

Misure acustiche presso il Teatro greco di Siracusa e confronto con modello numerico

Andrea Cerniglia^{a*} | Elisa Amato^b | Gelsomina Di Feo^a | Roberto Bettari^c | Enrica De Melio^d

^a ACCON Italia Srl, Via Trento, 11 A, 27010 San Genesio ed Uniti (PV)

^b Acustica Ambientale, Via della Scala Greca, 96100 Siracusa

^c Studio Bettari, Via IV Novembre, 73, 25013 Carpenedolo (BS)

^d Vaggio a Sudest, 96100 Siracusa

* Autore di riferimento:
andrea.cerniglia@acon.it

Ricevuto: 2/11/2022

Accettato: 15/2/2023

DOI: 10.3280/ria1-2023oa14860

ISSN: 0393-1110

ISSNe: 2385-2615

L'articolo illustra i primi risultati relativi ad una campagna di misure acustiche effettuate all'interno del Teatro Greco di Siracusa, e il confronto di quanto ottenuto sperimentalmente con i risultati di una simulazione numerica effettuata con codice di calcolo. Lo studio ha evidenziato le ottime caratteristiche acustiche del teatro, la sostanziale rispondenza dello STI misurato con lo STI calcolato, e una sovrastima del C_{50} calcolato. Inoltre, i rilievi sperimentali hanno evidenziato un comportamento inatteso presso un'area specifica del teatro, che sarà successivamente indagato.

Parole chiave: Siracusa, MLS, STI , C_{50} , Model

Acoustic measurements in Siracusa Greek Theatre, and comparison with numerical model

The article presents first results of some acoustic measurement inside the Greek Theatre of Siracusa, and their comparison with computer simulations. The study shows the great acoustics of the Theatre and the consistency of simulated STI values with the measured ones. In addition, the comparison of simulated C_{50} shows an overestimation of the parameter, especially at high frequencies. Moreover, on-field measurements showed some unexpected behaviour in two positions, which will be investigated.

Keywords: Siracusa, MLS, STI , C_{50} , Model

1 | Introduzione

Lo straordinario Teatro Greco di Siracusa, si presenta, oggi, come risultato dell'ampliamento e del rifacimento del III sec. A.C voluti dal tiranno Ierone II. Quanto giunto sino a noi, purtroppo, si riduce quasi esclusivamente a parte della cavea tagliata nella roccia calcarea del fianco meridionale del colle Temenite, un rilievo poco elevato sul livello del mare, che fronteggia il Porto Grande e dal quale si scorgono in lontananza le punte fra loro opposte di Ortigia e del Plemmirio. La cavea, con un diametro in origine di oltre 138 metri, è una delle più grandi del mondo greco. Del tutto scomparsi sono la parte più elevata della cavea e l'edificio scenico, perché i blocchi di pietra calcarea di entrambi – gradini per l'una, strutture murarie per il secondo – tra il 1520 ed il 1530 furono asportati e trasferiti in Ortigia per essere reimpiegati nella costruzione delle fortificazioni ordinate dal sovrano spagnolo Carlo V.

Oggi il Teatro, è parte di un importante sito archeologico ed è utilizzato anche sia per rappresentazioni classiche sia per concerti di musica pop e rock.

La figura 1 mostra un'immagine del Teatro ripresa con il drone.

Nel periodo compreso tra l'estate del 2021 e la primavera del 2022 sono state condotte due campagne di misura acustica all'interno del Teatro; durante la prima campagna di rilievi la pietra era ricoperta da panche in legno con sovrapposti cuscini, messe con l'intento di proteggere la pietra durante l'utilizzo estivo del Teatro stesso, mentre durante la seconda



Fig. 1 – Teatro di Siracusa
Siracusa Theatre

campagna di misure la pietra si trovava allo stato naturale. È inoltre prevista una ulteriore campagna di misure che verrà effettuata con tecnica MLS durante una rappresentazione e con il Teatro gremito di spettatori. L'idea alla base dello studio è il confronto tra le tre diverse situazioni rilevate, e le stesse situazioni modellate numericamente.

2 | Campagne di misura

I rilievi, effettuati in assenza di vento, sono stati eseguiti eccitando l'area di interesse per mezzo di un segnale MLS prodotto tra il proscenio e l'orchestra e rilevando la risposta in 26 posizioni distribuite all'interno del Teatro, ognuna posizionata ad un metro di altezza dalla seduta.

Grazie ai segnali acquisiti è stato possibile calcolare la risposta all'impulso per ogni coppia di punti eccitazione-risposta, e calcolare quindi tutti i classici parametri acustici di interesse.

La figura 2 mostra in colore rosso la posizione della sorgente e in colore verde le posizioni dei ricevitori.

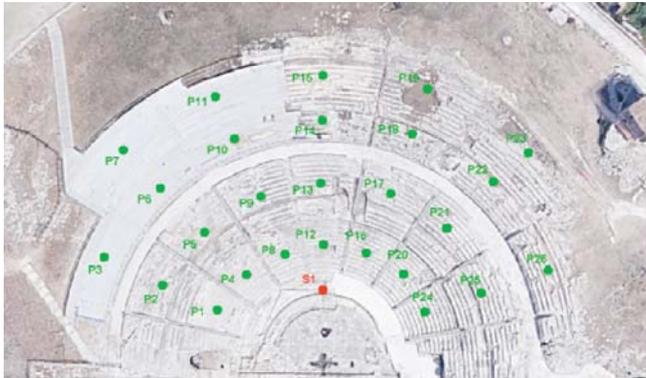


Fig. 2 – Posizioni © 2022 Google
Positions © 2022 Google

La tecnica *MLS*, è stata implementata impiegando una sequenza lunga 262144 punti ed un campionamento di 48 kHz. La risposta all'impulso è stata calcolata tra il segnale proveniente da un microfono posizionato sequenzialmente nelle 26 posizioni di rilievo, ed il segnale di riferimento acquisito per mezzo di un microfono posto a 1 metro dall'altoparlante. Nel prosieguo sono presentati i primi risultati relativi al confronto tra quanto acquisito e quanto simulato, nella configurazione con le panche ed i cuscini, senza pubblico.

3 | Risultati dei rilievi

I paragrafi seguenti mostrano alcuni tra i risultati ottenuti dalle misure in campo. Tali risultati sono presentati sotto forma di mappe ottenute per mezzo di una interpolazione *multiquadratica*.

3.1 | Speech Transmission Index

Dalla risposta all'impulso è stato calcolato lo *Speech Transmission index*. Generalmente lo STI viene espresso come indice complessivo capace di definire con un unico numero la bontà della trasmissione del parlato: quando questo risulta superiore a 0.6 è considerato buono, mentre quando è superiore a 0.75 indica che l'intelligibilità è eccellente. Tale indice è tuttavia la combinazione di analisi effettuate sulle diverse bande di ottava nell'intervallo compreso tra 125 Hz e 8000 Hz; nel caso specifico sono stati riportati i valori di STI relativi ad alcune bande, al fine di meglio identificare quali sono le ottave che maggiormente incidono sul risultato complessivo.

La figura 3 mostra la mappa dello *Speech Transmission Index* relativa alla banda di ottava di 125 Hz. L'immagine rivela un indice piuttosto scarso nella parte in alto a destra dove sono presenti alzate riflettenti, diversamente da quanto accade nella

parte in alto a sinistra dove le sedute in pietra non sono più presenti e lo *STI* presenta valori leggermente più elevati. Nella parte centrale e nella parte inferiore dell'immagine, più vicina al punto di emissione, sono stati rilevati valori di *STI* più alti.

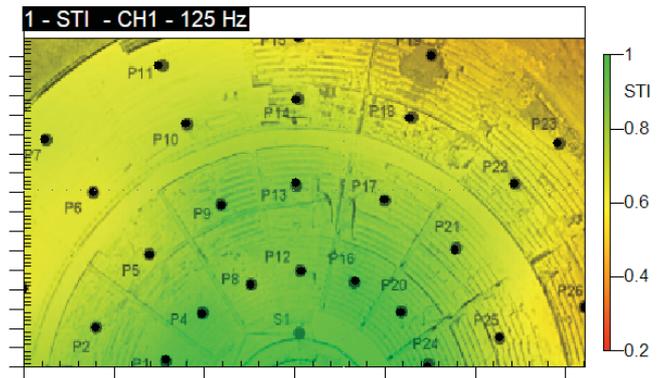


Fig. 3 – STI 125 Hz
STI 125 Hz

Allo stesso modo la figura 4 mostra lo *STI* per la banda di ottava di 250 Hz. Per questa frequenza il comportamento dell'indice si presenta in modo più omogeneo nelle diverse posizioni considerate.

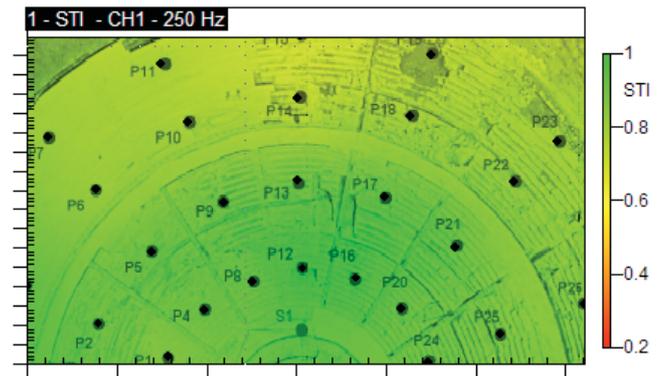


Fig. 4 – STI 250 Hz
STI 250 Hz

Nuovamente, la figura 5 mostra lo *STI* per la banda di ottava di 500 Hz. Anche per questa banda di ottava il comportamento dell'indice mostra omogeneità più marcata.

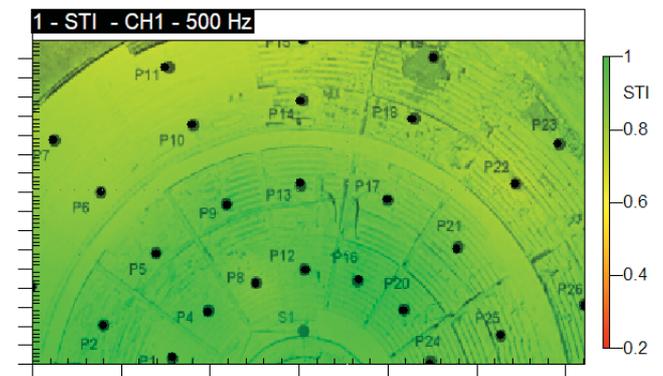


Fig. 5 – STI 500 Hz
STI 500 Hz

La figura 6 infine riporta lo *STI* per la banda di ottava di 1000 Hz. All'aumentare della frequenza l'indice si rivela maggiormente omogeneo. Unica eccezione la posizione P22, che merita un approfondimento non ancora effettuato.

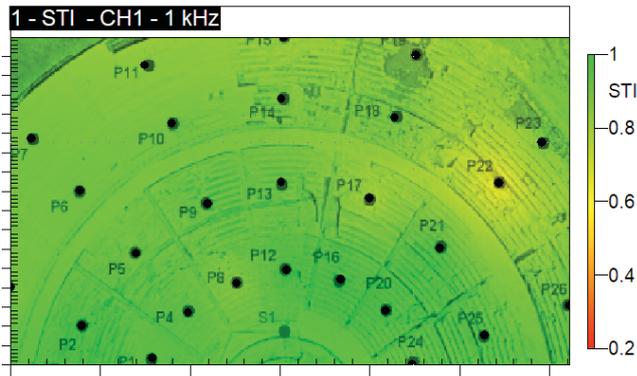


Fig. 6 – STI 1000 Hz
STI 1000 Hz

La figura 7 riporta lo *STI* medio tra tutte le coppie di punti considerati.

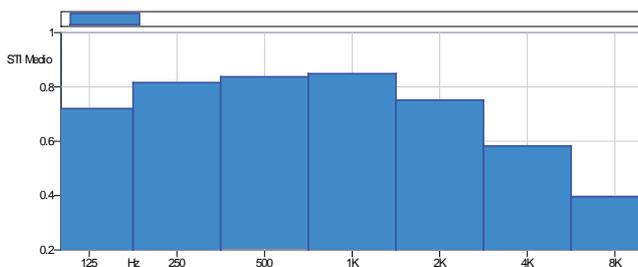


Fig. 7 – STI medio
Averaged STI

Per completezza di informazioni, la tabella 1 riporta la deviazione standard relativa agli *STI* tra le coppie di punti considerati. I risultati ottenuti mostrano le più basse deviazioni standard per le ottave comprese tra 250 Hz e 1000 Hz.

Tab. 1 – Deviazione standard STI

Banda di ottava	Deviazione standard
125	0.13
250	0.08
500	0.08
1000	0.07
2000	0.12
4000	0.14
8000	0.12

3.2 | Indice di chiarezza

Per mezzo della risposta all'impulso è stato possibile calcolare anche l'indice di chiarezza C_{50} . In linea generale un indice di

chiarezza superiore a 3 è considerato buono per la comunicazione vocale.

La figura 8 mostra l'indice C_{50} per la banda di 125 Hz. L'immagine mostra in modo inequivocabile, problemi per le posizioni più lontane dall'orchestra; tale comportamento è maggiormente accentuato nella parte in alto a sinistra, dove peraltro anche lo *STI* evidenziava problemi analoghi.

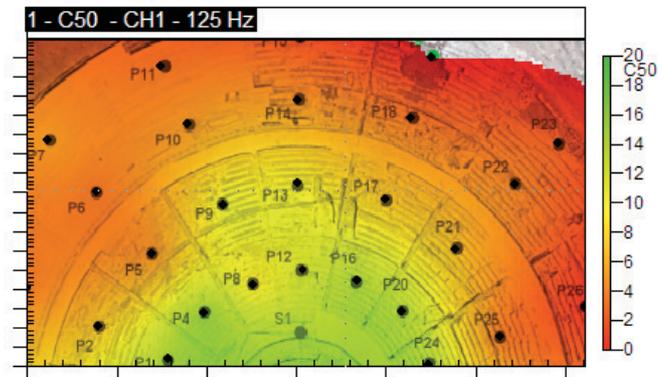
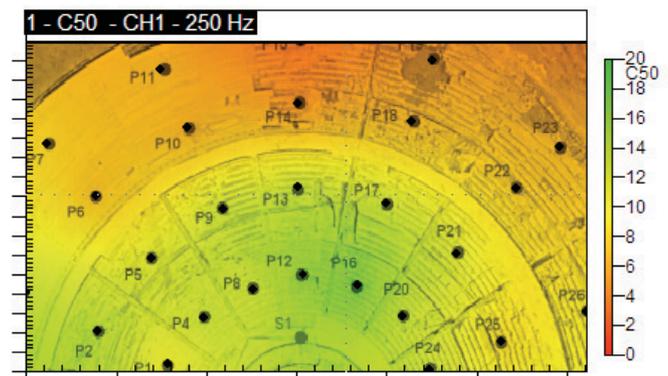


Fig. 8 – C_{50} 125 Hz
 C_{50} 125 Hz

Le figure 9 e 10 mostrano rispettivamente le mappe dell'indice C_{50} per le bande di ottava di 250 Hz e 500 Hz.



Fi. 9 – C_{50} 250 Hz
 C_{50} 250 Hz

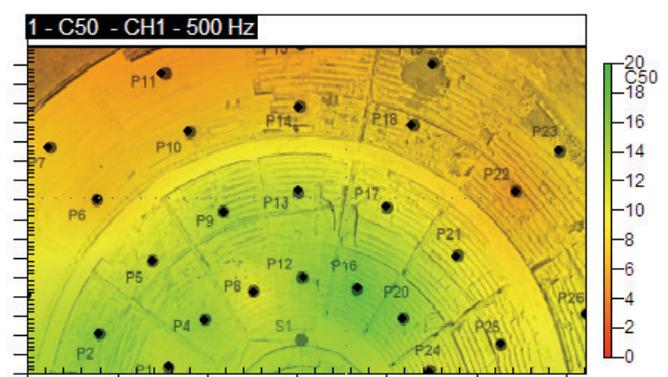


Fig. 10 – C_{50} 500 Hz
 C_{50} 500 Hz

La figura 11 è relativa alla mappa C_{50} riferita all'ottava di 1000 Hz. Nuovamente appare un fenomeno singolare nella postazione P22, come accaduto per la mappa relativa allo STI. In questo caso anche la postazione P21 mostra un indice inatteso.

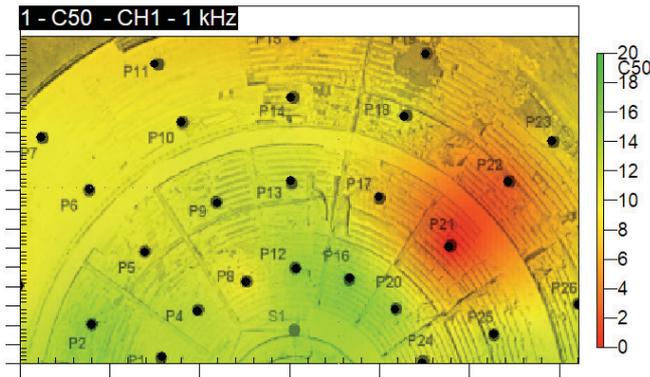


Fig. 11 – C_{50} 1000 Hz
 C_{50} 1000 Hz

La figura 12 riporta l'indice C_{50} medio tra tutte le coppe di punti considerati.

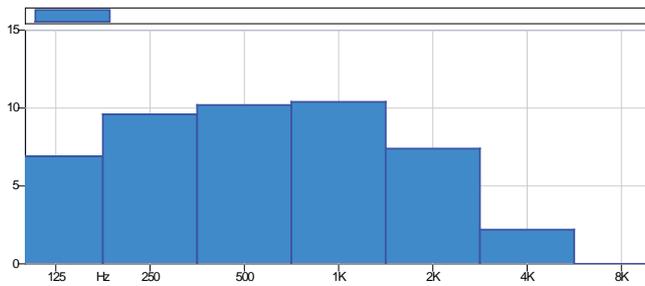


Fig. 12 – C_{50} medio
Averaged C_{50}

La tabella 2 riporta la deviazione standard relativa agli indici C_{50} tra le coppe di punti considerati. I valori più bassi di σ si presentano tra 250 Hz e 1 kHz e per 8kHz.

Tab. 2 – Deviazione standard C_{50}

Banda di ottava	Deviazione standard
125	4.3
250	3.0
500	3.1
1000	2.5
2000	3.8
4000	4.2
8000	3.1

4 | Modello numerico

Parallelamente all'esecuzione dei rilievi è stato realizzato un modello numerico semplificato del teatro, per mezzo del codice di calcolo Ramsete. La figura 13 mostra il modello 3D, comprensivo dell'altoparlante e dei 26 ricevitori considerati. In ag-

giunta a tali ricevitori, con l'intento di ottenere mappe più definite, sono stati inclusi altri ricevitori in posizione intermedie.

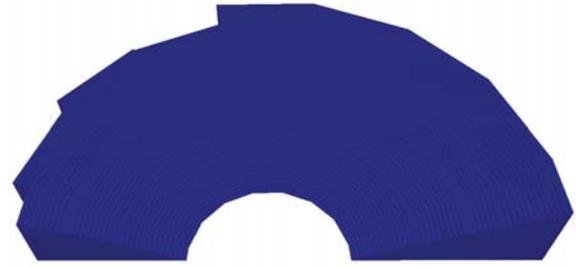


Fig. 13 – Modello numerico semplificato
Simplified numerical model

Grazie all'impegno del modello di calcolo è stato possibile calcolare la risposta all'impulso per ogni coppia sorgente-ricevitore, e da questa è stato possibile calcolare tutti gli altri parametri misurati sperimentalmente in campo. La figura 14 mostra un esempio di risposta all'impulso calcolata con il codice Ramsete alla frequenza di 125 Hz. Dalla risposta all'impulso è possibile calcolare altri parametri quali ad esempio il tempo di riverberazione, EDT, per ogni banda di interesse. Inoltre, la disponibilità della risposta all'impulso consente di eseguire la convoluzione di questa con un file audio anecoico, e conseguentemente consente l'auralizzazione.

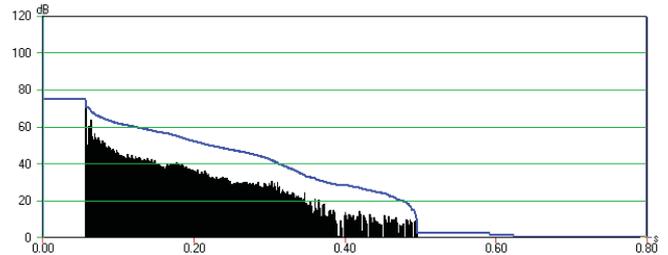


Fig. 14 – Risposta all'impulso
Impulse response function

4.1 | Mappatura acustica

La figura 15 mostra la mappa sonora nel teatro espressa in dBA, calcolata dal modello numerico e relativa ad un altoparlante omnidirezionale posizionato tra il proscenio e l'orchestra, con potenza sonora pari a 110 dB.

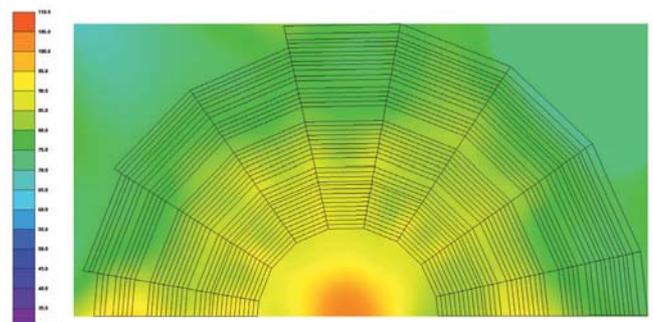


Fig. 15 – Mappa dBA con sorgente L_w 110 dB
dBA map ref to L_w 110dB

4.2 | Confronto STI

La figura 16 mostra la mappa relativa allo STI per la banda di ottava di 125 Hz. L'ordine dei colori è invertito rispetto alle mappe derivanti da rilievi sperimentali; di conseguenza le due mappe, sperimentale e simulata mostrano distribuzioni sostanzialmente sovrapponibili. Più in dettaglio, è possibile individuare bassi valori di STI nella parte in alto a destra e parzialmente nella parte in alto a sinistra.

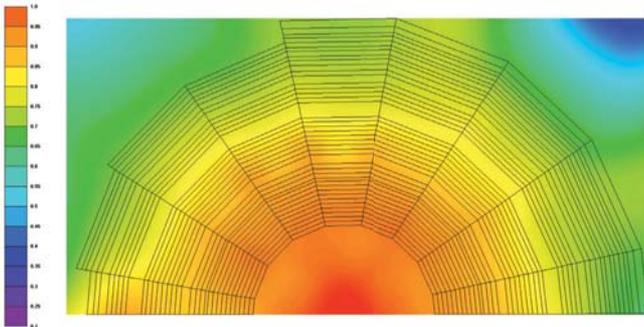


Fig. 16 – Mappa simulata STI 125 Hz
Computed STI map @ 125 Hz

La figura 17 mostra la mappa relativa allo STI per la banda di ottava di 250 Hz. Anche in questo caso l'ordine dei colori è invertito rispetto alle mappe sperimentali; di conseguenza la mappa simulata mostra un comportamento analogo alla mappa sperimentale, evidenziando una distribuzione più omogenea rispetto alla frequenza di 125 Hz.

Distribuzioni e confronti analoghi con le mappe sperimentali sono stati ottenuti anche per le mappe a 500 Hz e a 1000 Hz.

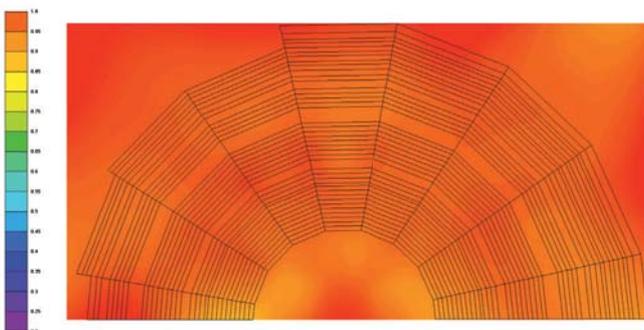


Fig. 17 – Mappa simulata STI 250 Hz
Computed STI map @ 250 Hz

4.3 | Confronto C_{50}

Il confronto tra i valori dell'indice di chiarezza C_{50} sperimentale con i medesimi valori simulati, mostra una sovrastima di questi ultimi. La tabella 3 riporta i valori medi misurati, quelli calcolati e la differenza tra i precedenti.

La tabella 3 mostra differenze più importanti alle frequenze più alte. La ragione di tale comportamento è in fase di studio.

Tab. 3 – Confronto misura-simulazione C_{50}

Banda di ottava	Misura	Simulazione	Differenza
125	6.9	12.9	6.0
250	9.6	13.0	3.4
500	10.2	14.0	3.8
1000	10.4	16.0	5.6
2000	7.4	17.9	10.5
4000	2.2	19.3	17.1
8000	0	20.7	20.7

4.4 | Ulteriori simulazioni

In aggiunta alle simulazioni effettuate con il codice Ramsete, sono state effettuate parallele simulazioni con il modello Odeon. Non si riportano per brevità le tabelle comparative per i diversi parametri, che a meno di piccoli scarti, mostrano comunque valori sostanzialmente confrontabili. Si riportano invece in figura 18 le due sezioni verticali relative alla propagazione dell'energia sonora nel teatro per la frequenza di 500 Hz; in colore verde le riflessioni del primo ordine, e in colore marrone quelle del secondo ordine.

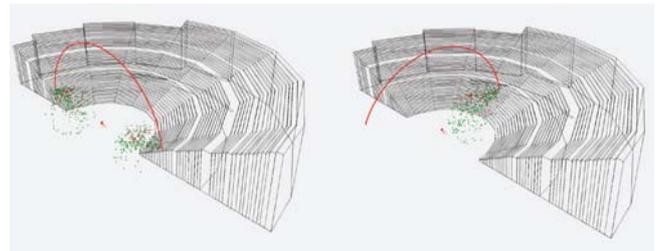


Fig. 18 – Propagaz. vert. con Odeon 500 Hz
Odeon vert. propagation 500 Hz

La figura 19 mostra invece la propagazione effettuata con il medesimo codice di calcolo, riferita al piano orizzontale. Nuovamente in colore verde le riflessioni del primo ordine ed in colore marrone le riflessioni del secondo.

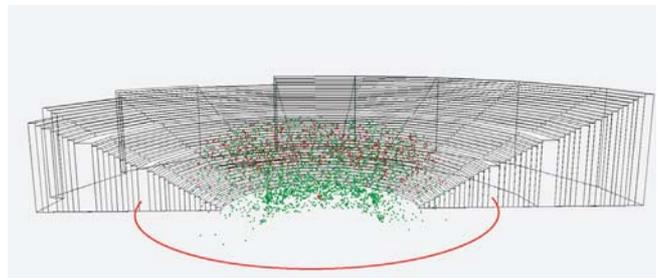


Fig. 19 – Propagaz. vert. con Odeon 500 Hz
Odeon vert. propagation 500 Hz

5 | Conclusioni

I rilievi effettuati hanno mostrato che il Teatro Greco di Siracusa presenta un'ottima acustica. Il confronto tra i dati sperimentali e le simulazioni a calcolatore ha evidenziato una buo-

na correlazione per quanto riguarda lo *Speech Transmission Index* e una sovrastima, in particolare alle alte frequenze, per quanto riguarda l'indice C_{50} . Un ulteriore elemento che necessita approfondimento è relativo al comportamento inatteso per quanto riguarda l'area interessata dalle postazioni P21 e P22 che, in assenza di evidenze geometriche o di peculiarità dei materiali presenti, non trova evidentemente riscontro nei modelli a calcolatore.

Conclusions

The carried-out surveys have shown that the Greek Theater of Syracuse has excellent acoustics. The comparison between experimental data and computer simulations showed a good correlation of the Speech Transmission Index and an overestimation, particularly at high frequencies, of the C_{50} index. An element that needs further study is related to the unexpected behavior with regard to the area affected by the P21 and P22 stations which, in the absence of geometric evidence or peculiarities of the materials present, is evidently not reflected in the computer models.