	S2R9	0.00	-1.38
10	☑		(none)		Average	☐	(none)			0.00	-99.00
11	☑		(none)		Average	☐	(none)			0.00	-99.00

Fig. 7.1.7: I risultati delle convoluzioni

7.2 Il tour virtuale

I file convoluti sono stati poi inseriti all'interno di un tour virtuale realizzato su Lapentor, uno strumento online che permette di realizzare e pubblicare questo tipo di produzioni formate da diversi panorami a 360° e da ulteriori file multimediali.

Nel caso del teatro di Tindari è stato necessario modificare i modelli già creati per le simulazioni acustiche e aggiungere i dettagli che avrebbero allungato i tempi di calcolo senza produrre alcuna rilevanza acustica, principalmente concentrati sull'edificio scenico, come i capitelli delle colonne, le cornici dei livelli della scena e le rampe di scale nella *cavea.*

I nuovi modelli sono stati poi importati su Lumion v10 dove è stata impostata la scena base per i diversi render: è stato scelto di attribuire una diversa ora del giorno a ogni epoca storica renderizzata, per distaccare visivamente le scene con caratteristiche geometriche simili.

Per ogni posizione all'interno del tour virtuale è stato renderizzato un panorama sferico, le immagini sono in totale 70, 10 per ogni epoca, una per ogni ricevitore e una per la visuale dal punto di vista dell'attore o musicista. Il progetto è visibile online al link *https://app.lapentor.com/u/g.benve16.*

Il tour virtuale inizia dal punto di vista dell'attore nel teatro del 2015 e si ha la possibilità di scegliere se sedersi virtualmente in una delle nove postazioni per ascoltare l'audio simulato, oppure si può cambiare epoca storica mantenendo la stessa posizione. Lo stesso accade se si scegli di spostarsi virtualmente sulle gradinate, dove per ogni postazione si può scegliere se ascoltare gli audio, posizionarsi al centro dell'orchestra oppure cambiare epoca storica mantenendo inalterata la posizione.

Fig. 7.2.1: Il teatro di Tindari nel IV secolo a.C.

Fig.7.2.2: Il teatro di Tindari nel III secolo a.C.

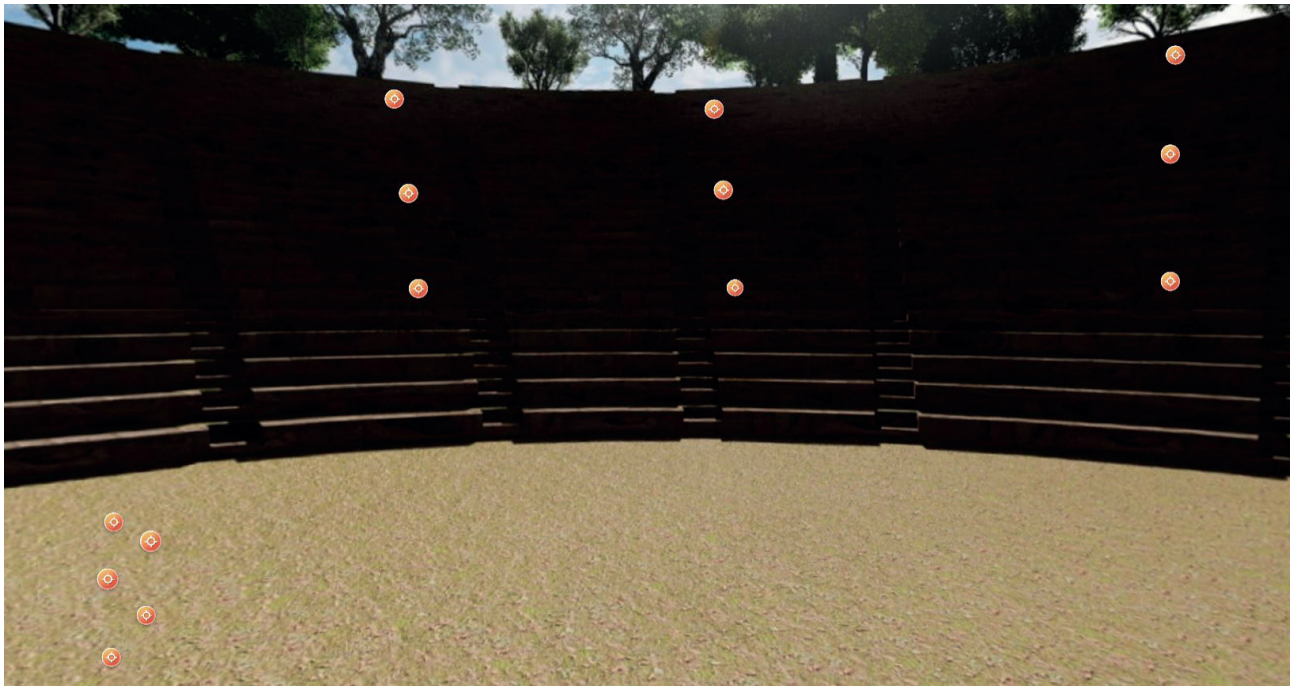


Fig. 7.2.3: Anteprima del tour virtuale su Lapentor.com

Al passaggio del mouse appare il nome della destinazione del collegamento. È possibile notare che nelle postazioni più vicine alla fonte sonora, quindi R3, R6, R9 il file è stato convoluto simulando una vicinanza più prossima con l'attore, mentre nelle posizioni più lontane nella cavea come R1, R4, R7 le convoluzioni permettono di esperire meglio la spazialità degli IR uniti ai file anecoici, facendoci percepire l'attore più distante.

Inoltre è notevole la differenza tra le epoche dove è presente la scena e quelle in cui le onde sonore che si propagano dietro all'attore vengono disperse: questo è già stato dimostrato analiticamente nel paragrafo 6.2 dove sono mostrati attraverso i grafici i parametri che descrivono l'acustica del teatro di Tindari ed evidenziano che in epoca ellenistica e romana il tempo di riverberazione fosse superiore a quello delle altre epoche e di conseguenza la chiarezza fosse qualitativamente inferiore. Inoltre ascoltando i file musicali prodotti con fonte omnidirezionale nella simulazione del 1965 è possibile notare che il ricevitore 3 presenta una maggiore quantità di eco di quanto si potrebbe presumere: ciò avviene a causa delle onde sonore riflesse dai resti della scena.

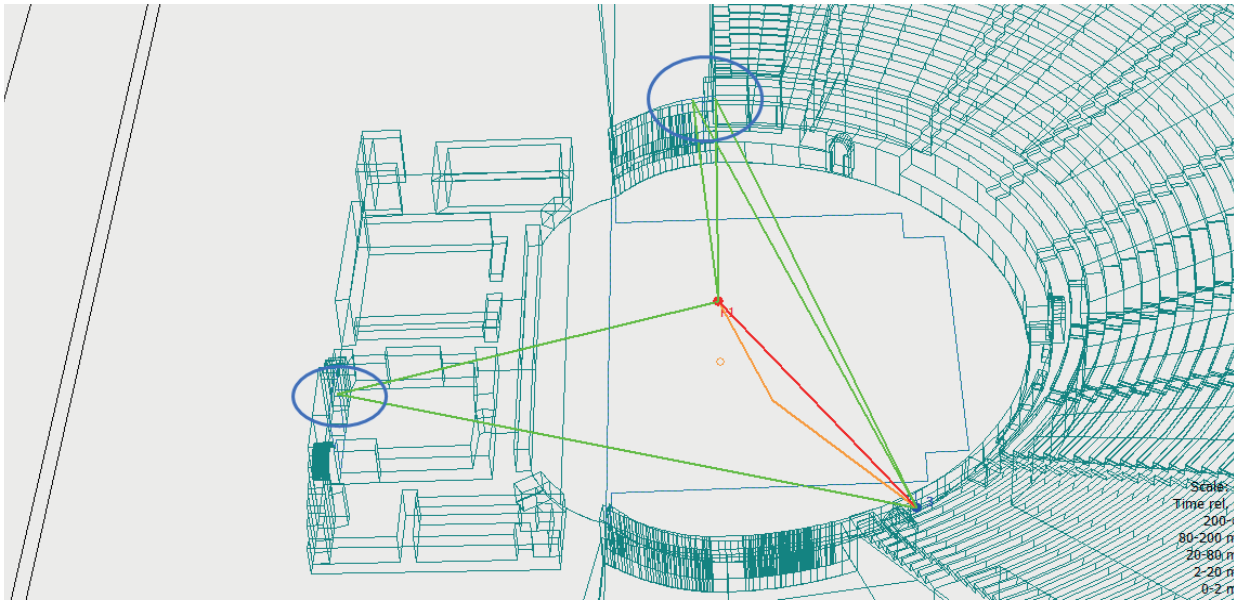


Fig. 7.2.4: Le riflessioni che causano un eco eccessivo nel ricevitore 3

7.3 Conclusioni

È dunque possibile recuperare virtualmente gli effetti sonori prodotti all'interno dei teatri antichi e poter fare esperienza della qualità dell'audio propria di un tempo passato. Dato lo stretto legame tra architettura e acustica, affinchè la ricostruzione sia accurata sono necessarie fonti bibliografiche complete, tali da permettere una ricostruzione virtuale totale dell'architettura, pur considerando che a distanza di secoli alcuni dettagli possano essere incerti, anche per gli autori delle fonti bibliografiche: la modellazione della geometria e dei materiali presenti nel passato sono ciò che determinano la simulazione dell'audio. In futuro sarebbe utile indagare anche l'effetto del degrado del materiale sull'acustica, in modo da simulare modelli storici con un'accuratezza ancora maggiore di quanto fatto finora, poichè i coefficienti di assorbimento e scattering nelle simulazioni del passato dei teatri antichi sono stati applicati in base a quelli attuali: sarebbe interessante pertanto verificare se il solo degrado è in grado di produrre una differenza notevole nell'acustica: Inoltre continuando le ricerche archeologiche e storiche sarebbe auspicabile confermare quelle che adesso si ritengono delle ipotesi plausibili, come la presenza del colonnato nel teatro di Tindari in epoca romana. Per quanto riguarda il riutilizzo dei teatri antichi in generale,è necessario continuare ad agire secondo le indicazioni della Carta di Siracusa, per preservare una testimonianza unica di ciò che è stato un tempo: per unire la conservazione all'utilizzo del bene, vengono installate infatti solitamente strutture temporanee su supporti puntuali, tali da essere appoggiate e fissate sopra al bene in questione senza che questo venga danneggiato, in modo che gli spettatori possano usufruire della struttura senza danneggiare i resti. Inoltre trattandosi di una strutture all'aperto, situate talvolta in luoghi soggetti a inquinamento acustico proveniente dal traffico stradale, sarebbe opportuno se possibile limitare questo tipo di interferenze durante gli spettacoli per godere appieno dell'acustica in una struttura all'aperto, per fare esperienza delle sensazioni sonore e visive, seppur modificate insieme all'architettura, che potevano provare i nostri antenati seduti sulle stesse pietre a fianco delle sedute temporanee da noi utilizzate.

Fig. 7.3.1:Il coro delle furie, Eumenidi (foto di Cooper, D.,)

Bibliografia

Astolfi, A., Bo, E., Aletta, A., Shtrepi, L., *Measurements of Acoustical Parameters in the Ancient Open-Air Theatre of Tyndaris (Sicily, Italy),* Applied Sciences, 2020.

Barbera, G., Critelli, S., Mazzoleni, P., Petrology and Geochemistry of Cretaceous Sedimentary Rocks of the Monte Soro Unit (Sicily, Italy):Constraints on Weathering, Diagenesis, and Provenance, Journal of Geology. 119.10.1086/657340, 2011.

Barbera, G., Mazzoleni, P., Critelli, S., Pappalardo, a., Lo, A., & Cirrincione, R., Provenance of shales and sedimentary history of the Monte Soro Unit, Sicily, Periodico di Mineralogia. 75. 313-330, 2006.

Barkas, N., Ancient Greek Theaters: Current Operation vs Contemporary Noise, Environment, Euronoise, Creta, 2018

Barkas, N., *The Contribution of the Stage Design to the Acoustics of Ancient Greek Theatres, Xanthi, 2019.*

Ballou G.M., Handbook for Sound Engineers, Burlington, Focal Press, 2008.

Berardi, U., Iannace, G., T*he acoustic of Roman theatres in Southern Italy and some reflections for their modern uses,* Applied Acoustics, 2020.

Bernabò Brea, L., *Due secoli di studi, scavi e restauri del teatro greco di Tindari,* in Rivista dell'Istituto nazionale d'Archeologia e Storia dell'Arte. Nuova serie, XIII-XIV. Roma, 1964-1965.

Bo, E., Kostara-Kostantinou, E., Lepore, F., Astolfi, A., Shtrepi, L., Puglisi, G. E.,. . . Mangano, B., Acoustical characterization of the ancient theatre of Tyndaris: evaluation and proposals for its reuse, 23rd International Congress on Sound & Vibration (ICVS23), Athens, 2016.

Bo, E., Archaeoacoustics, from antiquity to nowadays Contemporary use of the classical ancient architecture for performing arts, Doctoral Dissertation, Politecnico di Torino, 2017.

Canac, F., L'acoustique des theatres antiques: ses enseignements. Centre National de la Recherche Scientifique, s.l., 1967

Caputo, G., *Il degrado delle strutture in legno*, Facoltà di Ingegneria, Corso di Laurea in Ingegneria Edile, rel. ing. Luca Venturi, Alma Mater Studiorum - Università di Bologna, Bologna , 2016.

Cattaneo, L., Anatomia del sistema nervoso centrale e periferico, Moduzzi, II edizione, Bologna, 1989.

Cellai, G., Secchi, S., Fondamenti di acustica, Università degli Studi di Firenze, Dipartimento di Processi e Metodi della Produzione edilizia, CLU, Firenze, 2000.

Cotecchia, V., Alaimo, R., Farenga, T., Giarusso, R., Rana, S., Semeraro, M., Giorgianni, A., Specchio, V., Schema di piano dei materiali lapidei di pregio, Volume 5B, R.T.I.GEO - CEPA, Ente minerario siciliano, Regione Sicilia, s.d.

Declercq, N., Dekeyser, C., The acoustics of the hellenistic theatre of epidaurus: described by Vitruvius, Acoustics of Ancient Theatres Conference, Patrasso, 2011.

Doménech Carb, M.T., Vidal, F. J., Benlloch Castellò, A., Fantini, F., *Athena: management plan and ancient theatre network inside Mediterranean basin,* Instituto Universitario de Restauración del Patrimonio de la Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, 2011.

Doménech Carb, M.T., Vidal, F. J., Benlloch Castellò, A., Fantini, F., Insa Calabuig, A., *Athena project: guidelines for the substainable use of ancient theatres,* Instituto Universitario de Restauración del Patrimonio de la Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, 2012.

Dragonetti, R., Romano, R.A., Ianniello, C., *The Acoustics of two ancient Roman theatres in Pompeii,* 19th International congress on acoustics, Madrid, 2007.

Drioli, C., Orio, N., Elementi di Acustica e Psicoacustica, Università di Padova, 1999.

Farina, A, Galaverna, P., Giabbani, M., *Il processo di auralizzazione: metodologia ed esemplificazione,* Dipartimento di Ingegneria Industriale, Università di Parma, Parma, 1998.

Farnetani, A., *Investi, gation on the Acoustics of Ancient Theatresby means of Modern Technologies,* tesi di dottorato di ricerca in scienze dell'ingegneria, rel. Roberto Pompoli, Università degli Studi di Ferrara, Ferrara, 2005.

Farnetani, A., Prodi, N., Pompoli, R., *On the acoustics of ancient Greek and Roman theaters,* Dipartimento di Ingegneria, Università degli Studi di Ferrara, Ferrara, 2008.

Fasolo, M., Tyndaris e il suo territorio, Volume I, Roma, MediaGEO, 2013.

Giberti, M., Compendio di anatomia per progettisti, Quodlibet Studio, Macerata, 2014.

Goussios, C., Chourmouziadou, K., Tsinikas, N, Kalliris, G., *The roman odeion of Nikopolis: observations of architectural elements affecting its acoustics. measurement & calculation of acoustic indices,* The Acoustics of Ancient Theatres Conference, Patrasso, 2011.

Iannace, G., Trematerra, A., *The rediscovery of Benevento Roman Theatre Acoustics,* Journal of Cultural Heritage, 2013

Jiang, J., Vocal fold physiology, Otolaryngologic Clinics of North America, Pubmed, 2000.

Kreeb, M., Ancient Theatres: Historical and Architectural Development, Acoustics of Ancient Theatres Conference, Patrasso, 2011.

Lepore, F., Kostara-Knstantinou, E., Ancient theatres, machines designed for listening, a scenary proposal for the optimization of the passive acoustics for the ancient theatre of Tyndaris, tesi di laurea magistrale in Architettura, Costruzione, Città, rel. Astolfi, A., Barkas,N., Bo, E., Politecnico di Torino, Torino, 2015.

Long, M., Architectural Acoustics, Elsevier, sl., 2006.

Løvstad, A., Evaluation of objective echo criteria, Norwegian University of Science and Technology, Department of Telecommunications, s.l., 2003.

Mazzeo, A. e Biondo, C., La Rinascita Del Teatro Antico, Roma, Dedalo, 2001.

Müller, G., Möser, M., (a cura di), Handbook of Engineering Acoustics, s.l., of a roman theatre in Hispania: Colonia Clunia Sulpicia., The Acoustics of Ancient Theatres Conference, Patrasso, 2011.
Parco Archeologico di Tindari, *Relazione tecnica, Lavori Di Adeguamento Del Teatro Greco Di Tindari e Valorizzazione Integrata Dell'area Archeologica,* 2020.
Pettorino, M., *Fonetica acustica, nozioni e termini di*, in Enciclopedia dell'Italiano, Treccani, 2010
Rindel, J. H.,Nielsen, M.L., The ERATO project and its contribution to our understanding of the acoustics of ancient Greek and Roman theatres ERATO Project Symposium, Proceedings, 2006.
Rindel J., Gade, AC., Lisa, M., *The virtual reconstruction of the ancient Roman concert hall in Aphrodisias, Turkey,* Researchgate, 2006
Rindel, J., *Echo problems in ancient theatres and a comment to the 'sounding vessels' described by Vitruvius,* The Acoustics of Ancient Theatres Conference, Patrasso, 2011.
Rostovtsev, V., *Role of* radiation modification in ore pretreatment. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 262. 012058. 10.1088/1755-1 315/262/1/012058, Novosibirsk, 2019.
Story, B,H., Mechanism of Voice Production, University of Arizona, 2015
Sanchez Rivera, J., Ortega, G., De La Iglesia Santamaría, M., Acoustic study Springer Science & Business Media, 2013.
Symposium, Proceedings, DTU Library, . Lyngby, 2006.
Tignano, G., Ravesi, M., Casamento, C., Proposta di perimetrazione del parco archeologico di Tyndaris, Soprintendenza dei Beni Culturali e Ambientali, Messina, 2018.
Vitruvius, P., Dell'Architettura Libri Dieci, Volume V, a cura di Amati, C., Milano, Giacomo Pirola, 1829.
Yang, HS., Outdoor noise control by natural/sustainable materials in urban areas, University of Sheffield, 2013.
Yu, B., Ma, H., Kang, J., A Hybrid Model for Investigating the Effect of Scattering from Building Façade on Sound Propagation in Street Canyons, Applied Sciences, 2019, 9(14), 2803.

http://mariobon.com/Glossario/___Misure/Misure_Soggettive.htm
https://www.treccani.it/
https://www.ancient.eu/Greek_Theatre/
https://www.whitman.edu/theatre/theatretour
http://www.regione.sicilia.it/beniculturali/dirbenicult/dvd_regione/centrorestauro/news/la_carta_di_siracusa/
http://www.regione.sicilia.it/beniculturali/dirbenicult/database/page_musei/pagina_musei.asp?id=46&idsito=48
ISO 3382-1:2009 *Acoustics — Measurement of room acoustic parameters*
https://odeon.dk

Figure

Fig. 1.1.1: http://operart.altervista.org/le-corde-vocali/?doing_wp_cron=1601222719.1238610744476318359375

Fig. 1.1.2, 1.1.3: Long, M., Architectural Acoustics, Elsevier, sl., 2006.

Fig. 1.2.1: Pappalardo, U., Teatri greci e romani, Arsenale, Verona, 2007

Fig. 2.1.2: Drioli, C., Orio, N., Elementi di Acustica e Psicoacustica, Università di Padova, 1999.

Fig.2.1.3: Canac, F., L'acoustique des theatres antiques: ses enseignements. Centre National de la Recherche Scientifique, s.l., 1967

Fig. 2.1.4, 2.1.5, 2.1.6, 2.1.7, 2.1.8, 2.1.9, 5.1.1, 5.2.1, 5.2.2, 5.2.3, 5.2.4, 5.2.5, 6.3.20, Bo, E., *Archaeoacoustics, from antiquity to nowadays Contemporary use of the classical ancient architecture for performing arts,* Doctoral Dissertation, Politecnico di Torino, 2017.

Fig. 3.4.1: https://www.whitman.edu/theatre/theatretour/home.htm

Fig. 4.1.1: Parco Archeologico di Tindari, *Piante e Planimetrie,* elaborazione grafica dell'autrice.

Fig. 4.1.2: Houel, JP., Voyage pittoresque des isles de Sicile, de Malta et de Lipari, vol. I., tavv 57, 58, Parigi, 1782.

Fig. 4.1.3: Brogi Giacomo, *Resti del teatro greco romano,* Archivi Alinari-archivio Brogi, Firenze, 1920.

Fig. 4.1.4, 4.1.5, 4.1.6, 4.1.7, 4.1.12, 4.1.13, 4.1.14, 6.1.2, 6.1.3: Bernabò Brea Luigi, *Due secoli di studi, scavi e restauri del teatro greco di Tindari,* in Rivista dell'Istituto nazionale d'Archeologia e Storia dell'Arte, nuova serie, XIII-XIV. Roma, 1964-1965.

Fig. 4.1.8, 4.2.1, 4.2.2, 4.2.3, 6.1.1: foto di Basilio Mangano, Tindari, 2015.

Fig. 4.1.10 Mazzeo, A., La rinascita del teatro antico, Editrice Dedalo, Roma, 2001.

Fig. 5.2.6, 5.2.7, 5.2.8, 5.2.9, 5.2.10, 5.3.1, 5.3.2, 5.3.3, 5.3.4, 5.3.5,Lepore, F., Kostara-Knstantinou, E., Ancient theatres, machines designed for listening, a scenary proposal for the optimization of the passive acoustics for the ancient theatre of Tyndaris, tesi di laurea magistrale in Architettura, Costruzione, Città, rel. Astolfi, A., Barkas,N., Bo, E., Politecnico di Torino, Torino, 2015.

Fig. 6.1.5, 6.1.6, 6.1.7, 6.1.8, 6.1.9, 6.1.11, 6.0.20: Dati di Astolfi, A., Bo, E., Aletta, A., Shtrepi, L., *Measurements of Acoustical Parameters in the Ancient Open-Air Theatre of Tyndaris (Sicily, Italy),* Applied Sciences, 2020, elaborazione grafica dell'autrice.

Fig. 6.1.10: http://www.indiegenofest.it/

Fig. 6.3.1: Rindel J., Gade, AC., Lisa, M., *The virtual reconstruction of the ancient Roman concert hall in Aphrodisias, Turkey,* Researchgate, 2006.

Fig. 6.3.2, 6.3.3, 6.3.11: Iannace, G., Trematerra, A., *The rediscovery of Benevento Roman Theatre Acoustics,* Journal of Cultural Heritage, 2013.

Fig: 6.3.4, 6.3.9, 6.3.11, 6.4.1, 6.4.6, 6.4.7, 6.4.12**:** Farnetani, A., *Investigation on the Acoustics of Ancient Theatresby means of Modern Technologies,* tesi di dottorato di ricerca in scienze dell'ingegneria, rel. Roberto Pompoli, Università degli Studi di Ferrara, Ferrara, 2005.

Fig. 6.3.5: https://www.whitman.edu/theatre/theatretour/aspendus/aspendus.htm
Fig. 6.3.6: https://www.comune.cassino.fr.it/per-i-visitatori/teatro-romano/
Fig. 6.3.7: https://www.sitiarcheologiciditalia.it/parco-archeologico-di-posillipo/
Fig. 6.3.8: http://walkaboutagain.com/travel-gallery/middle-east-gallery/jordan-gallery/roman-theatre-jerash/
Fig.6.3.10:https://www.italiadascoprire.net/sicilia/provincia-di-messina/comune-taormina/teatro-greco-taormina.html#prettyPhoto
Fig. 6.3.12: https://www.scavidipompei.net/teatro-di-pompei-visitare/
Fig.6.3.18:https://www.canalesicilia.it/tyndaris-augustea-un-emozionante-viaggio-nellantica-tindari/
Fig. 6.3.19: Foto di Michele Ponzio, Il teatro di Siracusa-aerea, Wikimedia Commons, 2006
Fig. 6.3.21, 6.3.22: https://www.whitman.edu/theatre/theatretour/pompeii.theatre/pompeii.htm
Fig 6.3.23, 6.3.24: Dati di Bo, E., 2017, e Dragonetti, R.,et al, 2007, elaborazione grafica dell'autrice.
Fig 6.3.25: http://www.teleradiosciacca.it/la-regione-cofinaziera-24-manifestazioni-di-rilevanza-turistica/
Fig. 6.3.26: https://www.whitman.edu/theatre/theatretour/tauromenium/tauromenium.htm
Fig. 6.3.27, 6.3.28: Berardi, U., Iannace, G., *The acoustic of Roman theatres in Southern Italy and some reflections for their modern uses,* Applied Acoustics, 2020.
Fig. 6.3.29: *https://turkeyanatolia.com/aspendos_ancieny_city/*
Fig. 6.3.30: Mallampati, HB., Demirer, Ü., *Architecture, entertainment and civic life: the theater at Pisidian Antioch,* nel libro: Building a new Rome: The Imperial colony of Pisidian Antioch, Kelsey Museum of Archaeology, sl., 2011.
Fig.6.3.31: http://aphrodisias.classics.ox.ac.uk/theatre.html
Fig. 6.3.32: https://universes.art/en/art-destinations/jordan/jerash/tour-1/south-theatre-1
Fig. 6.3.33: https://www.comune.cassino.fr.it/per-i-visitatori/teatro-romano/
Fig. 6.3.34: https://www.sitiarcheologiciditalia.it/parco-archeologico-di-posillipo/
*Fig. 6.3.35, 6.3.36 Dati di Bo, E.,2017,*Berardi, U., Iannace, G., 2020*,* Farnetani, A., 2005, elaborazione grefica dell'autrice.
Fig. 6.3.37, 6.3.38: Dati di *Dati di Bo, E.,2017,*Berardi, U., Iannace, G., 2020*,* Farnetani, A., 2005, Dragonetti, R.,et al, 2007.
Fig. 6.3.39: Dati di Bo, E., 2017, e Farnetani, A., 2005, elaborazione grafica dell'autrice.
Fig. 6.4.13: Berardi, U., Iannace, G., *The acoustic of Roman theatres in Southern Italy and some reflections for their modern uses,* Applied Acoustics, 2020
Fig. 6.4.15, 6.4.16, 6.4.17: Dati di Farnetani, A., 2005, e Berardi, U., Iannace, G. 2020.
Fig. 6.4.3, 6.4.4, 6.4.9, 6.4.10, 6.4.11: Dati di Farnetani, A., 2005
Fig. 6.5.1, 6.5.2, 6.5.3, 6.5.4, 6.5.5, Rindel, J. H.,Nielsen, M.L., The ERATO project and its contribution to our understanding of the acoustics of ancient Greek and Roman theatres, ERATO Project Symposium, Proceedings, 2006.
Fig. 6.5.7, 6.5.8, 6.5.9, : Dati di Rindel, J. H.,Nielsen, M.L., 2006.
Fig. 7.3.1: Cooper, D., *The Oresteia,* Photostage, 2017.

Tabelle

Tab. 3.1.1: Tab. 3.1.2 : Rindel, J. H.,Nielsen, M.L., The ERATO project and its contribution to our understandingof the acoustics of ancient Greek and Roman theatres, ERATO
Project Symposium, Proceedings, DTU Library, . Lyngby, 2006.

Tab. 3.3.1: Barkas, N., The Contribution of the Stage Design to the Acoustics of Ancient Greek Theatres, Rivista Acoustics, Xanthi, 2019.

Tab 3.3.2 AA.VV, *Confronto tra i teatri antichi già trattati per l'analisi dell'acustica,* elaborazione grafica dell'autrice.

Tab. 3.3.0: ISO 3382-1:2009 *Acoustics — Measurement of room acoustic parameters*

Tab. 4.1.1: Petrucci G., *Elenco dei terremoti con magnitudo superiore a 5.5 avvenuti in Italia*, da 6aprile.it, 2012

Tab. 4.2.1: CNR, I*struzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo delle Strutture di Legno,2009.*

Tab. 5.3.1, 5.3.3, 6.0.3, 6.1.6: Bo, E., Archaeoacoustics, from antiquity to nowadays Contemporaryuse of the classical ancient architecture for performing arts, Doctoral Dissertation, Politecnico di Torino, 2017.

Tab. 5.3.2, 5.3.4, 5.3.5, 6.0.2: Lepore, F., Kostara-Knstantinou, E., Ancient theatres, machines designed for listening, a scenary proposal for the optimization of the passive acoustics for the ancient theatre of Tyndaris, tesi di laurea magistrale in Architettura, Costruzione, Città, rel. Astolfi, A., Barkas,N., Bo, E., Politecnico di Torino, Torino, 2015.

Tab. 6.1.3: Goussios, C., Chourmouziadou, K., Tsinikas, N, Kalliris, G., *The roman odeion of Nikopolis: observations of architectural elements affecting its acoustics. measurement & calculation of acoustic indices,* The Acoustics of Ancient Theatres Conference, Patrasso, 2011.

Tab.6.1.4: Yang, HS., Outdoor noise control by natural/sustainable materials in urban areas, University of Sheffield, 2013.

Tab. 6.3.2: *Dati di Bo, E.*, 2017, e Farnetani, A., 2005, elaborazione grafica dell'autrice

Tab. 6.1.7, 6.0.13: Dati di Astolfi, A., Bo, E., Aletta, A., Shtrepi, L., *Measurements of Acoustical Parameters in the Ancient Open-Air Theatre of Tyndaris (Sicily, Italy),* Applied Sciences, 2020,

Tab. 6.4.1, 6.4.2: Dati di Faretani, A., 2005.

Tab 6.4.3: Dati di Farnetani, A., 2005, Berardi, U., Iannace, G, 2020.