



Rivista
Italiana di
Acustica

Semestrale di diffusione scientifica e tecnica

v. 47, n. 1/2023
gennaio-giugno

FrancoAngeli 

Direttore responsabile (Editor in Chief)

Eleonora Carletti
Istituto di Scienze e Tecnologie per l'Energia
e la Mobilità Sostenibili (STEMS)
Consiglio Nazionale delle Ricerche
Sede di Ferrara, Via Canal Bianco, 28, 44124 Ferrara
e-mail: eleonora.carletti@stems.cnr.it

Responsabile di redazione (Editorial Manager)

Francesco Pompoli
Dipartimento di Ingegneria
Università degli Studi di Ferrara
Via Saragat, 1, 44121 Ferrara
e-mail: francesco.pompoli@unife.it

Vice-responsabile di redazione (Deputy Editorial Manager)

Louena Shtrepi
Department of Energy, DENERG
Politecnico di Torino
Corso Duca degli Abruzzi, 24, 10129 Torino
e-mail: louena.shtrepi@polito.it

Comitato di redazione (Editorial Committee)

Umberto Berardi, uberardi@ryerson.ca
Davide Borelli, davide.borelli@unige.it
Gianpiero Evola, gevola@unict.it
Claudia Guattari, claudia.guattari@uniroma3.it
Gaetano Licitra, tanosergio0@gmail.com
Massimiliano Masullo, massimiliano.masullo@unicampania.it
Edoardo Piana, edoardo.piana@unibs.it
Francesco Pompoli, francesco.pompoli@unife.it
Chiara Rubino, chiara.rubino@poliba.it
Louena Shtrepi, louena.shtrepi@polito.it
Simone Torresin, simone.torresin@unitn.it

Contatto e-mail della RIA

ria@acustica-aia.it

La rivista utilizza una procedura di referaggio doppiamente cieco (double blind peer review process) in cui i revisori sono scelti in base alla specifica competenza e usa anche la procedura degli articoli su invito.

The journal uses a double blind peer review process in which reviewers are chosen on the basis of specific expertise.

The journal also uses the invited paper procedure.



Il presente volume è pubblicato in open access, ossia il file dell'intero lavoro è liberamente scaricabile dalla piattaforma **FrancoAngeli Open Access** (<http://bit.ly/francoangeli-oa>).

FrancoAngeli Open Access è la piattaforma per pubblicare articoli e monografie, rispettando gli standard etici e qualitativi e la messa a disposizione dei contenuti ad accesso aperto. Oltre a garantire il deposito nei maggiori archivi e repository internazionali OA, la sua integrazione con tutto il ricco catalogo di riviste e collane FrancoAngeli ne massimizza la visibilità e favorisce la facilità di ricerca per l'utente e la possibilità di impatto per l'autore.

Per saperne di più:

http://www.francoangeli.it/come_pubblicare/pubblicare_19.asp



Rivista
Italiana di
Acustica

Semestrale di diffusione scientifica e tecnica

v. 47, n. 1/2023
gennaio-giugno

Autorizzazione n. 17488/1978 del Tribunale di Roma –
Direttore responsabile: Eleonora Carletti – Semestrale
Poste Italiane Spa – Sped. in abb. post. – D.L. 353/2003
(conv. in L. 27/02/2004 n. 46) art. 1, comma 1, DCB Milano
Copyright © 2023 by Franco Angeli s.r.l.

L'opera, comprese tutte le sue parti, è tutelata dalla legge sul diritto
d'autore ed è pubblicata con licenza *Creative Commons*
Attribuzione-Non Commerciale-Non opere derivate 4.0 Internazionale
(CC-BY-NC-ND 4.0).

L'utente, nel momento in cui effettua il download dell'opera, accetta
tutte le condizioni della licenza d'uso dell'opera previste e comunicate
sul sito
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.it>

v. 47, I semestre 2023

Indice

Editoriale/Editorial

- 7 **Special issue from the Symposium on the acoustics of ancient theatres**
Arianna Astolfi, Patrizio Fausti, John Mourjopoulos

Contributi invitati/Invited contributions

- 9 **Theatres from roman age to renaissance: a short survey on the meaning of reverberation time measurements**
Alessandro Cocchi
- 13 **Conservation, transformation, and enhancement of classical theatres and amphitheatres**
Emanuele Romeo, Emanuele Morezzi, Riccardo Rudiero
- 21 **The function of the First Ancient Theatre of Larissa within the soundscape of the contemporary urban fabric**
Kalliopi Chourmouziadou
- 27 **Preserving and managing the sonic heritage of the performative spaces of the past**
Angela Bellia
- 33 **La voce negli antichi spazi**
Marco Francini

Articoli scientifici/Scientific papers

- 39 **Simulazione acustica di spazi antichi: problematiche e soluzioni**
Francesco Martellotta
- 47 **AURA project: enjoyment of the auralisation experience by different target groups**
Chiara Bartalucci, Raffaella Bellomini, Lucia Busa, Paola Pulella
- 55 **The restoration of the Theatre of Arts Academy in Tirana – Acoustic analysis and design of the new Orchestra pit**
Simone Secchi, Veronica Amodeo, Fabio Capanni, Riccardo Renzi, Lamberto Tronchin

Note tecniche/Technical notes

- 63 **Misure acustiche presso il Teatro greco di Siracusa e confronto con modello numerico**
Andrea Cerniglia, Elisa Amato, Gelsomina Di Feo, Roberto Bettari, Enrica De Melio
- 69 **Progettazione, installazione e messa a punto di un sistema audio in un grande spazio all'aperto soggetto a vincoli artistici ed archeologici**
Guido Diamanti

Special issue from the Symposium on the acoustics of ancient theatres

Arianna Astolfi* | Patrizio Fausti** | John Mourjopoulos***

Ancient theatres are some of the most significant cultural and architectural masterpieces of the ancient world. The Greeks and Romans developed these spaces for entertainment, political and social commentary, religious rituals and artistic expression. They were built with great attention to acoustics and sightlines. The use of materials such as marble, stone, and brick helped to reflect and amplify sound, while seating arrangements and other architectural features were used to optimize the audience's listening experience. Today, many ancient theatres have been restored or preserved and are often still used for public performances including opera, drama, speech and music. Furthermore, researchers continue to study the acoustic properties of these ancient spaces, seeking to better understand the technical and artistic innovations that enabled the creation of such remarkable buildings.

These aspects, as well as more interdisciplinary studies, were presented and discussed during the Symposium on The Acoustics of Ancient Theatres, held in Verona from 6 to 8 July 2022. The Symposium, organized by the Acoustical Society of Italy (AIA) and the European Acoustics Association (EAA), with the collaboration of the Hellenic Institute of Acoustics (HELINA), was the second on this topic after the one held in Patras (Greece) in 2011.

The program of the Symposium included keynote speeches, presentations in structured sessions, posters, technical visits to the Verona Arena and Roman Theatre, workshops and demos. The visit to the Verona Arena was particularly inspiring, as it was possible to enter the technical areas and backstage usually closed to visitors, thanks to the Stage Director who guided the visit.

The evolution and development of new technologies for the multichannel measurement systems, together with acoustic simulations, auralisation methods and virtual reconstructions, have generated renewed interest in these ancient spaces and it is commendable that the Rivista Italiana di Acustica (RIA) is devoting an entire issue to publish some of the works presented during the Symposium.

The special issue includes 10 papers, divided into 5 invited contributions, 3 scientific papers and 2 technical notes. Papers dealing with issues related to Italy and its theatres were prioritised.

* Politecnico di Torino, Italy

** Università di Ferrara, Italy

*** University of Patras, Greece

Invited contributions

The first paper, by Alessandro Cocchi, presents a short survey on the meaning of reverberation time in theatres from Roman age to Renaissance, considering the different behaviour between open and closed spaces and how the parameter was used in the evaluation of their acoustical characteristics.

In the second paper, Riccardo Rudiero et al. discuss on the conservation, transformation, and enhancement of Classical theatres and amphitheatres, suggesting strategies for its enhancement and fruition according to their cultural and geographical landscape.

Kalliopi Chourmouziadou then analyses, in the third paper, the function of the First Ancient Theatre of Larissa with historic information, evolution through the centuries, acoustic investigations, contemporary soundscape, application of design proposals and future use.

The fourth paper, by Angela Bellia, presents some issues raised by the "Sonic Heritage" project concerning the study of sound and noise of ancient theatrical spaces as well as the modern reuse of these structures and the relationship with their intangible aspects, environment, and landscape.

In the fifth paper, Marco Francini illustrates his research path "The Voice in the Ancient Spaces" developed using voice and musical instruments in places that have particular acoustics and singular geographical locations, establishing relationship with the history and the surrounding landscape.

Scientific papers

In his paper, Francesco Martellotta discusses the issue of the acoustical reconstruction of ancient spaces, illustrating the potentials of the softwares but also the needs concerning the knowledge of the simulation process in order to obtain reliable results.

Chiara Bartalucci et al., in their paper, present the AURA project (Auralisation of acoustic heritage sites using Augmented and Virtual Reality) illustrating the potential of the auralisation process and the procedure used with different target groups.

The following paper, by Simone Secchi et al., illustrates briefly the history of the Theatre of Arts Academy in Tirana and the acoustic analysis during the restoration, including the results with the newly designed Orchestra pit.

Technical note

Andrea Cerniglia, in his paper, presents the first results of some acoustic measurement inside the Greek Theatre of Siracusa, their comparison with computer simulations and some unexpected behaviour in two position showed by on-field measurements.

In the last paper, Guido Diamanti discuss some issues related to the design, installation and setup of an audio system in a large outdoor space subject to artistic and archaeological constraints.

As general chair of the symposium, we are grateful to the authors who provided the RIA with an extended version of their papers presented at the Symposium. Inevitably, some contributions, which could have presented interesting perspectives, were not included due to space restrictions.

We would like to thank the reviewers who have generously contributed to this Special Issue and we hope you will enjoy the reading.

Theatres from roman age to renaissance: a short survey on the meaning of reverberation time measurements

Alessandro Cocchi

Emeritus Professor, Bologna University,
Bologna Science Academy
Via Zamboni, 33, 40126 Bologna
alessandro.cocchi@unibo.it

Ricevuto: 18/11/2022

Accettato: 22/12/2022

DOI: 10.3280/ria1-2023oa14954

ISSN: 0393-1110

ISSNe: 2385-2615

In the mind of C.W. Sabine, reverberation time was thought as a numerical index of what was happening in a closed hall when a sound source acting within was suddenly stopped: the original idea was that sound rays were travelling in any direction reinforcing residual sound energy, but at the same time overlapping audible messages that these rays were carrying to the listener's brain.

As well known, he stated a formula linking the R.T. value to the hall volume and to the capacity of the impinging surfaces to keep a fraction of the sound energy: from one hundred years to now, many authors researched in the field and stated the best R.T. values for the listener of different kinds of sound.

Surely Greeks and Romans did not know the possible existence of such a parameter, as they acted in open spaces, neither Vitruvius and, successively Alberti, Milizia, Poletti and so on, even if the tile cover utilized by the Romans to preserve from sun light and rain was avoiding that some sound energy dispersed in the sky.

Surely the modern computer assisted measurement techniques are able to keep some kind of sound decay even in an ancient theatre, but we are aware, as Greeks were, that they are derived only from reflections travelling quite horizontally, between vertical structures, or inclined between actors and spectators via orchestra floor, when not occupied from public.

This paper will present a specific and synthetic survey on the subject.

Keywords: acoustical parameters, reverberation time, running strength

Sui teatri dai Romani al rinascimento Italiano: una breve rassegna circoscritta al significato della misura del tempo di riverberazione

Sabine concepì per la prima volta nella storia una tecnica di misurazione di quanto accade quando in un ambiente chiuso la sorgente sonora improvvisamente tace: l'idea originale fu che i raggi sonori emessi in precedenza dalla sorgente contuassero il loro cammino rimbalzando sulle pareti come tante palle, lasciando di volta in volta sulle stesse parte dell'energia sonora da loro veicolata; l'ascoltatore veniva quindi immerso in un campo sonoro degradante più o meno regolarmente fino a raggiungere il silenzio, successivamente meglio definito nel classico degrado di 60 dB. Nei tempi successivi altri Autori hanno determinato quali dovevano essere le caratteristiche di uniformità di questo campo ed il suo valore di degrado ottimali per ascoltare e gradire diverse tipologie di campo sonoro.

Sicuramente Greci e Romani non conoscevano la possibile esistenza di questo parametro, tanto più che i loro teatri sorgevano all'aperto, condizione chiaramente antitetica all'uniformità del campo sonoro: né Vitruvio né, tanto per ricordare qualcuno, i suoi successori Alberti, Milizia, Poletti ed altri invocano il tempo di riverberazione, ben diverso dal semplice riverbero.

Sicuramente le tecniche di misura supportate dai moderni programmi di calcolo consentono oggi di valutare sia il valore (o i valori) del Tempo di riverberazione più idoneo a caratterizzare le diverse fasi del decadimento del campo sonoro anche in uno spazio aperto, ma siamo tutti ben consci (come del resto Greci e Romani) del fatto che i diversi picchi che compaiono lungo le curve di decadimento sono imputabili solo a riflessioni da strutture verticali collocate sul piano più o meno orizzontale della scena, dell'orchestra e della cavea.

Questa sintetica quanto accurata ricostruzione desidera appunto presentare questo quadro.

Parole chiave: tempo di riverberazione, forza del campo sonoro

1 | Introduction

First of all, it seems necessary to take this opportunity to recapitulate some relevant elements in the history both of architecture and acoustical science development.

In a previous paper [1], some particular aspects emerging from the examination of major findings in the field were explored:

- existence of a hill were to lean some kind of tiers useful for spectators, to enhance seeing and listening capabi-

lity, with the consequent research of an optimal shape, from the original rectangular one to the final choice of the circular one;

- location, to promote the acoustical aspect going away from any other possible source of noise (typical example: Epidaurus location) and other doubtful choices for taking advance from local air flows (exposure to sea, sun path);
- resonators, introduced by Vitruvius [2], but not so widely diffused in the field.

Not to be excluded, other factors may locally emerge from specific researches like for instance [3] where the nature of the material utilized was investigated, or [4] where a specific study was devoted to spectators and their dressings [5]; finally, the use of masques contributed to reinforce direct sound.

It seems also relevant to fit the problem into the historical frame of acoustical knowledges at the time when ancient theatres were built.

In the last fifty years electronic instrumentation allowed us not only to memorize the impulse response received from a microphone but also to elaborate it quite in any possible way.

The first step of this “new age” was the automatic calculation of the reverberation time and this event signified the disappearance of protractor rule from our desk, soon after the availability of a reverberation time calculated on any possible temporary base, such as EDT, T20, T30, and so on.

A new step was to compare the amounts of energy received in different time intervals, so to have the various clarity indexes, like C50, C80, and so on.

A particular index was derived from the comparison of the really received sound level in a selected position to that hypothetically receivable from the same omnidirectional source in an open field ten meters far, the strength G.

All these indexes are now well known to quite everybody involved in acoustical measurements in general and particularly within spaces devoted to theatrical performances and are really of strong interest for those involved in planning modern spaces like multipurpose auditoria or reuse of any other, like churches, sport arenas and, why not, Greeks and roman theatres even if open spaces.

They are of fundamental relevance also for those involved in restoration of ancient Opera Houses [6] so to save their original state, like for instance in rebuilding “La Fenice” theatre in Venice [7], or restoring “La Scala” theatre in Milan [8].

In the last century many researchers involved in the history of ancient theatres utilized the modern acoustical parameters trying to evaluate the acoustical ability of architects working in the past, from Greeks to the modern age, but in my really not short career I never found anyone of them speaking about parameters that didn't exist at their times!

At the most, someone speaks of “reverberation” or “reverberance” but not of “reverberation time”, till the coming on the scene of W.C. Sabine [9].

Even the availability of modern techniques to realize either physical or virtual models, more and more realistic, are responsible of any researcher's removal far from the reality;

so, my impression is that the more reliable study on open air theatres will remain that developed in [10] utilizing geometrical methods.

2 | State of art

It is possible to think that god-fearing is strictly linked with the man existence: so, even the need to involve others in our religious thoughts is originally linked with our existence and for theatrical expression may be the same.

We have proof of this when Egyptians began to leave some paper, at the time of the XVIII dynasty [11].

Looking to the archaeological remains, it seems possible to locate the beginning of the theatres building art in the VI century b.C. [see f.i. 12], with the transition in some century from the original squared shape (to promote a better use of the field) to the best known semi-circular one [12, 13] (nearer to the shape of direct sound waves).

Following the word of [14], we know that “Greeks of the Pythagorean school were primarily concerned with the science of musical intervals, the branch of musicology sometimes referred to in ancient writings as *canonics* or *harmonics*.”

The musical consonances described as the octave, the fifth and the fourth were almost certainly known long before Pythagoras, but the success he had in identifying these consonances with the ratios of simple whole numbers was not only a mayor advance in the theory of music, but also a source of encouragement and support for the numerological slant of Pythagorean doctrine. In the early experiments ascribed to Pythagoras, the auditory judgement of consonance was used as a criterion to establish the corresponding numerical ratios. In due course, however, Pythagoras and his followers lost faith in the evidence of the senses as a criterion of judgement and sought to interpret all phenomena as manifestation of mathematics”.

“Anaxagoras (c.a. 499-428 b.C.) explained it explicitly by seeing that trough the weakness of science-perceptions we cannot judge truth”.

Some time later, “Aristotle (384-325 b.C.) gave the most articulate explanation of the extravagant notion”, asserting the untruth of these ideas of Pythagorean school.

The most enduring, not unique, contribution by Pythagoras was the inverse proportionality between pitch and length of a vibrating string; furthermore, there was the claimed experiment about the pitch emitted from two different hammers, having the weight one the double of the other, hitting on an anvil. Boethius (a.D. 480-524), one of the best Aristotle's translators, refers that Pythagoras invented the monochord to test relations existing between pitch and length of a vibrating string.

The mathematician Archytas (428-360 b.C.) stated that “sound is impossible unless there occurs a striking of objects against one another” and it concluded his argument with a summary claim “that hight notes are in swift motion, low tones in slow motion, has become to us from many experiments”.

The idea that the speed of sound was linked to its frequency was not completely drove away even in Aristotle time, but Theophrastus of Eresus (372-288 b.C.), Aristotle's successor in the guide of the peripatetic school, finally observed that two different, concord sounds would maintain always in this condition all along their common path, so it was evident that the speed was the same for both.

Aristoxenus [15], a philosopher and musician who lived in the III century b.C., was involved in the discussion about musical scales and was aware of many aspects of the generation and overlapping of sounds, first of all the propagation spherical rule. So, they probably found only on the field that some vertical surface or structure could generate reflected sound reinforcing the direct sound: for instance, the particular diffraction effect in the Hellenistic amphitheatre of Epidaurus generated by the nature of stone utilized for the seats was unexpected [3].

Even the great geometer Euclid of Alexandria (330-275 b.C) was involved in the question about musical intervals but didn't add anything to the work of Aristotle and his followers, even if his theory of simple numbers was the best presented.

The first paper we found on the subject is the famous treatise by Vitruvius [2] where, it is well known, we can find many notes and geometrical details about the shape of a theatre either Greek or Latin, but quite nothing about natural reverberance: only some words are devoted to sound reflection, more is devoted to artificial reverberance dealing with sounding vessels.

The first appearance of natural reverberance derived by chance from the introduction of some kind of cover as sun or rain protection.

After a long period of silence about the buildings devoted to theatrical performances, in XVII-XVIII century the interest on these covered spaces raised, so we can find in Italian literature some writing speaking of them, like for instance Carini Motta [16]; in Europe Pierre Patte [17] was the first to announce in his book cover that his studies were placed upon "les principe de l'optique et de l'acoustique".

In particular, the declaration of Patte clearly confirms that, at least till the end of XVIII century, acoustical reasons were not the first problem for everyone involved in theatrical design.

Among the Italian architects involved in design of theatrical space during the XVIII century exploded deep research about the best shape for the audience, but even in this case we found only visual reasons; maybe there were also some acoustical reasons that each designer kept for himself or his family, like in the case of Galli da Bibiena. We have the same impression reading [18] were the work of less famous architects who signed many projects in Italy, like Aleotti and Poletti, is taken into consideration.

In Europe, the situation is well represented, in my opinion, from the words of the famous architect C. Garnier at the opening of his Opéra in Paris, who declared that he afforded the big problem of the acoustical result like an acrobat launching himself in circus arena without any safety net [19].

A very interesting book was written by F. Canac [10] in

1967, who put in clear evidence the very unique importance, in an ancient theatre's acoustic performances, of reflections coming from the orchestra surface in the construction of some reflected and reinforcing sound.

So, when W.C. Sabine [9] was charged to modify the agreeability of sound reception in the famous auditorium of Fogg Art Museum, nobody else was able to measure what he called "reverberation time" and to link it to the sound absorption power of materials facing the sound source. It is of fundamental relevance that Sabine was acting within a closed space, in particular claiming for an uniform acoustical field, that is, euphemistically to say, far away to what happens in an **open space!**

3 | ERATO project

In the frame of the ERATO European project, many researchers were involved both in measurements and simulations in Greek and Roman theatres: three annual reports were published where in particular we can find the achieved results. At the end, a symposium was held in Istanbul [4].

An unexpected result was the amount of RT, as stated also in [20]: RT was higher than expected while SPL was almost that of free field.

Maybe, it would be interesting to study the slope of the impulse response, that only some new instrument shows, while usually they give directly the numerical result evaluated on the base of a time interval selected from the same software: in these cases EDT, T20 or T30, parameters that practically take into consideration only the direct sound and some first reflections.

Rindel, who acted as Coordinator of ERATO research, firstly analysed in [21] some result achieved, then studied in deep in [22] where in particular he reproduces some decay curve denoting clearly the presence of many concentrated responses, better ascribable to eco than reverberated sounds (in Sabinian sense); finally in a contribution to the recent symposium in Verona [23] the results achieved bring to the conclusion that "EDT is not a usable parameter" and that T20 "is highly unreliable", instead G ... could be a usable parameter for open-air theatres".

At that point it seems relevant to debate on the meaning of the parameter G, originally proposed to quantify the amount of acoustical energy apported from the envelope to direct sound, usually relating the SPL measured in some position in a closed hall while an omnidirectional source is acting, and that theoretically achievable whit the same source in a free field ten meters far from the same source.

In the case of an open space, like a Greek theatre, it seems more realistic to compare the measured value with the result achievable in the same place in a flat and free field (always with the same omnidirectional source).

This new version of G was firstly suggested in [20], then presented in clear from the Author and others [24] as G_{re} , relative strength:

$$G_{re} = 10 \log_{10} \left[\int_0^T p^2(t, x) dt / \int_0^T p_{ff}^2(t, x) dt \right] \quad (1)$$

where p represents the sound pressure value measured in place and p_{ff} the theoretical value generated in an equivalent flat and free field **at the same distance** from an omnidirectional source: this definition seems quite the same as now presented in [23].

4 | Concluding remarks

Reading the papers of Sabine [9], it is evident that it is out of discussion the possibility to apply his work to an open field, even if we have reflections. In the field fancied, the decay slope must be rather regular during the canonical 60 decibels. Nevertheless, it is possible to limit this time interval to put in evidence some particular effect like direct sound, early sound and so on [25].

When carrying out reverberation time measurements it is always recommended to catch as first element the full slope of the decay, from which it is possible to deduce many useful informations about the acoustic field generated from the impulse response.

Chiefly in the case of ancient Greeks and Roman theatres, it seems more realistic to examine the strength of sound G better related to a real position in the field than to a fixed distance from the source.

Considerazioni conclusive

Leggendo gli scritti di Sabine [9], appare fuori discussione la possibilità di utilizzare il suo Tempo di riverberazione quale strumento per valutare la qualità Acustica di uno spazio aperto, anche in presenza di componenti riflesse: il risultato dei suoi esperimenti è applicabile solo a campi con decadimento sonoro più o meno regolare. Ciò non toglie che limitando il tempo di ascolto del decadimento possano derivarne aspetti particolari, quali la o le componenti dirette e le prime component riflesse [25].

In genere, eseguendo misure del tempo di riverberazione, in genere è sempre raccomandato di registrare la curva del decadimento del livello sonoro, sempre foriera di utili informazioni.

Appare invece di grande interesse la forza G_{re} (E in [23]) relativa alla posizione reale sul campo anziché quella classica riferita alla misura standard di 10 m dalla sorgente, specie nel caso di teatri Greci e Romani.

References

[1] A. Cocchi, Theatre Design in Ancient Times: Science or Opportunity?, *Acta Acustica* 99 (2013) 14-20. <https://doi.org/10.3813/AAA.918583>

[2] M.P. Vitruvius, *The ten books on Architecture*, Book 5, Dover Publications, New York, NY, 1960.

[3] N.F. Declercq, C.S.A. Dekeyser, Acoustic diffraction effects at the Hellenistic amphitheatre of Epidauros. Seat rows responsible for the marvellous acoustics, *J. Acoust. Soc. Am.* 121 (2007) 2011-2022. <https://doi.org/10.1121/1.2709842>

[4] ERATO Project Symposium. Audio visual conservation of the architectural spaces in virtual environment. Yildiz Technical University, Besiktas-Istanbul, 20 January 2006.

[5] P.H. Ciechoski, S. Schertenleib, D. Thalmann, Animating the Aphrodisian Odeon – a System Overview, in: *Proceedings of the ERATO Project Symposium. Audio visual conservation of the architectural spaces in virtual environment*, Besiktas-Istanbul, 2006: pp. 64-72.

[6] N. Prodi, R. Pompoli, Guidelines for acoustic measurements inside historical opera houses: procedure and validation, *J. Sound Vib.* 232(1) (2000) 281-301. <https://doi.org/10.1006/jsvi.1999.2821>.

[7] L. Tronchin, F. Farina, Acoustics of the former Teatro La Fenice in Venice, *AES: J. Audio Eng. Soc.* 45(12) (1997) 1051-1062.

[8] H. Arau, A. Cocchi, Le attenzioni riservate all'acustica, in Lonati E., *La Nuova Scala: il cantiere, il restauro e l'architettura* p. 76. Marsilio, Venezia 2004.

[9] W.C. Sabine, *Collected papers on acoustics*, Harvard University Press, Cambridge, 1922.

[10] F. Canac, *L'acoustique des theatres antiques, ses enseignements*, CNRS, Paris, 1967.

[11] L. Moussinac, *Il teatro dalle origini ai giorni nostri*, Universale Laterza, Roma, 1966.

[12] F. Mariano, Introduzione allo spazio del Teatro, in *Storia del Teatro nelle Marche*, Nardini, Fiesole, 1997.

[13] J.H. Rindel, R. Frederiksen, O. Vikatou, The acoustics of the Pi-shaped Greek theatre in Kalydon, Aitolia, in: *Proceedings of the 11th European Congress and Exposition on Noise Control Engineering (Euronoise)*, Crete, Greece, 27-31 May 2018.

[14] F.V. Hunt, *Origins in Acoustics: The Science of Sound from Antiquity to the Age of Newton*, London Yale University Press, New Haven, CT, 1978.

[15] Aristoxenus. *Elements of Harmony*, Clarion Press, Oxford, 1902.

[16] F. Carini Motta, *Trattato sopra la struttura di Theatri e Scene*, Guastalla, 1676.

[17] P. Patte, *Essai sur l'Architecture Theatral*, Moutard, Paris, 1782.

[18] C. Marchegiani, La lezione di Raffaele Stern sul teatro: regole e idee sulla sala di spettacolo dal carteggio Poletti-Aleandri (1823). in: *OPUS. Quaderno di storia, architettura e restauro* n. 6/99, Carsa Edizioni, Pescara, 2000: pp. 387-416.

[19] M. Forsyth, *Gli edifici per la musica: l'architetto, il musicista, il pubblico*, Zanichelli, Bologna, 1987.

[20] A. Farnetani, N. Prodi, R. Pompoli, Acoustical measurements in ancient roman theatres, in: *Proceedings of the ERATO Project Symposium. Audio visual conservation of the architectural spaces in virtual environment*, Besiktas-Istanbul, 2006: pp. 27-33.

[21] J.H. Rindel, M. Lisa, The ERATO Project and its Contribution to our Understanding of the Acoustics of Ancient Greek and Roman Theatres, in: *Proceedings of the ERATO Project Symposium. Audio visual conservation of the architectural spaces in virtual environment*, Besiktas-Istanbul, 2006: pp. 1-10.

[22] J.H. Rindel, *Diachronic Analysis of Greek Theater Acoustics in the IV Century BCE*, to be published by the Acoustical Society of America, private communication, 2021.

[23] J.H. Rindel, Meaningful acoustical parameters for open-air theatres, *Proceedings of the 2nd Symposium: The Acoustic of Ancient Theatres*, 6-8 July 2022, Verona, Italy.

[24] A. Cocchi, M. Cesare Consumi, R. Shimokura, Recent investigations about some objective acoustical parameters, In: *Proceedings of the Institute of Acoustics*, 28 (2), 2006.

[25] L. Beranek, *Concert and opera halls: how they sound*, Acoustical Society of America, New York, NY, 1996.

Conservation, transformation, and enhancement of classical theatres and amphitheatres*

Emanuele Romeo, Emanuele Morezzi, Riccardo Rudiero*

Dipartimento Architettura e Design (DAD),
Politecnico di Torino,
Viale Pier Andrea Mattioli, 39, 10125 Torino

* Corresponding author:
riccardo.rudiero@polito.it

Ricevuto: 2/11/2022

Accettato: 17/1/2023

DOI: 10.3280/ria1-2023oa14864

ISSN: 0393-1110

ISSNe: 2385-2615

The architectural heritage of the Classical age, present both in Italy and in the other Mediterranean countries, has been subject over the centuries to different phenomena that have caused either its abandonment or the continuation of its use, its transformation or the loss of its integrity. These processes have ensured the survival of these buildings through a continuous integration in urban and cultural activities. The paper presents the results of research aimed at the conservation of ancient theatres and amphitheatres, understood in their multi-layeredness, suggesting strategies for their knowledge and compatible enhancement from both an architectural and a landscape point of view.

Keywords: knowledge project, multi-layered heritage, ruins, historical landscape, Charters for the conservation of cultural heritage

Conservazione, trasformazione e valorizzazione di teatri e anfiteatri di età classica

Il patrimonio architettonico di età classica, presente sia in Italia che negli altri Paesi del Mediterraneo, è stato oggetto nel corso dei secoli a diversi fenomeni che ne hanno sancito l'abbandono o la continuità d'uso, la trasformazione o la perdita di integrità. Processi di questo tipo, con esiti sulla materialità delle architetture molto distanti tra loro, hanno però spesso garantito la sopravvivenza di questi edifici, avendoli integrati nelle attività urbane e culturali. L'articolo presenta i risultati di una ricerca finalizzata alla conservazione di teatri e anfiteatri antichi, intesi nella loro pluristratificazione, suggerendo strategie per la loro conoscenza e per una valorizzazione compatibile sia dal punto di vista architettonico che paesaggistico.

Parole chiave: progetto di conoscenza, patrimonio stratificato, rovine, paesaggio storico, Carte per la conservazione dei beni culturali

1 | Introduction

The classical architectural heritage is a significant presence in Italy, Europe, and other Mediterranean countries. Over time, it has been subjected to strongly diverse phenomena, which have led to its abandonment, use continuity, transformation, or disintegration [1]. In particular, theatres, following destructive events or interruption of use, have reached a state of ruin after transformations, re-functionalization, repairs from several types of damages, restoration and adaptations to new stylistic canons.

For this reason, they are among the buildings that, in their successive formal and structural changes, have most strongly modified their founding status: from places in which words and music resonated, they have become containers for other activities, in which acoustics no longer plays a role. Attention to this precise characteristic was instead central for the ancient architects, who had to design and realise them. For example, in his *De Architectura*, Vitruvius devoted a great deal of space to the acoustics of Greek and Roman theatres, suggesting the best form for sound to spread correctly. This was also thanks to the aid of bronze vases, which, when appropriately placed, could have improved the propagation

conditions of sound waves [2]. And it was precisely the re-discovery of the Vitruvian text that led many Renaissance architects to examine the acoustic aspect of theatres. Andrea Palladio, Vincenzo Scamozzi and Pirro Ligorio, for example, took their cue from the Roman treatise writer's indications to analyse sound propagation in ancient performance buildings, publishing these studies in their works [3]. However, all these analyses had only a theoretical implication, as the restoration of ancient forms in multi-layered buildings was of no interest at the time. And while this hindered (and still hinders, to some extent) the analysis of the typological characteristics of the original configuration of theatres and amphitheatres, it allowed their survival by integrating them continuously in urban and territorial activities. The relationship between ancient buildings, new architecture, urban environments, or landscape contexts has lasted over centuries. Following changes in their in-use destination, theatres were used for handcrafting or agricultural activities or were converted into households. Aside from subsequent adaptations to modern urban fabrics, these functions stayed unchanged until – with the rediscovery of antiquity – archaeological excavations and restoration interventions compromised their secular stratifications [4]. In many cases, the tendency has been (and still is)

to resurface ancient structures at the expense of the authenticity of artifacts and contexts, thus clashing with the goal of preservation.

Very often, such occurrences take place due to tourism-economic needs, which press for the theatres to be restored to their form and function so that they can once again host performance events. Notwithstanding these motivations and recording this trend, several international charters have been at pains to balance conservation and use, advocating multi-disciplinary investigations to achieve a satisfactory result (e.g. Siracusa Charter, 2004) (Fig. 1). In this sense, acoustics has also returned to play a central role: studies have flourished in this regard, mainly concerning the original behaviour of these structures [5]. However, from a practical point of view, these works struggle to find a concrete application in the reuse of buildings because, in the re-functioning for contemporary performance activities, it is preferred to insert modern technological apparatuses rather than reintroduce classical amplification devices, albeit with modern forms and materials [6].

With this in mind, the article will present the results of research aimed at the conservation of ancient theatres and amphitheatres, understood in their multi-layeredness, suggesting strategies for their knowledge and compatible enhancement from both an architectural and a landscape point of view. The latter aspect is essential since sometimes the landscape even represented a natural scene for theatrical representations [7].



Fig. 1 – The stage front of the theatre in Orange with the new roof to contain all the installations necessary for cultural performances

La fronte scenica del teatro di Orange con la nuova copertura a cui è affidato il compito di contenere tutti gli impianti necessari alle rappresentazioni culturali

2 | Commemorative value and present-day value in ancient classical theatres

Ancient theatrical architectures can be categorized according to three factors: the historical vicissitudes that have allowed their conservation, their use over history, and their appreciation in the past. Hence, they can be divided into four

categories: buildings located in archaeological sites; formally recognizable buildings, located in urban areas; buildings that, despite being still present in cities and territories, can only be identified through small traces, or are incorporated into modern buildings or complex urban fabrics, through modifications that, while preserving archaeological monuments, have limited their architectural interest by hiding their classical typological features; finally, still poorly examined buildings that are located in landscape contexts. These latter have a variable conservation state, are often abandoned, and are rarely the object of cultural enhancement strategies [8]. This distinction is essential, as until now artifacts in archaeological areas, or in urban centers when evident and tourism-attractive, have received a much wider interest. The present and past cultural conditions have been suggesting – too often – recovery or (stylistic) restoration interventions to remove additions and revert to the original appearance of the monument: however, this has led to the loss of the historical traces accumulated on these buildings over time. The presence of stratified elements has not been subjected yet to a recognition process, especially because of the lack of suitable tools for the comprehension of the underlying secular stratification processes [9]. This framework is compounded by the execution of badly conceived works of ‘functional actualization’, which have mostly overlooked investigation actions and conservation practices, proposing valorization strategies exclusively aimed at immediate returns in terms of economic efficiency and tourism.

The interest in the protection of the cultural heritage in Italy, Europe, and extra-European countries, and the launch of initiatives for the restoration of the archaeological heritage [10], require an improvement in the knowledge tools of this heritage, and strategies for conservation and cultural development for sustainable fruition project. This latter has been encouraged more than 50 years ago by the Franceschini Commission [11], and more recently reiterated by the Siracusa Charter in 2004 [12]. This also requires total respect for the transformation dynamics that have always guaranteed a close relationship between theatrical building, city, and landscape, in addition to the awareness that valorization could also be performed by letting nature ‘use’ the archaeological ruin for the sublimation of a specific urban or landscape context.

Here, then, are some methodological reflections for the reading of such archaeological heritage, aimed at suggesting tools for the analysis of transformation processes, for the verification of the current state of preservation, and, finally, for the proposal of appropriate strategies of culturally sustainable promotion [13].

As is well known, some areas of the Italian, European, and Mediterranean basin countries have been the subject, in recent years, of studies that have sometimes served as a starting point for projects for the enhancement of the widespread archaeological heritage [14]. Starting from the existing literature [15], the research, presented here briefly, aims to include, within such programs, also theaters and amphitheatres, for which only in rare cases has interest been found

in the context in which they are located. On the contrary, enhancements for tourism have often resulted in the devastation of the landscape and the isolation of the monument with its consequent desertification.

The study requires a complex knowledge process that, starting from the monument's origins, considers all the stages of its history, including the most recent ones, that is, those that have created that surprising symbiosis between human life and the continuous regeneration of nature.

In summary, the primary operations are the identification and cataloging of the recreational and performing arts buildings; the interpretation of literary and epigraphic sources; the reading of cartographic, graphic, iconographic, and photographic evidence; the direct reading of the stratifications and the analysis of the state of conservation of the buildings; the planning of interventions aimed at the preservation of the examined assets; and the identification of possible enhancement strategies extended to the urban contexts and the landscape in which theaters and amphitheaters are inserted. The changing-of-function process should be started just after all these actions.

First, it is necessary to locate in the territory, through topographical maps, all known buildings comprising mainly those later stratified complexes. Such an investigation must begin with identifying cities of Greek or Roman foundations within which there must have been performing arts buildings. In many cases, these cities coincide with present-day urban settlements, albeit with conspicuous transformations and reshaping; in others, they are ancient settlements abandoned over the centuries and resurfaced only after archaeological excavation campaigns. In both contexts, the study of sources helps recognize what today appears not so evident but exceedingly latent. One of the investigation tools is the interpretation of literary and epigraphic evidence and the reading of the most recent scientific publications, interrelating their respective findings. Unfortunately, this last point has not yet become a regular habit, highlighting the inadequacy of a little interdisciplinary approach. At the same time, the collaboration between archaeologists, topographers, and architects could facilitate the identification of traces of a classical building even in the absence of specific evidence [16]. Conversely, even in the absence of overt traces, the presence of epigraphic references would make it possible to identify archaeological sites that belonged to theaters and amphitheaters, legitimizing excavation and survey campaigns. In this sense, the study of cartographic, graphic and iconographic sources is undoubtedly helpful, as they allow us to read the history of the buildings by providing indications of their use after their decommissioning; however, the identification of latent traces should be accompanied by the cataloging of the spolia present in urban contexts. The study of documentary sources must be accompanied by verifying existing graphic documentation, both current and reference to the 19th and 20th centuries. Starting from that period one can find a certain amount of drawings and graphic material produced to support the first actions of protection and preservation, up

to the most recent documents attesting to the interest of preservation bodies in the play and theater buildings.

It is then necessary to draw up a historical record of the factories with the identification of transformations due to functional adaptations, pointing out the elements belonging to older additions and denouncing the incongruous ones of more recent insertion [17]. Consequently, to accelerate the processes of protection, it is necessary to check the regulatory status and the existence of constraints extended to the same, to the urban context or surrounding landscape or to the elements of later stratification. In such a case, one should start by consulting cadastral data, both in terms of the ownership of the properties built above the old play and entertainment buildings and verifying the permanence of the building type whose plan form has a distinct radial pattern. This points to another analysis: the reading of urban land registers that indicate the permanence of ancient traces or structures [18], evident or latent, and the interpretation of toponymy.

In addition, for those theaters that still have residential use, an analysis of contemporary uses is indispensable, aimed at studying the compatibility between the preservation of the buildings, protection of the landscape, and current function [19]. Therefore it is necessary to draft thematic tables on the state of conservation of the buildings and the identification and cataloging of any artifacts preserved at museum facilities and traceable to the buildings examined to facilitate their understanding. Finally, it would be desirable to draw up a charter of methodological guidelines to define both tools and priorities in knowledge processes, as well as conservation and enhancement actions that provide for planned maintenance, consolidation, and restoration of artifacts as well as plans for the cultural enhancement of urban and landscape contexts.

Through such a knowledge process, results could be achieved that are respectful of the cultural value of this category of assets, attentive also to the preservation of materials and construction elements, the permanence of distributional and functional characteristics, the relationship with the territorial and landscape context, and the relationship with current socio-cultural realities [20]. However, even at the regulatory level, protection, preservation, and enhancement should be more intertwined. At the same time, there is an increasing tendency to divide them, as if protection and preservation were matters of culture, while enhancement of a business to be delegated to local authorities and administrations. Ancient theaters should be managed with expertise and foresight and in the knowledge that their most significant value lies not so much in the possibility of being transformed or even distorted but in need to continue to be manifestos of culture. Only in this way can classical performing arts buildings, through their transformations and reconfigurations, renew and reinforce their interrelationships with the land and landscape, becoming points of accumulation of the memory of centuries, of historical events, and the economic and social processes of a people or an entire society (Fig. 2).



Fig. 2 – The stage front of the theatre in Arles with the discrete contemporary installations to allow cultural events to take place
La fronte scenica del teatro di Arles con le discrete installazioni contemporanee per consentire lo svolgimento delle manifestazioni culturali

3 | From the abandonment of ruins to sustainable reuse

In the framework of interventions on archaeological artifacts, especially on theatrical structures from the Roman age, one of the key items is the full understanding of the intrinsic meaning of the ruins, of their symbolic and semiotic value, in addition to their tangible characteristics, which are the object of physical modifications. The re-functionalization of an archaeological ruin implies a new conceptual and interpretative paradigm, which is an integral part of a multi-disciplinary transformation project. As highlighted above, ruins recall void, absence, gap, silence, and have a deeply strong relationship with the past [21]. Ruins must be intended as architectures on the theme of silence, and that is the reason why for scholars, researchers, and artists these contexts and remains have originated important reflections, which have influenced Western artistic, literary, and architectural culture in the last centuries. Probably for this characteristic and unicity, architectural ruins are a rich and invaluable heritage, whose conservation is frail and exposed to many threats: when transformed into a ruin, a building loses its function and shifts from being architecture to being a memory, a monument, and a simulacrum of the past [22]. The transition from an abandoned ruin to a restored building, with a new design, valid acoustic performance, and regulatory compliance cannot be implemented through the conversion of a single theatrical architecture; instead, it requires the semantic transformation of the surrounding landscape and context. In this perspective, the re-functionalization of the heritage can be performed only in a shared multi-disciplinarity and trans-disciplinarity, which allows a mutation of the historical context under careful supervision aimed at the conservation of archaeological and cultural ground [23]. Notably, some areas of the Italian, European and Mediterranean heritage have been the object of studies that

served as a starting point for valorization projects on the diffuse archaeological heritage. However, this has been rarely supported by an interest in the landscape or urban context of the artifacts; instead, tourism-driven valorization projects have often led to landscape devastation and monument isolation, resulting in its desertification. Indeed, the study of a monument requires a complex knowledge process, starting from its origins and entailing all its historical stages, including the most recent ones, which have produced a surprising 'symbiosis' between human life and natural regeneration [24]. Hence, the main operations are: the individuation and cataloging of the heritage; the interpretation of the literary and epigraphic sources [25]; the consultation of cartographic, graphical, iconographic, and photographic records; the direct analysis of stratifications and the analysis of the conservation state of the buildings; the planning of interventions aimed at the conservation of the examined artifacts; the individuation of possible enhancement strategies extended to the urban contexts and the landscape where the ancient places of performance are located [26].

In this perspective, the discipline of architectural restoration represents a potential coordination system for the activities aimed at the re-functionalization and enhancement of the heritage. It can combine the fundamental study of archival and documental sources with the technique of building design and regulatory retrofit, hence coordinating transformations and ensuring a sustainable reconversion of the heritage. In fact, sustainability is not only related to the characteristics of the architectural work (soil consumption, material choices, programmed management criteria, ...) but also to the cultural dimension, including social and communicational aspects. Transforming the ruins of Roman theatres into new, efficient places, yet preserving the historical value of the archaeological space and ground, appears to be the fundamental challenge of our time for the conscious conservation of the built heritage (Fig. 3).



Fig. 3 – The Roman amphitheatre in Trier during the erection of the stage equipment necessary for staging musical performances
L'anfiteatro romano di Treviri durante l'allestimento delle attrezzature sceniche necessarie per lo svolgimento degli spettacoli musicali

4 | The Charters on the ancient places of performance, across conservation and reuse

In addition to the abovementioned feature, another peculiar characteristic of ancient places of performance is the specific focus received by the International Charters, where the general strategies for the conservation of the cultural heritage are intertwined with more the cogent guidelines for archaeological artifacts. The Segesta Declaration (1995), the Verona Charter (1997), and the Siracusa Charter (2004), despite not having a doctrinal nature, have become the reference documents for the compatible and sustainable use of theatres and amphitheatres, and have influenced many European and Mediterranean cultural strategies in this field.

They follow the *European Convention on the Protection of the Archaeological Heritage* (Valletta, 1992), adopted by the European Council, which had a mainly socio-political purpose, that is to fortify European identity also through the development of the heritage [27]. The pursuit of this goal has triggered the activation of many knowledge projects on this theme, in relation to the acoustic performance or the geometric and material configuration of buildings [28]. Moreover, it supported the restoration of the original in-use destination of many theatres, opening them to events and performances.

This approach, directed preponderantly toward utilization, risks overshadowing actual archaeological studies and interventions that seek to preserve ancient ruins in their state and authenticity [29]. However, this should come as no surprise, when in the work of constructing the Siracusa Charter, the authors stated that the “theoretical basis of reference” could be summarized in the formula “knowledge for reuse” [30], with the significant risk of ferrying these architectural-archaeological assets into a sphere of critical apriorism. And all this even though it is clearly stated within it that reuse should adhere to the minimum intervention and be commensurate with the state of conservation, while practice often seems geared toward not considering this as a limitation, giving rise to substantial additions that lead to highly criticized and criticizable and, unfortunately, often irreversible results [31]. In this way, various theaters and amphitheatres are abstracted and extracted from their present and projected beyond it, evaluated mainly in the susceptibility to become (or instead, to return to be) something else, preferring an imaginary to reality [32]. Indeed, from this point of view, it is almost impossible, or at least challenging, to make them remain in a state other than that of functional efficiency [33], which also brings a substantial return in the image for the owning or managing entities [34]. And it is also for this reason that, often, theaters and amphitheatres succeed in catalyzing resources to reactivate performance-oriented use, at the risk of causing other buildings or sectors of the city that are equally important but, perhaps, not similarly appealing to tourist influx to be overlooked. And such an occurrence may also jar with an increasingly focal need in the architectural heritage field, namely that accessibility that is as cross-cutting and all-encompassing as possible [35]. In-

deed, suppose it is true that “taking care of the visitability of a site [...] means allowing the usability of its most significant spaces and, above all, encouraging an overall view of it” [36]. In that case, it may be essential and strategic to make only a portion of it accessible, i.e., the most neuralgic for its understanding. However, this portion does not necessarily have to be identified with the theater or amphitheater, even though they are very often the best accessible, pertain to the sphere of familiarity of a generalist audience, and thus are easily interpreted in their unity, which moreover has a “topical value, as an emblem of the Ancient” [37], and therefore arouses considerable fascination. The same desire that, moreover, involves “geographically and culturally distant populations” who “through identification with ancient Greece and Rome see [...] realized membership in the cultural elite of old Europe” [38]. And precisely this last aspect that opens up further questions that, in an increasingly interconnected world, are certainly not secondary: what theory(s) should one appeal to to set up a project for the preservation and enhancement of theaters and amphitheatres falling on multiple continents [39]?

Having briefly clarified what might be considered dyscrasias between preservation and enhancement but, conversely, reiterating the assumption that enjoying a building means ensuring its maintenance, the question arises as to whether it is essential to bring all ancient theaters back into such efficiency as to make them usable again.

Since the three Charters pursue this goal, are they antithetical to the criteria of restoration? Definitely not. Indeed, they have deeply influenced the cultural climate, fostering an in-depth technical analysis of every aspect of ancient places of performance. In particular, the Siracusa Charter provides well-founded support to the whole methodology of data acquisition and improved comprehension of these architectural organisms and contains useful management suggestions. However, not all ancient places of performance should receive the application of these directives, simply because not all of them are compatible with transformation. Or rather, they could be, but they would be turned into mere simulacra of design hypotheses.

The fulfillment of the transversal validity of the Charter requires clarifying that use is not an absolute postulate, but only one of the possible paths: probably, this path can be chosen only for a limited number of buildings. Different scenarios should be envisaged for all the others, in compliance with the indicated procedure: these could range from simple structural reinforcement to partial reconstruction, making them understandable but not usable, or even to the conservation of their collapsed state, with simple safety interventions [40]. In all these cases, as suggested in the Valletta Convention, there could be a more intense focus on virtual reconstructions, through shared scientific modalities, using the results of research activities also for communicational purposes [41]. If this were not to occur, the undoubted critical validity of the Siracusa Charter would keep being hindered. It would end up being a *checklist* for the achievement of good results, yet perceived as univocal. This should not

happen, as restoration is, first of all, a philosophy [42], and its results – be they satisfying or not – derive from a cultural reflection that technique must merely put into practice [43]. For all these reasons we believe that, after almost twenty years, the Charter should be revised: not in its prescriptions – which are still functional and effective – but in its premises, freeing it from eminently political interests. This opinion is also motivated by the introduction of new documents, which are changing the approaches to the heritage, such as the Faro Convention [44]. However, these documents must also be contradicted when they give higher importance to identity and processes than to the constraining role of architectural material, for the definition of orientation principles and operational models in restoration [45]. These latter must be questioned even more than the postulate of use; at least, they must no longer be the base for reflections that produce effects on the authenticity of the cultural heritage [46].

5 | Conclusions

In light of the methodology concerning the knowledge, preservation and enhancement of ancient theatres and amphitheatres, of the special status of ruin they may be invested with, and considering the international charters that deal with their use, we believe in conclusion this to be the time to debate again the fate of ancient places of performance. However, the object of the debate must not be “how” to intervene to preserve and use them at best, but “why” doing that. Almost thirty years of Declarations and Charters-driven restorations have certainly produced food for thought, together with the results of research in this field (Fig. 4). However, these latter must be critically interrelated, leading to a trans-disciplinary – not only multi-disciplinary – comparison, based on a complex, global, and, above all, inclusive vision of knowledge [47].



Fig. 4 – The Greco-Roman theatre in Taormina with the erection of the stage platform required for the holding of musical events
Il teatro greco-romano di Taormina con la messa in opera della pedana scenica necessaria per lo svolgimento delle manifestazioni musicali

Conclusioni

Alla luce della metodologia relativa alla conoscenza, conservazione e valorizzazione dei teatri e degli anfiteatri antichi, del peculiare status di rudere in cui possono versare, e considerando le carte internazionali che si occupano del loro utilizzo, riteniamo in conclusione che questo sia il momento di ridiscutere il destino degli antichi luoghi di spettacolo.

Tuttavia, l'oggetto del dibattito non deve essere “come” intervenire per preservarli e utilizzarli al meglio, ma “perché” farlo. Quasi trent'anni di restauri guidati da Dichiarazioni e Carte hanno certamente prodotto spunti di riflessione in tal senso, insieme con i risultati delle ricerche in questo campo.

Tuttavia, questi ultimi devono essere criticamente interconnessi, portando a un confronto transdisciplinare – non solo multidisciplinare – basato su una visione complessa, globale e, soprattutto, inclusiva della conoscenza.

References and notes

* The paragraph *Commemorative value and present-day value in ancient classical theatres* is authored by Emanuele Romeo, *From the abandonment of ruins to sustainable reuse* by Emanuele Morezzi and *Using ancient theatres: the Charters on the ancient places of performance, across conservation and re-functionalization* by Riccardo Rudiero. Introduction and Conclusions were jointly drawn by the three authors.

- [1] Concerning the conservation and enhancement of the archaeological heritage, see the two publications containing the results of the two PRIN coordinated by E. Romeo's local research unit: *Indagini conoscitive e strumenti operativi per la conservazione e valorizzazione del patrimonio archeologico fra l'età classica e il tardo antico nel Mediterraneo orientale* (2004-2006) and *Conservazione e rifunionalizzazione del patrimonio archeologico di Elaiussa Sebaste: analisi, valutazioni e interventi di restauro* (2011-2013). E. Romeo, *Problemi di conservazione e restauro in Turchia. Appunti di viaggio, riflessioni, esperienze*. Torino: Celid, 2008; E. Romeo, E. Morezzi and R. Rudiero, *Riflessioni sulla conservazione del patrimonio archeologico*. Roma: Aracne, 2014.
- [2] Vitruvio Pollione, *De Architectura*, introduzione di S. Maggi, testo critico e traduzione a cura di S. Ferri. Milano: BUR, III, pp. 283-289, 2002.
- [3] E. Bastianello, “Architetture dell'eco. Vincenzo Scamozzi e Athanasius Kircher, alle origini della scienza acustica”, *Atelier Antico*, no. 154, pp. 14-28, marzo 2018. doi.org/10.25432/1826-901X/2018.154.0006.
- [4] See also the recent publication E. Romeo, *Monumenta tempore mutant et mutatione manent. Conoscenza, conservazione e valorizzazione degli edifici ludici e teatrali di età classica*. Roma: WriteUp Site, 2021.
- [5] A. Astolfi, E. Bo, F. Aletta, L. Shtrepi, “Measurements of Acoustical Parameters in the Ancient Open-Air Theatre of Tyndaris (Sicily, Italy)”, *Applied Sciences*, August 2020. doi.org/10.3390/app10165680; E. Bo, L. Shtrepi, D. Pelegrín Garcia, G. Barbato, F. Aletta, A. Astolfi, “The Accuracy of Predicted Acoustical Parameters in Ancient Open-Air Theatres: A Case Study in Syracuse”, *Applied Sciences*, August 2018. doi.org/10.3390/app8081393.

- [6] L. Lavagna, L. Shtrepi, A. Farina, A. Bevilacqua, A. Astolfi, "Acoustic design optimization through the use of auralization: how does it sound?", *Proceedings of the 2nd Symposium: The Acoustics of Ancient Theatres, Verona, Italy, 2022*.
- [7] E. Morezzi, E. Romeo, and R. Rudiero, "Some thoughts on the conservation and enhancement of archaeological heritage", in *Best practice in heritage conservation management. From the world to Pompeii* (C. Gambardella, ed.), pp. 302-311, Napoli: L.V.M., 2014.
- [8] E. Romeo, "Paesaggi spettacolari. Conservazione e valorizzazione degli antichi edifici ludici e teatrali", *Agribusiness Paesaggio & Ambiente*, vol. XV, no. 1, pp. 17-25, 2012; E. Romeo, "Monumenta tempore mutant et mutatione manent. Conservazione e valorizzazione degli antichi edifici ludici e per lo spettacolo", *Confronti*, nos. 6-7, pp. 38-48, 2016.
- [9] E. Romeo and R. Rudiero, "Ruins and urban context: analysis towards conservation and enhancement", *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. XV, pp. 531-535, 2013; E. Romeo, "Presenze romane latenti nei tessuti urbani in area alpina e prealpina", in *Studi e ricerche per il sistema territoriale alpino occidentale* (C. Devoti, M. Naretto and M. Volpiano, eds.), pp. 401-419, Gubbio: ANCSA 2015.
- [10] G. Volpe, "Verso una visione olistica del patrimonio culturale e paesaggistico: alcune considerazioni sulla riforma Franceschini", in *Patrimonio e tutela in Italia. A cinquant'anni dall'istituzione della Commissione Franceschini (1964-2014)* (A. Longhi and E. Romeo eds.), pp. 15-25, Roma: WriteUp Site, 2019.
- [11] M. Pallottino, "Indagine sui Beni Archeologici", in *Per la salvezza dei Beni culturali in Italia. Atti e documenti della Commissione d'indagine per la tutela e valorizzazione del patrimonio storico, archeologico, artistico e del paesaggio*, vol. I, pp. 306-307, Roma: Editrice Colombo, 1967.
- [12] *Carta di Siracusa per la conservazione, fruizione e gestione delle architetture teatrali antiche*. The document was drafted during the 2nd International Conference *La materia e i Segni della Storia*, Siracusa 13-17 October 2004.
- [13] E. Romeo, *Paesaggio e spettacolo. Considerazioni sulla valorizzazione degli edifici ludici e teatrali*, in *Che almeno ne resti il ricordo* (E. Romeo and E. Morezzi, eds.), pp. 63-70, Roma: Aracne, 2012.
- [14] P. Ciancio Rossetto and G. Pisani Sartorio, *Teatri greci e romani*, Roma: Edizioni Seat, 1994; D. De Bernardi Ferrero, *Teatri classici in Asia Minore*, voll. I-IV, Roma: L'Erma di Bretschneider, 1974; D. De Bernardi Ferrero, G. Ciotta and P. Pensabene, *Il teatro di Hierapolis di Frigia*, Genova: De Ferrari, 2007; G. Tosi, *Gli edifici per spettacoli nell'Italia romana*, Roma: Quasar, 2003; F. Sear, *Roman Theatres: an architectural study*, Oxford: Oxford University Press, 2006; V. Cammineci, M. Concetta Parello and M. S. Rizzo, *Theaomai. Teatro e società in età ellenistica*, Firenze: All'Insegna del Giglio, 2019.
- [15] C. Varagnoli (ed), *Conservare il passato. Metodi ed esperienze di protezione e restauro nei siti archeologici*, Roma: Gangemi, 2005; B. Billeci, S. Gizzi and D. Scudino, *Il rudere tra conservazione e reintegrazione*, Roma: Gangemi, 2006.
- [16] E. Romeo, *Presenze romane latenti nei tessuti urbani in area alpina e prealpina*, in *Studi e ricerche per il sistema territoriale alpino occidentale* (C. Devoti, M. Naretto and M. Volpiano eds.), pp. 401-419, Gubbio: ANCSA 2015.
- [17] M.C. Preacco (ed.) *Augusta Bagiennorum, Celid*, Torino 2014, pp. 99-122.
- [18] E. Romeo, R. Rudiero, "Ruins and urban context: analysis towards conservation and enhancement", *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. XV, pp. 531-535, 2013.
- [19] S. Caccia Gherardini, *L'anfiteatro di Lucca nel palinsesto urbano. Studi e indagini per la conservazione*, Firenze: Didapress, 2016.
- [20] E. Romeo, *Riuso e sostenibilità culturale. Note sulla conservazione delle architetture per lo spettacolo*, in *Che almeno ne resti il ricordo* (E. Romeo and E. Morezzi, eds.), pp. 71-84, Roma: Aracne, 2012; E. Romeo, "Valorizzazione degli antichi edifici ludici e teatrali tra conservazione del rudere e sostenibilità d'uso", in *La cultura del restauro e della valorizzazione. Temi e problemi per un percorso internazionale di conoscenza* (S. Bertocci, G. Minutoli and S. Van Riel eds.), pp. 875-882, Firenze: Alinea, 2014.
- [21] S. Gizzi, "Il vuoto e il suo contrario nella progettazione architettonica e nel restauro", in *Topos e Progetto. Il vuoto* (Mario Manieri Elia ed.), pp. 69-87, Roma: Gangemi, 2011.
- [22] M. Cacciari, "Conservazione e memoria", *ANANKE*, no. 1, pp. 22-24, 1993.
- [23] M. Dezzi Bardeschi, "Archeologia e città: profondità d'ascolto e qualità del progetto", *ANANKE*, no. 59, pp. 2-3, 2010.
- [24] E. Morezzi, "La valorizzazione del teatro romano e dell'agorà di Elaiussa Sebaste attraverso l'uso della luce", in *Riflessioni sulla conservazione del patrimonio archeologico* (E. Romeo, E. Morezzi and R. Rudiero), pp. 195-216, Roma: Aracne 2014; E. Morezzi, "Landscape and necropolies between memory and actuality", in *Paesaggi culturali* (E. Romeo and M.A. Giusti eds.), pp. 35-42, Roma: Aracne, 2010.
- [25] E. Morezzi, "Il teatro di Elaiussa Sebaste in Turchia: tra conservazione e valorizzazione", *Confronti*, nos. 6-7, pp. 127-133, 2017.
- [26] See the bibliography of E. Romeo, footnote 1.
- [27] R. Pickard (ed.), *European cultural heritage (Volume II). A review of policies and practice*. Strasbourg: Council of Europe Publishing, 2002.
- [28] Including the ATHENA and ERATO Projects. C. Bianchini, *Documentation of mediterranean ancient theatres. ATHENA's activities in Mérida*. Roma: Gangemi, 2013; W. Fuchs, "The Geometric Language of Roman Theater Design", *Nexus Network Journal*, vol. 21, no. 3, pp. 547-590, 2019 (part. 1: doi.org/10.1007/s00004-019-00434-7; part 2: doi.org/10.1007/s00004-019-00436-5); J.H. Rindel and M. Lisa Nielsen, "The ERATO project and its contribution to our understanding of the acoustics of ancient Greek and Roman theatres", in *Proc. of ERATO Project Symposium*, pp. 1-10, 2006.
- [29] J.-C. Moretti, "L'architecture des théâtres en Grèce antique avant l'époque impériale: un point de vue sur les études publiées entre 1994 et 2014", *Perspective – La revue de l'INHA*, no. 2, p. 196, 2014.
- [30] *Teatri antichi nell'area del Mediterraneo. Conservazione programmata e fruizione sostenibile. Contributi analitici alla Carta del rischio*, p. 28, Palermo: Regione siciliana, 2007.
- [31] Consider, for example, the Frejus arena. E. Romeo, "Alcune riflessioni sulla conservazione e valorizzazione degli antichi edifici ludici e teatrali gallo-romani", *Restauro Archeologico*, no. 1, pp. 14-37, 2015. doi.org/10.13128/RA-17572.
- [32] M. Augé, *Rovine e macerie. Il senso del tempo*, Torino: Bollati Boringhieri, 2004.
- [33] E. Morezzi, *Gli edifici per lo spettacolo di età classica: l'impossibile conservazione dell'abbandono e la traduzione del valore culturale*, in *Monumenta tempore mutant et mutatione manent. Conoscenza, conservazione e valorizzazione degli edifici*

- Iudici e teatrali di età classica* (E. Romeo), pp. 481-492, Roma: WriteUp Site, 2021.
- [34] L. Migliorati, "Il futuro delle nostre città è nello spettacolo?", *Quaderni di Archeologia d'Abruzzo*, no. 2, p. 182, 2010.
- [35] L. Cappelli, *L'accessibilità multiscalare e la fruizione inclusiva. Questioni metodologiche per il restauro di antichi edifici ludici e per lo spettacolo*, in *Monumenta tempore mutant et mutatione manent. Conoscenza, conservazione e valorizzazione degli edifici ludici e teatrali di età classica* (E. Romeo), pp. 493-513, Roma: WriteUp Site, 2021.
- [36] A. Pane, *Oltre le linee guida: l'accessibilità delle aree archeologiche e il caso di Pompei*, in *Pompei accessibile. Per una fruizione ampliata del sito archeologico* (R. Picone, ed.), p. 70, Roma: L'Erma di Bretschneider, 2013.
- [37] P. Mascilli Migliorini, "Manufatto, preesistenza e archetipo. Avventurose vicende degli anfiteatri e dei teatri antichi", *Confronti*, nos. 6-7, p. 49, 2016.
- [38] G. Calcani, "I beni culturali tra memoria e progetto per una cultura di pace", *Processi Storici e Politiche di Pace*, no. 3, p. 23, 2007.
- [39] E. Romeo, "Quale storia e quali teorie del restauro nell'era della globalizzazione culturale?" in *RICerca/REStaurò*, pp. 134-144, Roma: Edizioni Quasar, 2017.
- [40] If they are functional to the illustration of history and dynamics which would not be visible otherwise: these include catastrophic events, such as earthquakes. R. Rudiero, "Valorizzare un paesaggio archeologico: proposte per Elaiussa Sebaste", *Cultura e prassi della conservazione in Turchia* (E. Romeo), pp. 145-176, Roma: WriteUp Site, 2020.
- [41] M. Limoncelli, "Ricostruzioni digitali per lo studio degli spazi teatrali dall'età arcaica all'età imperiale: alcuni casi studio", in *Gli spazi del teatro greco e latino. Indagini archeologiche e ricostruzioni digitali. Visioni e prospettive* (E. Matelli, ed.), Milano: Educatt, 2019.
- [42] R. Pane, *Attualità e dialettica del restauro. Educazione all'arte, teoria della conservazione e del restauro dei monumenti*. Chieti: Solfanelli, 1987.
- [43] S. Caccia Gherardini, *L'eccezione come regola: il paradosso teorico del restauro*. Firenze: Didapress, 2019.
- [44] *The Council of Europe Framework Convention on the Value of Cultural Heritage for Society*, Faro 2005.
- [45] D. Fiorani, "Materiale/immateriale: frontiere del restauro", *Materiali e Strutture*, nos. 5-6, pp. 9-23, 2014.
- [46] R. Rudiero, *Comunità patrimoniali tra memoria e identità. Conoscenza, conservazione e valorizzazione nelle Valli valdesi*, pp. 15-40. Perosa Argentina: LAReditore, 2020; L. Pavan-Woolfe and S. Pinton (eds.), *Il valore del patrimonio culturale per la società e la comunità. La Convenzione del Consiglio d'Europa tra teoria e prassi*. Padova: Linea, 2019.
- [47] M.A. Giusti, "Complessità", *ANANKE*, no. 72, pp. 46-47, 2014.

The function of the First Ancient Theatre of Larissa within the soundscape of the contemporary urban fabric

Kalliopi Chourmouziadou

Department of Interior Architecture,
School of Design Sciences,
International Hellenic University
School of Applied Arts and Sustainable
Design, Hellenic Open University
5 Omirou str., 55236, Thessaloniki, Greece
k.chourmouziadou@windowslive.com

Ricevuto: 29/10/2022

Accettato: 21/12/2022

DOI: 10.3280/ria1-2023oa14848

ISSN: 0393-1110

ISSNe: 2385-2615

During the process of urban development in Greece a part of the First Ancient Theatre of Larissa was revealed. Today, after several expropriations and support frameworks, the theatre is fully excavated and partly reconstructed. Recently, an International Open Ideas Competition was launched for the urban regeneration of the surrounding area and the enhancement of the theatre's value and function. This paper presents the historic information of the theatre, it describes its evolution through the centuries, responding to the city's development, it investigates its acoustics based on previous measurements, noise maps, land use and the contemporary soundscape. Moreover, it discusses the competition axes and urban design approaches aiming to identify the effect of the application of design proposals to the theatre's function and future use.

Keywords: acoustics, ancient, theatre, soundscape, urban design

1 | Introduction

The process of urban development of Greek cities in the mid-20th century, involved construction procedures that revealed a palimpsest of the cities' history, a layering of materials and structures. In Larissa, a part of the First Ancient Theatre of the city was revealed during the construction of new residential buildings. Today, after several expropriations, two Community Support Frameworks and research sub-projects, the theatre is fully excavated and partly restored.

Aiming to introduce the theatre to the public, not only as a monument but also as an active cultural landmark, an International Open Ideas Competition was launched in 2021, to reconsider its reflection on its surroundings and the wider central area. The objectives of the competition included monument connections, enhancement and enrichment of the theatre's value, functional issues for its operation and landscape design.

This paper presents the First Ancient Theatre of Larissa, it discusses the contemporary soundscape by overlaying noise maps and sound sources that rely on land uses, discussing recent research on the acoustics of the theatre as well as urban design approaches, as part of an overall investigation in the fields of soundscape planning, urban design, architecture and noise control that could be considered in similar cases, establishing the cultural significance of the monument, incorporating it in the city's contemporary social life and facilitating its use for performances.

2 | Background information: the story of the First Ancient Theatre of Larissa

In many Greek cities construction procedures of the 20th century provided information of previous eras, a palimpsest of their history, translated into a layering of materials that

led the researchers back to antiquity, Neolithic, Classic, Hellenistic or Roman times. The palimpsest of Thessaloniki is widely discussed, especially in relation to the present construction of the underground. Similarly, in Larissa, the fourth largest city in Greece, a part of the First Ancient Theatre of the city was revealed – namely a part of the *koilon* – during the construction of a new residential building in 1968. The new building was erected, despite the Ephorate of Antiquities' opposition and, after several years of discussion, the expropriation was completed in 1979, and the building was demolished in 1981. Today, after two Community Support Frameworks and several research sub-projects the theatre is fully revealed. Recent studies have investigated its potential regarding the cultural and financial development of the city and school education and it is important for the authorities to consider all parameters for its optimum use.

However, its position in the city centre, next to high rise buildings can result in acoustic conditions inappropriate for its use, while commercial activity and nightlife of the area increase background noise. How can the theatre be used for performances again while all city functions remain untouched? Is it possible to limit background noise and allow for optimum conditions of speech intelligibility?

In an attempt to open the theatre to the public, not only as a monument but also as an active cultural landmark, an International Open Ideas Competition was launched in 2021, to «reconsider the theatre's reflection to its surroundings and the larger central area» [1]. The objectives of the competition include carving the city's character to establish a fresh identity, connections between the theatre and other important landmarks, establishing a new attraction, landscape design, enhancement and enrichment of the theatre's value as a landmark and functional issues for the theatre's operation – namely organisation of paths, entrances / exits and support-

ing spaces. The competition participants were provided with a considerable number of maps, plans, elevations and technical reports. However, no mention had been made to performance conditions that should take into consideration its acoustics, the land use of the surrounding area, existing noise maps and present background noise, future noise control, the evolving city's soundscape that continuously changes during the day and night.

A need thus arises to discuss the theatre's position within the urban fabric, mainly in terms of the acoustic environment; and consequently, to develop guidance for its contemporary use.

2.1 | The palimpsest of the theatre

The First Ancient Theatre of Larissa, at the north-eastern part of the Thessalian plain, near the banks of river Peneios (Pinios), was inhabited, developed and reconstructed at the same location for many centuries. The reuse of the constructing material of ancient public buildings, markets, temples and the city walls during the development of the city throughout the centuries was common. Therefore, only a few monuments have survived, including the two ancient theatres [2].

The First Ancient Theatre was constructed on the slope of Frourio hill (*frourio* in Greek means fortress), as part of the fortified citadel of the ancient city, developed on top of a prehistoric Neolithic settlement. The ancient city being surrounded by Pinios developed only towards the south and east of the citadel, since the north and west sides were restricted by the river. The First Ancient Theatre's construction is chronologically placed in the 1st half of the 3rd century BC. It was one of the largest ancient theatres in Greece, with a 10.000 audience capacity, and it is suggested that it also served as a public place of congregation of the citizens of Larissa and the wider area of Thessaly.

The theatre accommodated events until the 4th century A.D. – late Roman times. Following the construction methods of the Classic and Hellenistic times [3], the *koilon* was initially formed on the hillside, later covered by marble. It was divided by the *diazoma* to the main theatre, consisting of twenty-five rows of seats including the *proedriai* (seats of honour and sponsors), and the *epitheatre*, the upper part of the *koilon*, consisting of fifteen rows [4]. The orchestra, measuring 25.50m in diameter, was initially covered by marble and later by soil to accommodate Roman fights. It was encircled by a sewage corridor of 1.90m width. The *skene*, the stage building, which is relatively well preserved, can be associated with three construction phases. The first, during the original construction of the *koilon* and the retaining walls, was a *skene* 37.50m in length and 3m height, consisting of four rooms. Later, in early 2nd century B.C., a 20m long and 2m wide *proskenion* was added, while in Roman times Doric semi-columns, marble linings and honorary inscriptions for emperors were added. In Hellenistic times the theatre was functionally related with the worship of God Dionysus, functionally

connected with temples, and the performance of tragedy and comedy, whereas in Roman times it was converted into an arena, to allow performances of animal fights. The latter led to the citizens' initiative to construct the Second Ancient Theatre of Larissa (1st century B.C.) to accommodate more collective and participatory events.

The theatre underwent various design stages and modifications, also due to earthquake activity (1st century B.C. and 7th century A.D.). During the Byzantine years the lowest part was buried, whereas in the late years of the Ottoman Empire a complex of buildings covered the theatre's area. For their construction seats of the ancient theatre were used as a building material. Up to 1985, after seventeen centuries of the city's development in layers and residential buildings' construction, the theatre area was fully covered, while two main streets, Al. Papanastasiou str. and El. Venizelou str. bisected the theatre from north to south and from east to west respectively. The progressive development of the city in the 20th century laid the foundation for the present exploitation of the theatre. In 1910 and 1968 preparations for the foundations of new buildings revealed parts of the *skene* and the *koilon* respectively. Figure 1 illustrates the site plan of the theatre area in 1968, retrieved from the material provided to the competition participants [1].

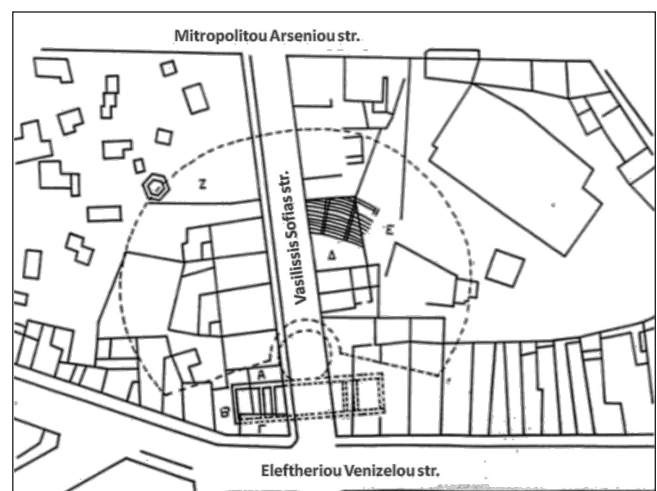


Fig. 1 – Site plan of the First Theatre of Larissa area in 1968

By 1985 the north-east part of the theatre had been revealed, whereas the south and west remained under other constructions. Between 1977 and 2008, after several expropriations, private and public building demolitions and street abolishment, the *epitheatre*'s area (only traces of which still exist), the *skene*, the west and east entrances (*parodoi*), the latter leading through a pathway to the Second Ancient Theatre, were found [5]. Marble seats used in the buildings' infrastructure were discovered and transferred to appropriate places. Recently, the Central Board of Antiquities of Greece approved the restoration of the theatre – initially the *koilon* to its latest architectural phase (arena), and later the retaining walls, the stage building, which is the best-preserved part

of the monument, and the accessibility [6]. Figure 2 illustrates the plan and section of the theatre in its present condition, compared to its original layout.

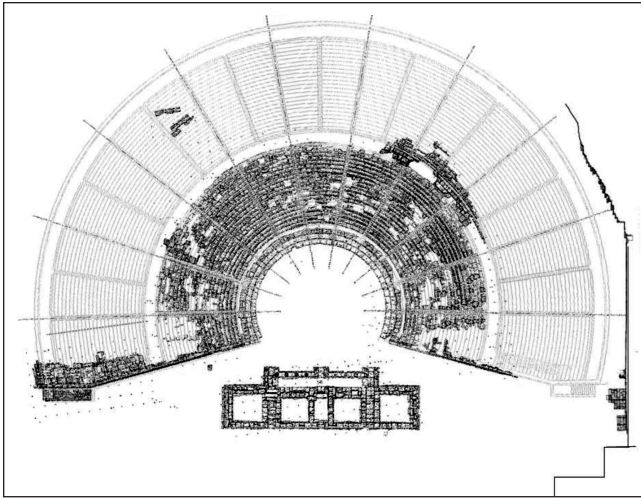


Fig. 2 – Plan and section of the First Theatre of Larissa, in the present condition (black) and the original layout (grey)

3 | Contemporary use of the theatre: acoustics and soundscape

Building heritage is a multidisciplinary field of study, involving history, social science, architecture and engineering. Since the revival of ancient drama in the 20th century, many ancient theatres have been excavated, investigated and restored. Research has revealed the effectiveness of their architectural evolution, from the Classic to the Hellenistic and later the Roman times, on the acoustics [3]. Moreover, the process of the *skene*'s evolution enabled conventional use during the dramatic performances and changed the focal point from the orchestra to the stage, allowing for further enhancement of the actors' voices due to relative source-receiver heights. In some cases, the theatre's restoration was accompanied by appropriate architectural and acoustic interventions to ensure optimum visual and acoustic conditions during their contemporary use. Studies have indicated the contribution of ephemeral scenery, designed and applied to the theatres for performance purposes to replace missing stage buildings, to the soundscape of ancient theatres, either positively or negatively [7], [8], and [9].

However, although scenery application can activate the acoustic capabilities of an open-air theatre, an important factor for the acoustic quality of many ancient theatres was low background noise, important for the unassisted speech to be audible. Contemporary conditions – theatres situated in city centres or nearby busy roads – imply the necessity of an acoustic treatment to ensure optimum conditions during performances [10]. Recent research on European cities has indicated the significance of the soundscape approach for the preservation and promotion of cultural heritage [11], where appropriate architectural and urban design can contribute to

the overall experience and comfort, depending on the uniqueness of each theatre, its position, its construction characteristics and background noise.

3.1 | Acoustic analysis

Regarding the First Ancient Theatre of Larissa, a recent preliminary study focused on the acoustics of the unoccupied theatre in its present condition – with the low part of the *koilon* partly restored [12]. The measurements were conducted for three rows of seats and three vertical angles with the use of an omni-directional free field microphone for acoustic parameters, a binaural head for interaural cross correlation (IACC) and auralization and a sound pressure level (SPL) meter for direct measurement of the SPL differences and ambient noise. The results present a variation in SPL with distance, comparable to Epidaurus, exceptional values of clarity C80 (dB) and definition D50 (%) and excellent speech intelligibility, especially in long distances. However, the measurements were performed on a weekend, with closed restaurants and cafes, with some noise caused by people and wind at the top of the Frourio Hill, with signal-to-noise ratio (SNR) above 30dB.

3.2 | Soundscape investigation

The city is a place of coexistence of many different social groups, a synthesis of architectural forms, deriving from different socio-political circumstances over the centuries. Identifying and studying the independent elements that form the collage of urban space can lead to understanding the development and function of the city [13], based on the context, background, prior experiences, familiarity with the place, so that each person constructs a different image of the city. According to Lynch [14], grouping these images reveals common elements that emerge as characteristics of the city. He distinguishes five types of elements that constitute its structural features (paths, edges, districts, nodes and landmarks), the interrelations of which determine the clarity of the city's 'imageability'. Similarly, as previous research has indicated [15], one can identify such elements of the urban fabric associated with auditory perception.

In this case study, namely the First Ancient Theatre of Larissa, the elements defining the city can be applied to the surrounding urban fabric. Adjacent buildings as well as the high retaining wall behind the *skene* act as edges for the acoustic environment, reflecting sound, whereas congested pedestrian roads are paths, constant linear sources. Moreover, nodes are represented by cafes and restaurants. The acoustic environment of the urban fabric surrounding the theatre was investigated through the collection of the latest noise maps [16] and the use of the sound map technique, namely the visual representation of the sound sources identified in the area, as a research tool from Amphoux's 1st approach, "sound memory" [17].

Figures 3 and 4 present the overlapping of the two illustrations, namely the noise maps that present the day-evening-night level (Lden) and night level (Ln) and the sound map that focuses on land use, characteristically providing different sound sources for day and night. As expected, linear sources provide the effect of boundaries and omnidirectional sources constitute distinct features to the sound environment. Size of symbols reflects intensity of phenomena. Traffic noise prevails (Lden>70dB that exceeds 75dB at crossroads – Ln>60-65dB), forming strict acoustic boundaries at the perimeter, intruding the area where no building shells exist. At this end, an important decision by the municipality to demolish the two building blocks marked with black at the south of the theatre will increase the impact of traffic noise at the area.

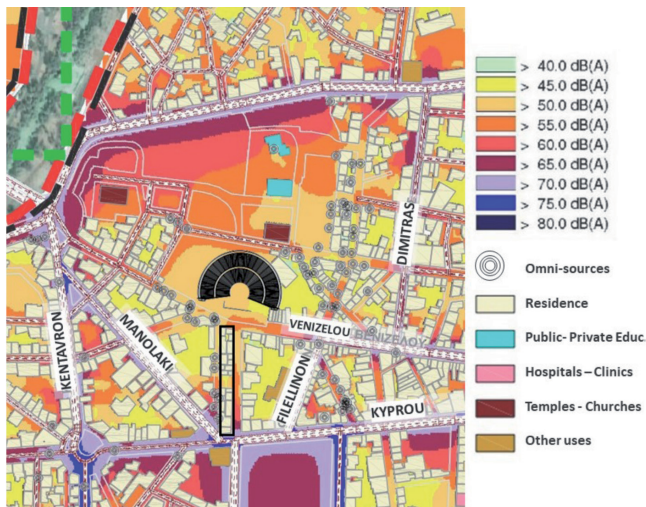


Fig. 3 – Lden map with overlapping sound sources

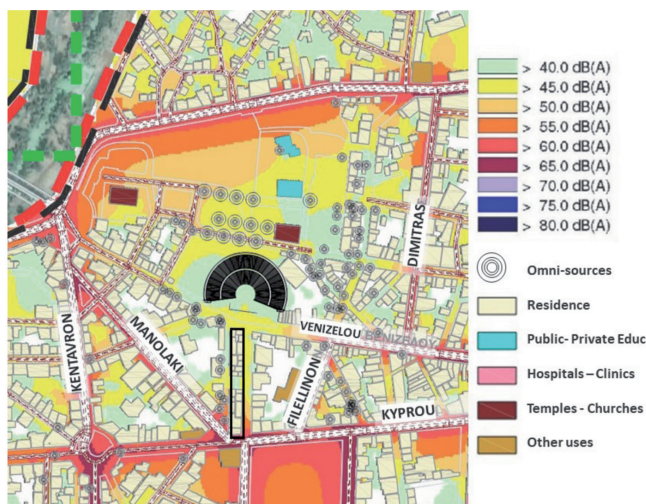


Fig. 4 – Ln map with overlapping sound sources

Pedestrian roads surrounding the theatre present lower values in Lden and Ln (56-60 and 45-55dB respectively), while the Lden and Ln at the theatre is above 50-55dBA and 40-45dBA respectively. It needs to be mentioned that

these noise maps (created in 2013) present residence as the prevalent land use surrounding the theatre. Since then, the city has evolved and, apart from its commercial life, the recreational quarter (cafes, restaurants, bars etc.) has moved from the city centre to the eastern and northern parts of the theatre, as indicated by the omnidirectional source symbols. In total, 69 bars and restaurants are located in this area, out of 82 at this part of the city, all of which mostly use their outdoor space. Additionally, a recent urban installation created a promenade and resting points at the linear pathway at the tangent of the *epitheatre* (former Arseniou str) and, as can be seen in Figure 5, that area is the new “meeting point” (symbolised in Figure 4 by the large omnidirectional sources). During the day, traffic noise and bird singing are the major sound sources, whereas in the evening and late night Frourio Hill accommodates several thousands of young people. For the present study, additional measurements were performed early in the afternoon, with an average of 71.8dB (min 61.7dB, max 87.5dB) at the top of the theatre (M. Arseniou str.), and 70.0dB (min 48.9dB, max 82.8dB) at the pedestrian road behind the stage building (El. Venizelou str.).



Fig. 5 – Photos of the area surrounding theatre in the evening

3.3 | Discussion on Future Urban Design

Regarding the International Competition on the design of the area surrounding the theatre, this section presents some reflections on the overall effect of design proposals on the acoustic and performance conditions of the theatre. After careful examination of the proposals, one can clearly identify that the functionality of the theatre was taken under consideration as far as its operability is concerned (entrances, exits etc.). Entries' proposals that stood out include new city tower landmarks (1st prize) or sheds (3rd/4th/5th prizes), replacing the soon-to-be-demolished building blocks, which would reduce traffic noise propagation from the main road but at the same time create visual obstacles for the view of the theatre. Proposals (2nd prize) that incorporate movable sound barriers behind the *skene* could help reduce external noise coming from the paved Venizelou str. Crossing the *epitheatre* with new pathways (3rd prize) or allowing the public to walk through

the skene (5th prize) would not assist the theatre's operation, neither dramatically nor acoustically. Figure 6 illustrates the competition prizes.

As far as the adjacent buildings are concerned, a suggestion for the future could include the treatment of the building shells that act as sound reflectors, which has already been mentioned in previous guidelines for urban sound propagation [11], as an important factor that would contribute positively to the acoustic performance of the theatre. The analysis presented in this paper will be further investigated through the soundscape approach, which will incorporate organised soundwalks, objective and subjective evaluation and analysis, based on methodology that has been applied in previous studies [11], [15], [18].

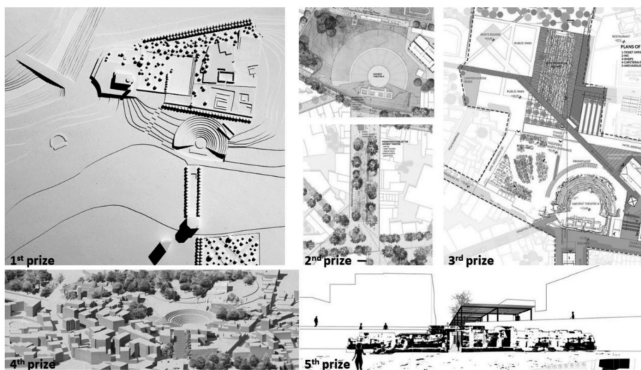


Fig. 6 – Urban design proposals, competition prizes

4 | Conclusions

Considering the wider theatre area as surrounded by road axes, one can easily distinguish three areas: the high density building area at the east, where commercial uses and leisure are mostly concentrated, the open area at the top of the Fourio hill that provides a vibrant and rich soundscape at the north, fluctuating in level and sound source categories according to the season and time, and an urban environment, concentrating commercial, leisure, administrative, educational and similar functions at the south and west. The distinction coincides with the spatial distribution of existing land uses.

Overall, establishing the cultural significance of theatre as a monument and ensuring its operation, requires an interdisciplinary study that will reconsider the impact of the surrounding land use on the soundscape, apply urban design decisions for monument connections and architectural design for building treatments. Future research based on the soundscape approach, combining measurement and subjective evaluation, can form the basis for the theatre's functionality. Furthermore, acoustic simulation of the restored theatre within its surroundings can be carried out to suggest further improvements and scenery design applications.

References

- [1] Municipality of Larissa, International Open Ideas Competition for the design of the surrounding area of the Ancient Theatre A' in Larissa. Goals and objectives, 2021. www.saata-competition.gr/the-project/ (accessed October 24, 2022).
- [2] Hellenic Ministry of Culture and Sports Scientific Committee, Project: Maintenance – Restoration and enhancement: Ancient Theatre of Larissa, D' phase. Operational Programme Competitiveness and Entrepreneurship 2007 – 2013 (OPCE II) Co-funded by Greece and the European Union, 2014.
- [3] K. Chourmouziadou, J. Kang, Acoustic evolution of ancient Greek and Roman theatres, *Applied Acoustics* 69 no. 6 (2008) 514-529. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2006.12.009>.
- [4] A. Tzafalias, The ancient theatre of Larisa, in *Proc. of the First Historical-Archaeological Symposium*, Municipality of Larisa, Larisa, 1985: pp. 162-185.
- [6] A. Tzafalias, The work of IE' EPKA of Larisa, in *The work of the Ephorates of Antiquities and Modern Monuments of the Ministry of Culture in Thessaly and the wider area (1990-1998)*, 1st Scientific Meeting, Volos, 2000: pp. 91-96.
- [6] Greek Democracy-Region of Thessaly, Inclusion of the Act 'Restoration of the Ancient Theatre of Larissa – Phase E' with OPS Code 5041781 in the Operational Program "Regional Operational Program of Thessaly 2014-2020, Special Management Service of Business Program of the Region of Thessaly, 2019.
- [7] K. Chourmouziadou J. Kang, Acoustic evolution of ancient theatres and the effects of scenery, in: B.N. Weiss (Eds.), *New Research on Acoustics*, Nova Science Publishers, Inc., New York, 2008: pp. 221-242.
- [8] N. Barkas, The contribution of the stage design to the acoustics of ancient Greek theatres, *Acoustics* 2019 1, no. 1 (2019) pp. 337-353. <https://doi.org/10.3390/acoustics1010018>.
- [9] E. Bo, A. Astolfi, L. Strepì, M. Rychtarikova, D. Pelegrin-Garcia, G. Genta, The acoustic influence of the scenery on the audience sound perception: the case of the ancient theatre of Syracuse, in: *Proc. of Forum Acusticum*, Krakow, 2014.
- [10] K. Chourmouziadou, J. Kang, Contemporary soundscape of ancient theatres, *Journal of the Acoustical Society of America* 123 no. 5 (2008) 3395.
- [11] J.L. Bento Coelho, K. Chourmouziadou, Ö. Axelsson, M. Boubezari, *Soundscape of European Cities and Landscapes – Creating and Designing*, in: J. Kang, K. Chourmouziadou, K. Sakantamis, B. Wang, Y. Hao (Eds), *COST TUD Action TD0804. Soundscape of European Cities and Landscapes*, Soundscape-COST, Oxford, 2013: pp. 148-157.
- [12] G. Kamaris, J. Mourtzopoulos, D.L. Karagounis, S.D. Tsanaktsidou, The acoustics of the recently excavated Larissa Theatre A, in: *Proc. of the 2nd Symposium The Acoustics of Ancient Theatres*, Verona, 2022.
- [13] C. Rowe, F. Koetter, *Collage City*, The MIT Press Cambridge (Mass.), 1978.
- [14] K. Lynch, *The image of the city*, The MIT Press Cambridge (Mass.), 1960.
- [15] E. Aidoni, K. Chourmouziadou, Investigating the Relationship between Soundscape and Collective Memory. The Application of Theories of Urban Space to Soundscape Analysis, in: *Proc. of Forum Acusticum*, Lyon, 2020: pp. 1441-1448.

- [16] Hellenic Ministry of Environment, Energy and Climate Change – Directorate of Environment, Noise Control Department, Evaluation of the Environmental period of Application 2002/49, Urban Complexes of Larisa and Volos, 2013.
- [17] P. Amphoux, L'identité sonore des villes Européennes. Guide méthodologique à l'usage des gestionnaires de la ville, des techniciens du son et des chercheurs en sciences sociales, CRESSON, Grenoble, 1993.
- [18] K. Sakantamis, K. Chourmouziadou, Chrono-Spheres. A study of Thessaloniki's urban sound-smell-scape, in: Proc. of Acoustics 2014, Hellenic Institute of Acoustics, Thessaloniki, 2014: pp. 20-28.

Preserving and managing the sonic heritage of the performative spaces of the past

Angela Bellia

Istituto di Scienze del Patrimonio Culturale,
Consiglio Nazionale delle Ricerche,
Via Cardinale Guglielmo Sanfelice, 8,
80134 Napoli
angela.bellia@cnr.it

Ricevuto: 8/11/2022

Accettato: 22/1/2023

DOI: 10.3280/ria1-2023oa14845

ISSN: 0393-1110

ISSNe: 2385-2615

The ongoing “Sonic Heritage” project aims to develop a new multidisciplinary analytical approach that models the relationship between the intangible aspects and the spatial configuration of performative spaces of the past in order to assess the sound pollution risks to cultural heritage of particular case studies in Italy, and to contribute to the monitoring of present-day sound and noise for the future management and preservation of historical cultural heritage.

Moreover, this project also concerns the risk assessment of sonic heritage in ancient theatrical spaces as well as the modern reuse of these theatrical structures and the relationship with their intangible aspects, environment, and landscape. This paper will present some issues raised by the “Sonic Heritage” project concerning the study of sonic heritage of ancient theatres and how sonic heritage could be preserved and managed in the future.

Keywords: sonic heritage, modern reuse of ancient theatres, historical acoustics

Conservazione e gestione del patrimonio sonoro degli spazi performativi del passato

Il progetto in corso “Sonic Heritage” mira a sviluppare un nuovo approccio analitico multidisciplinare che modelli la relazione tra gli aspetti intangibili e la configurazione spaziale degli spazi performativi del passato al fine di valutare il rischio dell'inquinamento acustico del patrimonio culturale di casi studio in Italia e di contribuire al monitoraggio dei suoni e dei rumori in questi spazi per la loro futura gestione e la tutela del patrimonio storico culturale.

Inoltre, questo progetto riguarda anche la valutazione del rischio del patrimonio sonoro negli spazi teatrali antichi, nonché il loro riutilizzo moderno e il rapporto sia con i loro aspetti immateriali sia con l'ambiente e il paesaggio. Questo contributo presenta alcune questioni sollevate dal progetto “Sonic Heritage” che riguardano lo studio del patrimonio sonoro dei teatri antichi e come questo possa essere preservato e gestito in futuro.

Parole chiave: patrimonio sonoro, riuso moderno dei teatri antichi, acustica storica

1 | Introduction

Ancient theatres are spread across a large territory that covers three continents (Africa, Asia, and Europe). Their presence bears witness to belonging to common roots, contributing to promote mutual understanding and intercultural dialogue. Their preservation and their continued use as spaces for cultural activities allow us to promote the encounter between the cultures, recovering the memory and awareness of a shared history through the arts and architecture [1]. The international community has urged the commitment to preserve ancient theatres from the ravages of time and the action of human beings: given that disastrous natural events, pollution and/or improper uses of these buildings and their related performative spaces are progressively damaging this cultural heritage, effective preservation planning policy based on the prevention and mitigation of vulnerabilities and dangers is vital. Despite its relevance to this field, no previous study has focused on the

risk assessment of acoustic features as sonic heritage of ancient theatres and the related performative spaces, some of which are now used as locations for concerts and modern performances.

The analysis of the acoustics characteristics of ancient theatres as sonic heritage of performative spaces devoted to communication and social interaction can reveal hidden aspects on how sound influenced people and what this meant for humans as individuals and social beings in the past. Regarding the research on sound as heritage, a preliminary remark is necessary, given that, especially in the ancient performative spaces of the past, the sonic features of these spaces played a fundamental role in improving the sonic experience related to musical and dancing performances, as well as that of theatrical plays performed in these ancient places. However, as something that does not tend to leave direct material traces, sound is not often considered in the archaeological field [2]. In the case of the performative spaces and architectural structures, the relationship between sound

and space is a fundamental aspect of understanding how sound and listening contributed to the appreciation of the properties and dimensions of the spaces, as well as to auditory culture in antiquity more generally.

This relationship can be investigated using a new approach in the study of material evidence in line with recent developments in archaeology over the past few decades. It is of particular relevance to new approaches focused on the understanding of how ancient people experienced their built and natural environment [3].

Given that sound has always been an omnipresent component of human experience, recent trends in archaeological inquiry have taken into consideration the importance of acoustics and what was heard in the past, analysing whether it is possible to ascribe cultural meanings to the sonic features of ancient spaces, and whether ancient architecture reacted to performance developments as well as to musical, vocal and dance practices by modifying or by designing new buildings and spaces for performances. Moreover, current research approaches to archaeoacoustics, soundscapes, and archaeomusicology have highlighted how new sonic hypotheses could be explored, especially thanks to the use of technology in these research fields, by using, e.g., 3D software model of the architectural structures and the SPreAD-GIS (System for the Prediction of Acoustic Detectability) [4]. In this regard, the study of sonic heritage through digital technology and virtual acoustic analysis is revealing how the commitment of researchers is proving to be invaluable in overcoming disciplinary barriers and fostering the inclusion of research on sonic heritage in the archaeological field and in the Humanities in general.

It is worth noting that physical and humanistic approaches consider the concept of “space” differently. In acoustics, a space is considered for the acoustic characteristics related to the physical sound properties in a place. In soundscapes, space physicality creates an understandable and evaluable environment in combination with sounds. For this reason, the space includes not only the place’s physicality but also social and public events as well as performances, creating the context of human experiences. Therefore, since the concept of space is entangled with sonic heritage, and all aspects of life in antiquity in general, it cannot merely be studied through quantitative methods. Comparing the subjects and methods from acoustic space to auditory space indicates a shift from quantity (in acoustics) to quality (in the soundscape) and from quality to wholeness of the “sonic fabric” (in auditory space): it demonstrates how the study model of these approaches is based on the pivotal concepts of human interaction and behaviour, sound, environment, and place [5]. This relationship provides results that are relevant to the study of sonic heritage. In this respect, exploring the properties of sound in performative contexts allows us to gain new insights into the social utility of ancient spaces and to explore the connection between acoustic and auditory space as an intangible consequence of the space’s tangible construction.

2 | The Sonic Heritage Project

The project “Sonic Heritage. Risk Assessment and Sustainable Development of Acoustic Environments of Ancient Theatres” which is being carried out at the Institute of Heritage Science, National Research Council of Italy, aims to develop a new multidisciplinary analytical approach that models the relationship between the intangible aspects and the spatial configuration of ancient theatrical structures in order to contribute to the monitoring of present-day sound and noise for their future protection and preservation and their modern reuse. Despite significant past and current work on the acoustics of ancient theatres, no project up until now has approached these issues with a systematic and interdisciplinary effort. For the first time, all the results have been integrated into an innovative research method from which experimental 3D reconstructions integrating acoustic models can be created. As such, this research presents a sustainable model for future integrative scientific studies in the fields of digital heritage and sonic heritage in theatrical spaces, and provides a new approach to reconstruct sound phenomena and auditory experience in ancient performative spaces [6], enhancing our understanding of the role that sound played in all aspects of society in the past.

Moreover, this project aims to explore the risk assessments of sonic heritage in theatrical spaces of particular case studies in Italy (the theatres of Syracuse and Segesta) and the relationship with their intangible aspects. When taking this understanding of sound into account, it seems surprising that important public spaces in antiquity, such as ancient theatres, have been investigated in the archaeological field almost exclusively with a focus on their visual function as performative spaces in which individuals or groups display and experience their collective or personal identities and status. Approaches such as these often fail to take into account the full range of sonic experiences that the performative spaces may have provided [7]. However, this was an important aspect of ancient life that can be investigated using a new approach to archaeological remains [8].

3 | Sonic Heritage of Ancient Theatres

By preserving ancient theatres as an important part of cultural heritage, it is possible to hand down not only the developments of theatrical architecture in the ancient world, but also to interpret the signs that different cultures have brought to the original model. Investigations into the geometric design and sonic dimension of these structures may help us to the knowledge of the wide variety of uses and functions that sound fulfilled in ancient buildings; it can also enhance our understanding of the links between the form and sonic function of ancient theatres, and their transformation from generic or conventional built structures to buildings that can amplify the active sound properties of architecture.

The sonic dimension of theatrical structures involves these performative spaces as places for interaction and communication in the natural and human sonic environment. Indeed, architectural structures, decoration, and surrounding landscapes created specific sonic features which influenced the soundscape of theatrical structures; these soundscapes consisted not only of music and recitations, but also natural elements, such as geophony and biophony [9]. The survey on these elements is useful to evaluate how sound in a landscape is a fundamental aspect of the complex relationship between spaces, social interactions, and the natural environment, as well as to assess how soundscape refers to human-environmental interactions and consists of all sounds present in any given environment, and how these sounds interact within that environment. This investigation provides critical information about sound in archaeological contexts and how sound is a valuable means of becoming better informed on the many different ways in which sound pervades spaces, architectural places, social interactions, and also human relationships.

By designing and constructing new theatrical shapes, architecture answered to the evolution of music and musical instrument developments as well as to vocal practices in the past [10]: sonic features of a particular space might have directed the choice of suitable places in order to gain a greater understanding of the sounds produced in that space. On the other hand, the development of architecture and the evolution of the form of theatrical spaces seem related to the presence of an ever-increasing number of participants in performances and assemblies, where performers and speakers needed to be clearly understood by the audience. In this regard, it is necessary to consider how the preservation of the acoustics of ancient theatres as well as the deeper knowledge of their original sonic features could be fundamental not only for the revival of ancient tragedies and comedies, but also to arrange appropriate musical and dance activities and modern performances in theatrical locations. Moreover, it is crucial to identify the risk factors related to their acoustics in order to minimise damage should they occur, thereby managing their future protection.

4 | The cases of Syracuse and Segesta

In this context, the theatres of Syracuse (5th c. BCE) (Figure 1) and Segesta (3rd c. BCE) (Figure 2) play a pivotal role given that modern concerts and festivals performed in these spaces pose a high risk for the buildings' sonic heritage. In this regard, it is worth mentioning the valuable work carried out by the research group at the Department of Energy, Politecnico of Torino, on the contemporary use of ancient theatres [11]. Their study was focused on the theatre in Syracuse as an archaeological site, with a particular focus on sustainable solutions for passive acoustics.

The survey of preservation best practices of these extraordinary monuments in Syracuse and in Segesta led institutions to host two important meetings on the safeguarding of ancient theatres in the Mediterranean area. These two



Fig. 1 – The theatre of Syracuse (5th c. BCE)



Fig. 2 – The theatre of Segesta (3rd c. BCE)

conferences were aimed at the application of the “Convention for the Protection of European Architectural Heritage” (Granada, 1985) and of the “European Convention for the Protection of Archaeological Heritage” (Malta, 1992). The results of the first meeting (Segesta, Trapani, Palermo, 17-20 September, 1995) were formulated in the “Declaration of Segesta” (1995), where there is a generic reference to acoustic issues and the need to limit acoustic emissions “in order to avoid harmful vibrations to the monuments and to respect the peace of the local people” [12].

The second meeting, “Ancient Theatres in the Mediterranean Area”, took place in Syracuse (13-17 October, 2004). One of this conference's stated goals was the approval of the Charter of Syracuse [13]. This is a political declaration reiterating the international community's commitment to the preservation and enhancement of cultural heritage and ancient theatres. Since the Declaration of Segesta (1995), many steps have been taken to develop a strategy that can allow us to enjoy these theatres in the future and allay the risks associated with their use. The Charter of Syracuse for the preservation, fruition, and management of ancient theatrical architectures in the Mediterranean was undoubtedly a major step forward, especially because it moved beyond the usual statements of principles. It has proved to be truly valuable, including operationally, in specific activities implemented by those involved in the management of ancient theatres. However, within this Charter, only a short paragraph is devoted to the preservation of the acoustic features of ancient theatres. Moreover, no

technical guidance has been provided, nor are there detailed references to the sonic characteristics of ancient theatres as heritage that is worth safeguarding and protecting.

It is worth remembering how recently we have witnessed a heated debate on the dangerous acoustic effects of the events in the theatre of Syracuse, where pop singers and rock musicians performed concerts during the Summer of 2022 [14]. The type of these concerts inevitably invited the audience to dance and to move in a lively manner in the fragile architectural structure of the theatre carved into the rock (Figure 3). Nobody can foresee the consequences of these performances. The lack of clear rules and acoustic parameters could be very dangerous for the future of this exceptional monument. Improper music and acoustics in this theatre, human behaviour during concerts, and unsuitable performance-induced hazards are persistently putting its sonic features under pressure, with an incremental annual frequency.



Fig. 3 – The theatrical architectural structure carved into the rock in Syracuse

Research devoted to risk assessments, sustainable solutions for mitigation, and adaptation strategies specifically dedicated to the building's sonic heritage protection are urgently needed for this theatre. When musical events are planned at this monument, the guidelines of the Charter should always be kept in mind, which allow the use of ancient theatres only if precise criteria are respected, starting with the current condition of each part of the theatrical structure: *cavea*, *orchestra*, stage buildings, and especially acoustics. The use of ancient monuments inevitably wears them out and can erase data useful for accurate historical and archaeological research as well as exploration of their sonic heritage. The use of theatres that have not been studied and adequately documented, or that are known to be vulnerable from the acoustic point of view, should not be used as locations for unsuitable performances. Moreover, a more appropriate choice by responsible institutions of musical repertoires and performance set-ups could guarantee respect and preservation for the management of the sonic heritage and acoustic features of ancient theatres in the future.

5 | Sound as heritage

Given the evocative potential of the original spatial configuration, the acoustics of ancient theatres is a valuable cultural asset which must be protected. The study of the sonic environment of these structures could provide us with new insights on how audiences interacted with soundscapes and landscapes. This is a novel way of approaching and analysing archaeological sites in order to speculate on the soundscape of performative spaces in the past as well as to explore how they were experienced. In this regard, the "Sonic Heritage" project is developing a new approach to the knowledge of the acoustic design of theatre buildings obtained through 3D virtual reconstructions and the creation of acoustic models, taking into consideration the philological reading of the original system and the theoretical verification of available data. Performing analysis on the best sound effects in ancient theatres will help significantly in establishing more precisely the sound-in-space nexus in performative spaces, combining their acoustic model with a new method for generating 3D models and for exploring the sonic properties of any performative space in the future.

It is worth noting that the application of new technologies to cultural heritage research has led to important methodological changes in the protection and enhancement of monuments. This new approach is stated in the objectives of the "International Council on Monuments and Sites" [15], an organisation which aims to restore meaning and preserve the memory of historic buildings, promoting the application of technology in the assessment of monuments: this is particularly interesting with regard to the recovery of evidence of sonic aspects in archaeological heritage [16]. Within this context, new methods for the analysis of historical sonic heritage of ancient theatres should be used, enabling the evaluation of their sound quality by using auralisation techniques [17] that allow cognitive and physical elements to be reproduced and combined. By using three-dimensional (3D) methods for ancient theatres mapping, these methods can be used to document all evidence, with particular attention given to the spaces used for social events. Moreover, topographic data can be processed using ArcGIS software for analysing the spatial relations of the architectural structures [18]; the systematic study of these basic elements, which are regularly a part of archaeological reporting, can be used in order to form the foundation for acoustic analysis. Collecting 3D coordinates on all material and managing this data with GIS software can provide a means for reconstructing the measurements and the original spatial and sonic, and environmental relationships that existed in these spaces [19]. These reconstructions are critical for answering questions about the processes of aural analysis.

Moreover, by combining the detection of acoustic emissions with computer processing, the acoustic impact of electronic sound amplification instruments on the theatrical buildings and the sonic stresses of these instruments on these ancient buildings [20-21] should be assessed with

close attention. In this regard, the acoustic parameters of the sustainability of modern performative activities in ancient theatres should be defined through specific acoustic analysis. In addition, the critical issues of theatrical buildings [22] should also be identified by evaluating the data of vibrations produced by acoustic sources in relation to different types of performances [23].

6 | Conclusions

The “Sonic Heritage” project will provide a new path of investigation in terms of the digital preservation of acoustic models of historical spaces and their sonic heritage. It will be, therefore, possible to critically explore the links between the propagation of sound and the shape evolution of the theatres as well as the role of the architectural elements' configuration in featuring the sonic characteristics of these ancient buildings [24-25]; these data will provide suitable suggestions to optimise the acoustic performance of theatre architecture, or to define the most suitable solutions for modern performances. Moreover, acoustical measurements and models of ancient theatres offer a robust additional layer to their preservation, especially for locations that are at-risk, thereby managing their future protection and their modern reuse.

In summary, a rediscovery of the influence of sound on ancient theatres could help to increase the wellbeing of modern societies and protect the environment from noise pollution of human origin. The results of the “Sonic Heritage” project can have the potential to better understand the current sonic environment and ecosystem and their meaning to human beings, as well as the physiological responses to a sound environment in the present as well as in the past.

Conclusioni

Il progetto “Sonic Heritage” fornirà un nuovo percorso di indagine in termini di conservazione digitale dei modelli acustici degli spazi storici e del loro patrimonio sonoro. Sarà, quindi, possibile esplorare criticamente i legami tra la propagazione del suono e l'evoluzione della forma dei teatri nonché il ruolo della configurazione degli elementi architettonici nel 'dare forma' alle caratteristiche sonore di questi antichi edifici [24-25]; questi dati potranno fornire opportuni suggerimenti per ottimizzare le prestazioni acustiche dell'architettura teatrale, o per definire le soluzioni più idonee per gli spettacoli. Inoltre, le misurazioni e i modelli acustici dei teatri antichi offrono ulteriori elementi per la loro tutela, soprattutto per quelli che sono a rischio, gestendo così la loro futura protezione e riutilizzo.

In conclusione, una riscoperta dell'influenza del suono dei teatri antichi può contribuire ad aumentare la consapevolezza sul ruolo svolto dal suono sul benessere sociale e a sollecitare la protezione dell'ambiente dall'inquinamento acustico prodotto dagli esseri umani. I risultati del progetto “Sonic Heritage” hanno il potenziale per favorire la comprensione dell'ambiente sonoro e dell'ecosistema, nonché delle risposte fisiologiche all'ambiente sonoro del presente come del passato.

Acknowledgements

The “Sonic Heritage” project is inspired by the author's previous research, namely “Stesichoros. The Archaeology of Sound in a Greek City in Sicily” (792058). This project was funded by the European Commission's Marie Skłodowska-Curie Actions Programme, Individual Fellowships.

This contribution is an extension of the previously published conference paper in the PROCEEDINGS of the 2nd Symposium: The Acoustics of Ancient Theatres, which took place on 6-8 July 2022 in Verona, Italy.

References

- [1] C. Marconi, *Between Performance and Identity: Context of Theatres*, in: K. Boshier (Ed.), *Theater Outside Athens. Drama in Greek Sicily and South Italy*, Cambridge University Press, Cambridge, GB, 2012: pp. 175-207.
- [2] S. Mills, *Auditory Archaeology. Understanding Sound and Hearing in the Past*, Routledge, Walnut Creek, CA, 2014, pp. 20-24.
- [3] J. Day, *Introduction: Making Senses of the Past*, in: J. Day (Ed.) *Making Senses of the Past: Toward a Sensory Archaeology*, Southern Illinois University Press, Carbondale and Edwardsville, 2013: pp. 1-31.
- [4] S. Graham et al., *Hearing the Past*, in: K. Klee, T. Compeau (Eds.), *Seeing the Past with Computers. Experiments with Augmented Reality and Computer Vision in History*, University of Michigan Press, Ann Arbor, 2019: pp. 224-236.
- [5] Y. Hamilakis, *Archaeology and the Senses: Human Experience, Memory, and Affect*, Cambridge University Press, Cambridge, 2013.
- [6] B. Blesser, L.-R. Salter, *Spaces Speak, Are You Listening? Experiencing Aural Architecture*, The MIT Press, Cambridge (MA) and London, 2007.
- [7] B. Blesser, L.-R. Salter, *Ancient Acoustic Spaces*, in: J. Sterne (Ed.), *The Sound Studies Reader*, Routledge, New York, 2012: pp. 186-196.
- [8] E. Holter et al., *Sounding Out Public Space in Late Republican Rome*, in: S. Butler, S. Nooter (Eds.), *Sound and the Ancient Senses*, Routledge, London and New York, 2019: pp. 44-60.
- [9] A. Farina, S. H. Gage, *Ecoacoustics. The Ecological Role of Sounds*, Wiley, Hoboken (NJ), 2017: pp. 13-24.
- [10] C. Guillebaud, C. Lavandier, *Introduction*, in: C. Guillebaud, C. Lavandier (Eds.), *Worship Sound Spaces. Architecture, Acoustics and Anthropology*, Routledge, London and New York, 2020: pp. 1-9.
- [11] E. Bo et al., *Between the Archaeological Site and the Contemporary Stage: An Example of Acoustic and Lighting Retrofit with Multifunctional Purpose in the Ancient Theatre of Syracuse*, *Energy Procedia* 78 (2015) 913-918. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.018>.
- [12] *Declaration of Segesta*: www.univeur.org/cuebc/downloads/PDF%20carte/86%20Segesta.pdf (accessed October 24, 2022).
- [13] *Charter of Syracuse*: www.univeur.org/cuebc/downloads/PDF%20carte/18.%20Carta%20di%20Siracusa.pdf (accessed October 24, 2022).
- [14] S. Fiore, *Il teatro di Siracusa è in ballo*, *Almanacco della Scienza del Consiglio Nazionale delle Ricerche* 19 (ottobre, 2022). <https://almanacco.cnr.it/articolo/4104/il-teatro-di-siracusa>

- e-ballo?fbclid=IwAR0xeZuJSxaOQ17WZd-av83JwVQ6YTG-_jnppdnK792Hb3_nR2D3mTply8 (accessed October 24, 2022).
- [15] European Communities, DigiCULT, Technological Landscapes for Tomorrow's Cultural Economy, Luxembourg, 2002: <https://cordis.europa.eu/news/rcn/101926/en> and European Commission. Information Society DG 2002, The DigiCULT Report: Technological landscapes for Tomorrow's Cultural Economy, Unlocking the Value of Cultural Heritage, Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg (accessed October 24, 2022).
- [16] A. Bellia, Towards a Digital Approach to the Listening to Ancient Places, *Heritage 4* (2021) 2470-2481. <https://doi.org/10.3390/heritage4030139>.
- [17] G. Iannace et al., The Large Theater of Pompeii: Acoustic Evolution, *Building Acoustics* 20.3 (2013) 215-227.
- [18] E. Stewart, 3D GIS and 'The Royaltie Of Sight': Recreating 'Prospects' and 'Perspectives' within an English Designed Landscape c. 1550-1660, *Digital Scholarship in the Humanities* 34.1 (2019) 179-189. <https://doi.org/10.1093/lc/fqz043>.
- [19] N. Masini, R. Lasaponara, Sensing the Past from Space: Approaches to Site Detection, in N. Masini, F. Soldovieri (eds.), *Sensing the Past From. Artifact to Historical Site*, Springer, Cham, 2017: pp. 23-60.
- [20] C. Manzetti, A New Methodology for Ancient Theatre Architecture Hypothesis Verification, in: *Conference International Forum – State Hermitage Museum (Saint Petersburg, Russia)*, 2018: pp. 115-125.
- [21] A. Farina et al., Digitally Acoustic Reconstruction of the Roman Theatre of Verona at its Original Shape, in: *2021 Immersive and 3D Audio: From Architecture to Automotive (I3DA)*, IEEE Xplore, 2021. doi: 10.1109/I3DA48870.2021.9610965.
- [22] F. Merli et al., The Roman Theatre of Benevento: Reconstruction of Sound Propagation with a Multichannel Microphone, in: *Immersive and 3D Audio: From Architecture to Automotive (I3DA)*, IEEE Xplore, 2021. doi: 10.1109/I3DA48870.2021.9610964.
- [23] A. Bellia, A. Bevilacqua, Rediscovering the Intangible Heritage of Past Performative Spaces: Interaction between Acoustics, Performance, and Architecture, *Heritage* 6.1 (2023) 319-332. <https://doi.org/10.3390/heritage6010016>.
- [24] N. Barkas. The Contribution of the Stage Design to the Acoustics of Ancient Greek Theatres, *Acoustics* 1.1 (2019) 337-353. <https://doi.org/10.3390/acoustics1010018>.
- [25] A. Bellia, Towards a Digital Approach to the Listening to Ancient Places, *Heritage 4* (2021) 2470-2481. <https://doi.org/10.3390/heritage4030139>.

La voce negli antichi spazi

Marco Francini

Conservatorio di Benevento,
Via Antonio Cinque, 5, 80131 Napoli
info@marcofrancini.com

Ricevuto: 22/10/2022

Accettato: 10/2/2023

DOI: 10.3280/ria1-2023oa14807

ISSN: 0393-1110

ISSNe: 2385-2615

La voce e il canto in luoghi storici e archeologici per viaggiare nel tempo attraverso il suono. Performance sonore e vocali attraverso la ricerca e la sperimentazione all'interno di spazi che hanno straordinarie architetture e riverberi. Avere una connessione con la profondità storica, geografica e culturale delle origini attraverso le nostre "Voci di Dentro" per creare "Altri Spazi" e migliorare le qualità percettive e di emissione vocale. Con voce e strumenti musicali è possibile improvvisare in totale libertà, ispirandosi alla forte relazione con i luoghi. La misurazione di alcune frequenze, in relazione alla voce e agli strumenti musicali, ci ha permesso di configurare alcune tonalità per migliorare il colore e il timbro sonoro. Infine abbiamo misurato l'IR di alcuni luoghi per comporre un nostro database di riverberi allo scopo di poter riprodurre le ambientazioni dei luoghi in qualsiasi spazio performativo. Oltre all'esperienza artistica, terapeutica, sonora e sperimentale, il progetto si propone come un percorso di valorizzare e fruizione dei siti storici, archeologici, moderni e postmoderni e della comunicazione tra antiche e nuove tradizioni, realizzando performance dal vivo e produzioni audiovisive. L'autore conduce, da oltre 10 anni, la sperimentazione e la ricerca de *La voce negli antichi spazi* in diverse università, convegni e accademie italiane.

Parole chiave: la voce, antichi spazi, luoghi storici, spazio, riverbero, timbro sonoro

The voice in the ancient space

Voice and singing in historical and archaeological places to travel through time through sound. Sound and vocal performances through research and experimentation within spaces that have extraordinary architectures and reverberations. To have a connection with the historical, geographical and cultural depth of the origins through our "Voices of Inside" to create "Other Spaces" and improve perceptual and vocal emission qualities. With Voice and musical instruments it's possible to improvise in total freedom, being inspired by the strong relationship with the places. The measurement of some frequencies, in relation to the voice and musical instruments, has allowed us to configure some tones to improve the color and sound timbre. Then we measured the IR of some places to compose our database of reverberations in order to be able to reproduce the settings of the places in any performative space. In addition to the artistic, therapeutic, sound and experimental experience, the project proposes itself as a path to enhance and enjoy historical, archaeological, modern and postmodern sites and communication between old and new traditions, creating live performances and audiovisual productions. The author has been bringing the experimentation and research of *The Voice in the Ancient Spaces* to various Italian universities, conferences and academies for over 10 years.

Keywords: the voice, ancient space, historical sites, space, reverberation, sound timbre

1 | Introduzione

La voce negli antichi spazi è un percorso di ricerca all'interno di luoghi che hanno particolari acustiche e singolari posizioni geografiche. La possibilità di emettere suoni con la voce e con alcuni strumenti musicali, all'interno di questi spazi, ci permette di stabilire una relazione molto forte con la storia dell'ambiente e del paesaggio circostante.

Entrare in un luogo archeologico-storico che ha determinate riverberazioni, emettere un suono, ascoltare e percepirne l'effetto è una delle esperienze più straordinarie che abbia mai fatto nella vita. Da qui è iniziato il mio

percorso di ricerca *La voce negli antichi spazi* all'interno di ambienti con i quali creo un rapporto speciale che dura da oltre vent'anni.

In una condizione del genere la voce si espande, si trasforma, ti avvolge e ti trasporta in altre dimensioni come se tutto il tuo corpo e la tua anima fossero agganciati ad un suono per viaggiare nel tempo in un "Altro Spazio" dove presente, passato e futuro convivono.

Insieme ad altri musicisti creiamo libere improvvisazioni con la voce e con strumenti musicali (corde, fiati, percussioni, conchiglie), talvolta usiamo anche materiali trovati sul posto come pietre, acqua, terra e rami.

La voce negli antichi spazi ha un valore simbolico potente e richiede sempre un tipo di performance con energia fisica e psichica molto intense. La percezione, la respirazione, l'emissione, l'ascolto, tutto viene amplificato e migliora le nostre qualità vitali.

È molto importante comprendere la *relazione voce spazio corpo con voce spazio ambiente*: da questa connessione nasce la mia ricerca che si sviluppa su più livelli e con diverse fasi di studio.

2 | Metodologia

2.1 | I sopralluoghi

Il primo aspetto de *La voce negli antichi spazi* è l'individuazione del sito attraverso i sopralluoghi, per comprenderne la storia, il mito e la connotazione geografica.

Il secondo elemento è la percezione dell'energia dello spazio che abbiamo individuato, osservarne l'architettura, il materiale di cui è composto, apprendere la sensazione olfattiva, il paesaggio sonoro circostante e soprattutto iniziare il test acustico con la voce e con alcuni strumenti musicali per stabilire il tipo di riverberazione e le eventuali frequenze di risonanza.

Attraverso le prime improvvisazioni vocali posso decidere quale tipo di sonorità e di emissione sono adatte allo spazio, compreso l'aspetto ritmico che è molto importante poiché alcune riverberazioni naturali permettono di creare, con gli strumenti percussivi, atmosfere straordinarie.

Per avere una conoscenza approfondita dei luoghi bisogna trascorrere molto tempo sul posto e lasciarsi trasportare dalle sensazioni che ci proiettano nel viaggio che stiamo per intraprendere. Catturare la memoria storica e farla vivere nel presente diventa un compito favoloso e affascinante.

Durante i sopralluoghi sono sempre accompagnato da un fonico che conosce bene la mia ricerca e da uno o due musicisti che collaborano con me da molto tempo.

Al termine di questa tappa iniziamo la fase di addestramento per la performance che andremo a fare.

2.2 | Studio

La letteratura delle analisi sonore dinamiche è vastissima e presuppone una buona conoscenza della matematica differenziale per poterla sondare approfonditamente; lungi in questa sede dall'avventurarsi in una analisi approfondita dal punto di vista tecnico-matematico, diciamo solo che per fortuna degli artisti, molti ingegneri hanno studiato tramite una funzione particolare (funzione Delta di Dirac) la possibilità di confrontare in tempo reale un segnale in entrata con un altro segnale di riferimento (IR) ed ottenere un segnale in uscita che si comporta così come definito in maniera analoga dall'IR stesso. Questa definizione è molto semplificata e comunque ancora oscura ma può essere resa chiara proprio dalla descrizione della modalità in cui noi abbiamo realizzato i nostri IR.

Il segnale di riferimento per questa tecnica di "fotografia" degli ambienti sonori deve essere "impulsivo" cioè brevissimo e intenso. Generalmente si adotta lo sparo di una cartuccia a salve, un ciack cinematografico o, in maniera molto più artigianale, con la chiusura immediata di un libro di grosso volume oppure dallo scoppio di un palloncino; quest'ultima è stata la nostra scelta. Così ci siamo recati nei luoghi storici dove volevamo "fotografare" la risposta sonora ambientale e abbiamo registrato alla massima risoluzione, in ripresa stereo e con microfono a condensatore, lo scoppio di un palloncino. Il gettito sonoro breve e intenso si è propagato nell'ambiente e ha generato tutto il completo insieme di riflessioni dirette e indirette (riflessioni delle riflessioni) nonché tutti gli specifici assorbimenti delle serie armoniche. Quindi l'impulso ha generato una risposta ambientale specifica e unica di quel luogo e noi l'abbiamo registrato digitalmente.

Questo scoppio registrato è esattamente IR descritto all'inizio. Una volta prodotti tutti gli impulsi, li abbiamo catalogati con una breve descrizione delle tecniche di ripresa. Nei vari luoghi abbiamo anche registrato un breve frammento vocale (reference) per poi poterlo confrontare con la simulazione dell'ambiente sonoro ripreso tramite l'IR da noi prodotto. Successivamente quindi abbiamo usato un DAW (Digital Audio Workstation) che ci consentisse di caricare i nostri IR su un plug-in (sottoprogramma interno al DAW per processare i segnali sonori) adatto allo scopo. Nel nostro caso abbiamo usato il plug-in Convology XT che dà la possibilità, tra le numerose funzioni, di caricare specifici IR personali e variarne alcuni parametri (EQ, lunghezza del campione e altri parametri più tecnici).

Infine abbiamo operato un confronto tra il frammento realmente cantato nel luogo (reference) e lo stesso frammento ricantato in studio senza alcun effetto (dry) e processato attraverso Convology XT in cui abbiamo caricato l'IR di quello specifico ambiente: l'analisi di confronto del nostro orecchio ci ha sorpresi molto positivamente in quanto le differenze che ci sono tra la reference e il canto prodotto in studio erano davvero molto poco percettibili se non quasi assenti.

2.3 | Preparazione

Nella fase di studio e preparazione stabiliamo l'eventuale Ensemble Musicale studiando i frammenti digitali, immaginando il tipo di acustica dello spazio e il carattere sonoro che vogliamo costruire.

Oltre alla parte creativa organizziamo l'aspetto fonico e tecnico per le riprese audio-video scegliendo accuratamente le attrezzature e i microfoni adatti alle circostanze.

Riguardo alla voce: approfondisco la poetica da utilizzare immergendomi nei testi della letteratura storica e mitologica, estrapolo frasi, citazioni, immagini che spesso abbino con elaborazioni create da me, inoltre cerco di comprendere quali fonemi e quali lingue siano più adatte alla prestazione, sebbene questo aspetto, viene condizionato dai momenti di improvvisazione vocale che andrò a fare nel luogo.

Infine creo dei canovacci musicali sulla base di tonalità che mi sembrano più adatte, ma lascio ampia libertà ai musicisti di creare e comporre.

2.4 | Performance

I giorni della performance de *La voce negli antichi spazi* sono sempre emozionanti e siamo tutti molto carichi di energia: prepariamo un primo set di ripresa audio esattamente come un vero e proprio ciak cinematografico e dopo alcuni secondi di silenzio si parte con le improvvisazioni.

L'aspetto che riguarda questa fase è quello di suonare liberamente immersi nelle riverberazioni naturali lasciandosi andare al flusso del momento. La durata dei brani varia in merito alle sensazioni, alle percezioni e agli sguardi dei musicisti.

Un altro elemento è quello di muoversi nello spazio in modo da creare diversi set audio che sfruttano le acustiche da varie angolazioni e prospettive e che agiscono sull'emissione sonora in maniera differente.

Altra componente importante è l'interplay fra i musicisti, basato sull'ascolto delle melodie, delle armonie e delle ritmiche che vengono prodotte.

Un altro elemento interessante riguarda la produzione degli armonici del suono: la spazializzazione vocale permette alla voce di produrre armonici che, in questo contesto, si ascoltano con grande naturalezza facilitando in maniera evidente la qualità del suono.

3 | La voce negli antichi spazi in Campania

3.1 | I luoghi storici

In ogni luogo abbiamo trascorso diverse ore per entrare in relazione con la sua acustica, il tipo di riverbero e la sua atmosfera. Ogni spazio impone sempre una sua intensità, un suo respiro e un suo tempo; bisogna essere molto pazienti e attenti a creare un rapporto autentico, ancestrale e profondo.

Chiese, castelli, templi, teatri, cave, grotte, ognuna di queste costruzioni conserva una memoria storica straordinaria che comunica con noi al di là del tempo. Con il suono e con la voce riusciamo a squarciare le dimensioni spazio temporali per connetterci con quella che Pitagora chiamava "armonia delle sfere".

I luoghi che hanno caratterizzato la mia ricerca in questi anni sono situati nella zona Flegrea Campana e nella città di Napoli.

Un'antica cisterna idrica, molto grande, costruita in epoca augustea e situata nella zona di Bacoli in provincia di Napoli. La Piscina Mirabilis venne interamente scavata nel tufo della collina nei pressi del porto, poco rialzata sul livello del mare. A pianta rettangolare, è molto alta ed è sormontata da un soffitto con volte a botte, sorretto da molti pilastri. Il riverbero di questa struttura è abbastanza omogeneo in ogni parte dello spazio e ha un ritardo di circa 3,5 s ma è



Fig. 1 – Piscina Mirabilis Bacoli, Napoli – ph Marco Francini
Pool of Mirabilis Bacoli, Napoli

soprattutto la sua architettura che agisce sul suono in maniera forte e incisiva oltre alla caratteristica dominante del tufo come materiale portante. Tutto ciò ha consentito di creare composizioni straordinarie in giornate intere di riprese audio. L'enorme spazialità interna ci ha permesso di muoverci liberamente con gli strumenti, determinando prospettive e geometrie sonore impossibili da ricreare in altri tipi di contesti fisici e virtuali.



Fig. 2 – Tempio di Mercurio Terme di Baia, Napoli – ph Marco Francini
Temple of Mercurio Ancient Baths, Napoli

All'interno del Parco Archeologico di Baia, una frazione del comune di Bacoli, è situato il settore "di Mercurio" così chiamato perché comprende un edificio che era stato inizialmente creduto un tempio dedicato a Mercurio, ma in realtà si trattava di un *frigidarium*, una piscina d'acqua fredda. La costruzione esternamente a pianta quadrata, aveva un ambiente interno circolare e una copertura a cupola che costituisce il più antico esempio di copertura sferica di ampie dimensioni. Risale alla fine del primo secolo a.C. e in *età severiana* furono aggiunti altri ambienti con decorazioni sontuose. La volta, posta a copertura dell'edificio, è dotata di un lucernario centrale realizzato attraverso l'utilizzo di grosse scaglie di tufo rese a forma di cuneo.

Il riverbero di questo luogo ha un ritardo di circa 6 s ed ogni azione performativa ha una fluidità straordinaria, sembra di essere immersi direttamente nel suono che si produce. La presenza di acqua all'interno dello spazio contribuisce alla

percezione dei suoni come se fossero *antiche creature marine* che parlano con noi da altri mondi. Volendo fare una codifica approssimativa potrei dire che la tonalità che risuona meglio delle altre è il F# insieme ad alcune frequenze della stessa scala musicale. Gli armonici della voce che si evidenziano con grande intensità a partire da F#2 sono 8°, 5°, 8°, 11#.



**Fig. 3 – Castello Maschio Angioino, Napoli – ph Marco Francini
Castle Male Angevin, Napoli**

Castel Nuovo, chiamato anche Maschio Angioino, è uno storico castello medievale e rinascimentale, nonché uno dei simboli della città di Napoli. La costruzione del suo nucleo antico, oggi in parte riemerso in seguito ad interventi di restauro ed esplorazione archeologica, si deve all'iniziativa di Carlo primo d'Angiò. Situato nei pressi del mare al centro della città, il castello presenta diverse sale con acustiche interessanti fra cui la Cappella Palatina e la Sala dei Baroni. Entrambe i luoghi sono rivolti verso il mare, con ampie finestre al loro interno. Il tufo e il piperno sono le pietre fondanti di tutta la costruzione.

In questo luogo la voce negli antichi spazi ci parla delle straordinarie vicende della storia di Napoli

4 | Tufo giallo

Molte delle costruzioni sotterranee che oggi la città di Napoli conserva gelosamente sono nate grazie alla massiccia presenza, sul territorio, di tufo che costituisce un valore prezioso per il territorio campano.

Il tufo napoletano è particolarmente adatto per *La voce negli antichi spazi* ed è conosciuto anche come tufo giallo, nasce dall'attività vulcanica dei Campi Flegrei. È la produzione di cenere che per i napoletani prende il nome di "pozzolana" a dare vita a questo particolare materiale, la cosiddetta "pozzolana" infatti è andata sedimentandosi nel mare, riemergendo poi a causa di pressioni tettoniche verificatesi, secondo gli esperti, circa trentacinquemila anni fa.

Il tufo è stato utilizzato dalle antiche civiltà insediatesi a Napoli per ricreare degli straordinari assetti abitati, che la città conserva ancora oggi in perfetto stato come incredibile eredità storica. La costruzione di opere architettoniche, scavate nel tufo, era resa possibile dalla capacità di isolamento

termico del materiale, che si mostrava anche abile nel contenere l'umidità.

Questa preziosa caratteristica è resa a sua volta possibile dalla proprietà di assorbimento delle zeoliti, minerali che compongono il tufo, arricchendolo di nuove e peculiari abilità. Sono proprio questi ultimi ad assimilare molecole d'acqua o a proscioglierle nuovamente, facendo del tufo un materiale freddo durante i mesi più caldi e caldo durante i mesi più freddi. Tali proprietà hanno il merito di rendere il tufo il materiale perfetto per la costruzione di opere e costruzioni, alcune delle quali oggi considerate dal valore inestimabile.

Tutto quanto il substrato geologico di Napoli deve alla formazione del tufo il suo valore. Ad esso deve molto anche il patrimonio storico-culturale cittadino, che è andato arricchendosi nel tempo proprio grazie alla presenza di questo materiale, sfruttato in modo magistrale e raffinato da greci e romani. Dal tufo napoletano infatti sono state ricavate le cave sotterranee. Tali cave funsero in antichità come catacombe, cripte, ipogei funerari, abitazioni, botteghe e opere di carattere militare.

5 | Relazioni, osservazioni, dati

La ricerca *La voce negli antichi spazi* ha prodotto negli anni dei risultati incredibili, dischi stampati oltre a conferenze, convegni, materiale video, audio e conoscenze acquisite.

- **Cd Echos vol. 1 edizioni Musica Maxima Magnetica** performance vocale con conchiglie, chitarra e percussioni (2001).
- **Cd Echos vol. 2** performance vocale con violoncello, sax, chitarra, tromba, conchiglie, arpa e percussioni (2017).
- Presentazione del progetto e performance-live *La voce negli antichi spazi* al **12° Corso internazionale foniatria e logopedia La voce artistica** (2019).
- Performance video-live per voce e violoncello *E-Nea-La voce negli antichi spazi* al Teatro Dante Alighieri di Ravenna, al **13° Corso internazionale foniatria e logopedia La voce artistica** (2021).
- Laboratorio di ricerca vocale presso la Basilica di San Paolo Maggiore, Piazza San Gaetano a Napoli, luogo-simbolo, punto di origine di Neapolis (2022).
- Presentazione del progetto *La voce negli antichi spazi* relatore alla Conferenza Internazionale "The Acoustics of Ancient Theatres" (2022).

Tutto il materiale raccolto, insieme all'esperienza su campo, ci ha permesso di fare considerazioni importanti e stabilire parametri più precisi.

Il primo dato importante è che la voce cambia e si trasforma in base ai luoghi nei quali viene prodotta dunque ci fa capire la stretta relazione che l'uomo ha con l'ambiente come se fosse un corpo unico.

Un'altra considerazione riguarda il suono, che si trasforma in qualcosa di potente e unico con una forza che mette in equilibrio tutte le nostre qualità estreme e opposte come dolce e violento, chiaro e scuro, malinconico e allegro, inquieto e felice.

Un altro aspetto riguarda la percezione dell'ascolto: ogni minimo movimento e ogni minima azione viene amplificata e sorretta dalla spazialità del luogo che riguarda non solo la sua riverberazione e risonanza ma anche il tipo di atmosfera che si crea. Potrei definire questo tipo di energia di due tipi, il primo composto da colori chiari e il secondo da colori scuri, comprendendo ogni sfumatura che si trova nel mezzo. Altro dato particolare riguarda l'ascolto delle registrazioni effettuate che abbiamo fatto con grande attenzione: ci siamo resi conto che alcuni suoni di strumenti musicali, in particolare percussioni, non si riconoscessero subito ma abbiamo dovuto ascoltarli ripetutamente per comprenderne la fonte. Tutto ciò mette in evidenza l'aspetto incredibile di una vera metamorfosi timbrica condizionata dal luogo e dalla sua energia viva.

6 | Conclusioni

La voce negli antichi spazi si sviluppa su due binari paralleli, da un lato la sperimentazione di nuove architetture musicali grazie ai meravigliosi riverberi di questi spazi e dall'altro la valorizzazione, sempre più mirata ed attenta, dei luoghi storici e dell'ambiente attraverso le esperienze della voce e del suono.

Il viaggio sonoro comunica nuove e antiche tradizioni, coinvolge in maniera totalizzante e forma nel tempo un pubblico appassionato e attento.

L'uomo vive in stretta relazione con l'ambiente che lo circonda e il rispetto e la cura dello stesso partono dalla conoscenza. *La voce negli antichi spazi* oltre a promuovere la conoscenza, attiva le emozioni e l'empatia con i luoghi storico/artistici e per questo si configura come un'attività strategica

per la crescita culturale della collettività e di comunità sane ed evolute poiché senza consapevolezza della propria storia e senza memoria non c'è futuro.

Conclusions

The voice in the ancient spaces, develops on two parallel tracks, on the one hand the experimentation of new musical architectures thanks to the wonderful reverberations of these spaces and on the other the enhancement, increasingly targeted and attentive, of historical places and the environment through the experiences of voice and sound.

The sound journey communicates new and ancient traditions, involves in an all-encompassing way and forms over time a passionate and attentive audience.

Man lives in close relationship with the environment that surrounds him and respect and care for the same start from knowledge. "The voice in ancient spaces" in addition to promoting knowledge, activates emotions and empathy with historical / artistic places and for this reason it is configured as a strategic activity for the cultural growth of the community and healthy and evolved communities because without awareness of their history and without memory there is no future.

Bibliografia

- Philippe Barraquè: *La voce che guarisce*, ed. Il punto di incontro (1999).
- Francesca Della Monica: *A voce spiegata*, ed. La casa usher (2022).
- Pavel Florenskij: *Il valore magico della parola*, ed. Medusa (2001).
- Jonathan Goldman: *Il potere di guarigione dei suoni*, ed. Il punto di incontro (1996).

Simulazione acustica di spazi antichi: problematiche e soluzioni*

Francesco Martellotta

Dipartimento di Architettura,
Costruzione e Design,
Politecnico di Bari,
Via Orabona, 4, 70125 Bari
francesco.martellotta@poliba.it

Ricevuto: 21/11/2022

Accettato: 23/12/2022

DOI: 10.3280/ria1-2023oa14983

ISSN: 0393-1110

ISSNe: 2385-2615

La ricostruzione acustica di spazi antichi, esistenti in condizioni molto diverse o non più esistenti, sta diventando un'attività sempre più diffusa in diversi campi di ricerca. La disponibilità di diversi software ha portato la simulazione acustica fuori dai laboratori specializzati e ha permesso a un pubblico molto più ampio di sfruttare le loro potenzialità. Tuttavia, come qualsiasi altro strumento di simulazione, l'affidabilità dei risultati deve essere attentamente valutata in quanto dipende da una serie di fattori relativi alla corretta conoscenza del processo di simulazione e delle caratteristiche dell'edificio da simulare.

Parole chiave: simulazione acustica, edifici storici, acustica geometrica

Acoustic simulation of ancient spaces: problems and solutions

Acoustical reconstruction of ancient spaces, existing in very different conditions or not existing anymore, is becoming an increasingly popular activity in different research fields. Availability of several softwares brought acoustic simulation out of specialized labs and made it possible for a much broader audience to take advantage of their potentials. However, like any other simulation tool, reliability of the results needs to be carefully pondered as it depends on a number of factors pertaining to proper knowledge of the simulation process and of the characteristics of the building to be simulated.

Keywords: acoustic simulation, ancient buildings, geometrical acoustics

1 | Introduzione

La simulazione acustica è diventata uno strumento ampiamente popolare per supportare la ricerca scientifica sin dalla pubblicazione del pionieristico lavoro di Krokstad et al. nel 1968 [2]. In quel documento sono state gettate le basi della simulazione acustica geometrica (AG), dimostrando che il ray tracing poteva essere utilizzato per calcolare la risposta impulsiva in luoghi chiusi. In sintesi, si spiegava il funzionamento del ray tracing acustico dicendo che: "la procedura di calcolo utilizza un modello matematico di una sala, che viene eccitata da un impulso sonoro emesso da una sorgente a punto fisso. L'energia è rappresentata da raggi equamente distribuiti sull'insieme o su una parte selezionata dell'angolo solido. La storia temporale di ogni raggio è calcolata assumendo riflessione geometrica su tutte le superfici, fino a quando il raggio colpisce l'area del pubblico dove si suppone essere totalmente assorbito. Sono calcolati sia il punto di impatto per tutti i raggi emessi sia il relativo ritardo temporale rispetto al suono diretto [2]".

Tuttavia, è stato all'inizio degli anni '90 che una serie di strumenti di modellazione sono diventati disponibili in commercio per il vasto pubblico e, da allora, numerosi articoli

scientifici hanno descritto i dettagli dei diversi algoritmi [3], mentre altri hanno confrontato la loro accuratezza [4-7], e le diverse fonti di incertezza [8]. Una panoramica approfondita dello stato dell'arte della simulazione acustica geometrica è stata riassunta da Savioja e Svensson nel 2015 [9], mentre negli ultimi anni sono apparsi sulla scena anche strumenti open source gratuiti, sia in forma di applicazioni stand-alone, sia come plug-in di software di modellazione tridimensionale.

Tuttavia, parallelamente allo sviluppo degli strumenti di simulazione basati sull'acustica geometrica, la crescente potenza computazionale, in particolare offerta dai processori multi-core e, soprattutto, dal calcolo parallelo tramite GPU, ha aperto la strada all'impiego, su intervalli di frequenza sempre più ampi, di tecniche di simulazione più hard-core come quelle basate sulla soluzione numerica dell'equazione d'onda, che, ai fini acustici, trova nell'approccio FDTD (Finite Difference Time Domain) il suo strumento ideale. Secondo questo approccio, la propagazione dell'onda sonora viene modellata discretizzando sia il dominio spaziale, sia quello temporale, risolvendo iterativamente, in maniera approssimata, le equazioni differenziali che ne sono alla base. Dai primi tentativi a bassa frequenza [10], questa tecnica può ora essere applicata all'intera gamma di frequenze [11-12], con applicazione specifica a quei casi in cui la diffrazione oppure gli effetti di focalizzazione giocano un ruolo importante [13]. Tuttavia, questi strumenti sono ancora utilizzati solo in ambito accademico. Altri metodi computazionali numerici basati su approccio FEM/BEM trovano applicazione sia in ambito di

* Il presente lavoro rappresenta la versione estesa e ampliata del contributo presentato in occasione del 2° Simposio sull'Acustica dei Teatri Antichi tenutosi a Verona dal 6 all'8 luglio 2022 [1].

ricerca sia nella pratica ma, essendo meno idonei a fornire la risposta temporale, si prestano meglio solo per analisi modali in bassa frequenza, tuttavia alcune applicazioni di queste tecniche al dominio temporale (TDFEM) incominciano ad essere indagate [14].

Man mano che gli strumenti di simulazione acustica sono diventati disponibili per un pubblico più ampio, sono emerse numerose potenziali applicazioni, dalla progettazione acustica degli spazi alle ricostruzioni di edifici non più esistenti o profondamente modificatisi nel corso del tempo (archeoacustica), ai mondi virtuali per l'industria dei giochi. Una ricerca su Google Scholar utilizzando "archeoacoustics" come parola chiave restituisce 993 documenti pubblicati, mentre prima del 2010 c'erano solo 79 articoli e prima del 2015 erano aumentati a 301. È sempre più evidente che l'idea che l'acustica sia un patrimonio culturale "intangibile" è ormai pienamente riconosciuta dalla comunità scientifica e il tema della ricostruzione archeo-acustica degli edifici sta diventando un tema mainstream per una comunità molto più ampia e interdisciplinare di ricercatori. Tuttavia, mentre ciò sta creando nuove opportunità di ricerca per la comunità degli acustici, allo stesso tempo solleva una serie di preoccupazioni sull'accuratezza e l'affidabilità di molte simulazioni quando vengono eseguite senza un'adeguata comprensione critica dei problemi acustici relativi sia agli algoritmi di simulazione sia alle tecniche di modellazione.

2 | Inconvenienti inerenti alla modellazione acustica geometrica

Le seguenti considerazioni si applicheranno alla modellazione acustica geometrica in quanto è lo strumento più diffuso e facilmente disponibile (sebbene, nella maggior parte dei casi, a un costo non trascurabile). La maggior parte dei software commerciali è stata migliorata rispetto alle prime versioni per includere strumenti di modellazione geometrica o, almeno, alcuni strumenti per importare la geometria da software di modellazione 3D di terze parti. Per gli utenti inesperti, il compito maggiormente gravoso è solitamente rappresentato dalla creazione del modello geometrico 3D che, nel peggiore dei casi, è solo un adattamento da un modello architettonico esistente e iper-dettagliato. Nel migliore dei casi, il modello è realizzato apposta, avendo chiaramente in mente le esigenze acustiche e la regola che "tutti i dettagli geometrici dovrebbero essere un ordine di grandezza maggiore della lunghezza d'onda più lunga di interesse nella simulazione, i dettagli più fini dovrebbero essere eliminati e le superfici appianate" [9]. Tuttavia, la questione di come dovrebbero essere trattati i dettagli e le corrispondenti superfici, rimane aperta, con potenziali implicazioni sulla scelta dei coefficienti di assorbimento e di scattering (vedi sotto).

Il problema del livello di dettaglio del modello è praticamente impossibile da risolvere in modo semplice, in quanto i poligoni, che devono essere grandi rispetto alle

lunghezze d'onda, per coprire la gamma di frequenze audio, richiedono una valutazione che si estende su tre ordini di grandezza (dai metri ai millimetri). È ben noto che un elevato livello di dettaglio comporterà tempi di calcolo inutilmente lunghi non compensati da alcun miglioramento nell'accuratezza dei risultati (se non, addirittura, da un peggioramento), dal momento che l'effetto prodotto degli elementi di dimensioni minori può essere meglio rappresentato modificando opportunamente i coefficienti di assorbimento e di scattering di una superficie più ampia. Infatti, una bassa risoluzione spaziale nel modello poligonale può comportare una risposta migliore sia alle basse frequenze sia nella parte delle riflessioni tardive, dove il decadimento è molto più influenzato dallo scattering superficiale piuttosto che dalle riflessioni speculari deterministiche di un modello poligonale dettagliato [8]. Un esempio di come una opportuna modificazione delle proprietà superficiali ha consentito di simulare adeguatamente l'effetto di elementi decorativi anche di grandi dimensioni è rappresentato dal caso della Basilica di San Pietro a Roma [15]. In tale simulazione (Fig. 1a), date le notevoli dimensioni dello spazio, anziché modellare nel dettaglio gli apparati scultorei e decorativi si è proceduto, basandosi sia sul confronto con altri edifici simili, sia su misure effettuate su modelli reali in scala degli elementi geometrici, ad incrementare sia i coefficienti di assorbimento, sia quelli di scattering. Le prove su modelli in scala avevano dimostrato infatti, che, rispetto alla proiezione in piano della stessa superficie, la presenza dei decori aumentava l'assorbimento dal 50% al 110%. I coefficienti di scattering sono stati quindi modificati in funzione della dimensione della decorazione rispetto alla lunghezza d'onda. L'accuratezza risultante nella previsione dei parametri è stata molto buona (Fig. 1b,c,d), con differenze puntuali generalmente al di sotto della soglia di percettibilità individuale (just noticeable difference, JND).

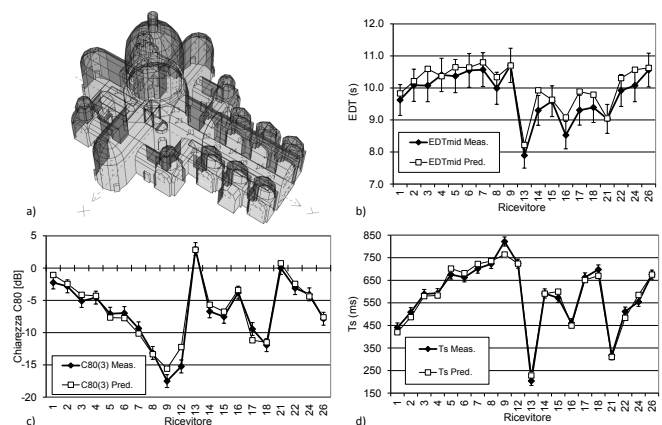


Fig. 1 – a) Modello acustico della Basilica di San Pietro in Roma; b) confronto dei valori misurati e predetti del tempo di primo decadimento EDT; c) confronto dei valori misurati e predetti di chiarezza C80; d) confronto dei valori misurati e predetti del tempo baricentrico Ts

a) Acoustic model of the Basilica of St. Peter's in Rome; b) comparison between measured and predicted EDT values; c) comparison between measured and predicted C80 values; d) Comparison between measured and predicted Ts values

A questo proposito, è interessante notare come, a differenza di quanto accade per i metodi AG, le tecniche FDTD potrebbero sembrare più immuni rispetto a queste problematiche legate al livello di dettaglio, dal momento che sarà l'onda stessa, interagendo con i dettagli geometrici della superficie, a determinare il modo in cui il suono sarà riflesso in funzione della frequenza. Tuttavia, anche in questo caso, la "voxelizzazione", ovvero la conversione di un volume 3D nel corrispondente modello reticolare, non è esente da problematiche, anche qui correlate al rapporto fra lunghezze d'onda e dimensione del reticolo e al rischio di avere superfici scaltate che possono indurre effetti diffrattivi non prevedibili, in particolare alle frequenze più alte[16], senza contare la necessità di conoscere in modo ancora più accurato le proprietà superficiali, come si vedrà di seguito. Inoltre, data la necessità di ridurre il passo della griglia di discretizzazione man mano che si eleva la più alta frequenza di interesse (legati insieme dal cosiddetto numero di Courant), con conseguente significativo incremento del carico computazionale, ne consegue che si rende spesso necessario trovare un compromesso fra la dimensione dell'ambiente da modellare e la frequenza massima di analisi e, conseguentemente, della dimensione degli elementi di dettaglio che sono modellabili.

Un altro problema che può talora influenzare in modo significativo l'accuratezza delle previsioni di un modello previsionale AG è legato a un corretto trattamento dei fenomeni di diffrazione che provocano la comparsa di onde di diffrazione che si propagano dai bordi del poligono. L'approccio che meglio si adatta alle simulazioni per l'acustica architettonica si basa sull'uso di sorgenti secondarie collocate in corrispondenza dei bordi, il quale consente sia lo studio di bordi finiti, sia di effetti di diffrazione di ordine superiore [17]. Tale approccio è stato implementato in alcuni strumenti di modellazione e permette di ottenere simulazioni più accurate e realistiche in presenza di ostacoli e array di riflettori [18].

Un'ultima questione strettamente correlata ad entrambe le precedenti è la discretizzazione di grandi superfici curve che sono approssimate da poligoni. Le superfici concave producono caratteristiche molto speciali come i punti focali che potrebbero non essere simulati correttamente se la superficie curva è discretizzata impiegando un numero di facce limitato, analogamente per le superfici convesse un numero insufficiente di piani può portare ad avere delle zone d'ombra dove il suono non è riflesso correttamente. In questi casi, possono verificarsi errori di simulazione anche se, apparentemente, il numero di raggi impiegati e le proprietà delle superfici sono impostati correttamente [8]. La corretta inclusione degli effetti di diffrazione ha anche dimostrato di poter produrre una risposta spaziale più uniforme, più simile a quella che si ottiene quando vengono utilizzati metodi basati sulle onde. Tuttavia, anche una attenta calibrazione del modello, confrontando le simulazioni con risultati misurati in sito, può aiutare a comprendere il giusto grado di dettaglio da adottare quando nelle simulazioni sono presenti superfici curve. A tale riguardo, nella simulazione acustica della chiesa della Santa

Famiglia a Grosseto [19], il confronto con le misurazioni è stato essenziale per individuare il grado di discretizzazione più idoneo (Figura 2).

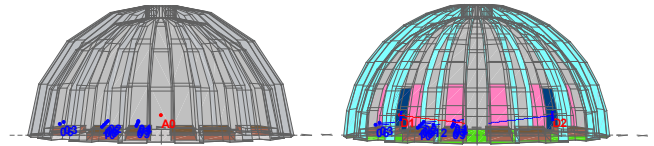


Fig. 2 – Confronto fra due modelli acustici della Chiesa della Santa Famiglia in Grosseto, realizzati adoperando una diversa risoluzione nella definizione delle superfici curve
Comparison between two acoustic models of the Church of the Holy Family in Grosseto, made using a different discretization approach in the definition of curved surfaces

Oltre ai problemi precedenti, che sono intrinsecamente associati ai metodi GA, è importante citare altri aspetti che dovrebbero essere meno rischiosi, in linea di principio, ma che potrebbero ugualmente dare origine a gravi imprecisioni se non adeguatamente impostati. La maggior parte degli strumenti condivide impostazioni simili come il numero di raggi o la durata della risposta all'impulso da simulare, oltre a impostazioni più specifiche (dalla scelta degli algoritmi, alla transizione dal metodo delle sorgenti immagine al ray tracing, ad altre opzioni non banali). Tutte queste impostazioni, a partire dal numero di raggi da emettere, richiedono che l'utente sia pienamente consapevole degli algoritmi che lavorano dietro le quinte e delle loro esigenze e limitazioni che altrimenti potrebbero influenzare fortemente i risultati e devono essere adattati al caso specifico in analisi per tenere conto della presenza di aperture, superfici curve, ecc. Gli spazi aperti o quelli che prevedono la presenza di grandi aperture, in particolare, richiedono l'utilizzo di molti più raggi per compensare la mancanza di riflessioni.

3 | Inconvenienti legati alla conoscenza delle proprietà superficiali dei materiali

In una simulazione acustica di un ambiente confinato, una simulazione accurata delle interazioni fra onda e superficie è essenziale per ottenere risultati affidabili, in particolare quando l'ambiente non soddisfa i requisiti ideali per il campo sonoro diffuso. Un'onda sonora che colpisce una superficie viene in parte assorbita e in parte riflessa. La riflessione può essere speculare o diffusa. Pertanto, in uno spazio riverberante, per ogni superficie è necessario conoscere i coefficienti di assorbimento e di scattering in funzione della frequenza.

Con riferimento al primo insieme di coefficienti, che apparentemente sono quelli che si possono trovare più facilmente in letteratura, schede tecniche e data set, occorre considerare una prima questione importante: i coefficienti di assorbimento usati nelle simulazioni AG esprimono il rapporto tra energia assorbita ed energia incidente in funzione della frequenza in condizioni di campo sonoro diffuso. Pertanto,

tali coefficienti non coincidono né con i coefficienti di assorbimento di Sabine in campo diffuso, misurati in applicazione della norma ISO 354 [20], né con i coefficienti di assorbimento di incidenza normale risultanti dall'applicazione della ISO 10534-2 [21]. Tuttavia, i primi sono generalmente utilizzati senza troppe preoccupazioni (a parte i casi in cui α_{sab} è maggiore di uno), e in diverse pubblicazioni, capita di trovare riferimenti anche i secondi, senza utilizzare formule di conversione appropriate per tener conto del passaggio da incidenza normale a incidenza diffusa. Chiaramente, nessuno degli approcci è teoricamente corretto ma le grandi incertezze che incidono sulle misurazioni dei coefficienti, unite alla pratica comune (possibile in presenza di misure dei parametri acustici architettonici dello spazio), di “calibrare” il modello con piccole progressive modifiche dei coefficienti di assorbimento, contribuiscono a limitare (o a rendere meno evidenti) gli errori che ne possono conseguire. Alcuni software consentirebbero anche di tener conto della dipendenza dei coefficienti di assorbimento dall'angolo di incidenza, ma l'uso di tale potenzialità richiede anche un approccio molto più sensibile e teoricamente consapevole delle proprietà superficiali, oltre ad una conoscenza molto più approfondita delle proprietà delle superfici. Infine, i coefficienti di assorbimento acustico sono solitamente disponibili per tipologie generiche di finiture o per materiali commerciali opportunamente certificati, mentre quando si modellano spazi esistenti (o non più esistenti), le informazioni sono molto più ridotte e i dati possono essere derivati solo da misurazioni dirette o da confronti con materiali generici simili. Inoltre, sarebbe importante conoscere anche la composizione stratigrafica di molte strutture, dal momento che il comportamento acustico non dipende solo dalle proprietà dello strato di finitura. La presenza di sottofondi, intercapedini e materiali diversi può modificare in misura rilevante il comportamento acustico e ciò può contribuire a rendere il compito di attribuire correttamente le proprietà acustiche, ancora più arduo, specie per utenti inesperti. Fortunatamente, la diffusione dei metodi di calcolo basati sulla matrice di trasferimento, rende oggi disponibili molti strumenti che consentono di calcolare i coefficienti di assorbimento di strutture anche complesse, anche tenendo conto delle loro effettive dimensioni, a condizione, però, che siano disponibili dettagli sulle proprietà dei materiali [22].

Con riferimento ai coefficienti di scattering, a parte alcune differenze esistenti tra gli strumenti di modellazione in termini di modalità di immissione dei dati, essi rappresentano la frazione di energia riflessa che non viene riflessa specularmente. Il modo in cui vengono gestite tali riflessioni diffuse dipende dall'algoritmo alla base del calcolo e può comportare un aumento significativo del carico computazionale, ma una corretta comprensione del modo in cui tali riflessioni vengono trattate da ciascun software è essenziale per adattarsi alle esigenze specifiche dello spazio modellato. Infatti, i metodi GA possono trattare le riflessioni diffuse come distribuite casualmente dal punto di impatto (cioè una quantità proporzionale di raggi riflessi viene inviata in direzioni casuali), trattarle in modo deterministico (cioè diffonderle effettivamente

in tutte le direzioni, ma questo aumenta significativamente il numero di raggi da gestire e, quindi, l'onere computazionale), oppure utilizzare tecniche per velocizzare il calcolo come l'approccio “pioggia diffusa”, dove viene verificata la visibilità di tutte le riflessioni diffuse rispetto ai ricevitori e ogni percorso visibile considerando l'angolo solido coperto dal ricevitore viene memorizzato [9]. Il modo in cui viene gestito lo scattering ha ovvie influenze in termini di accuratezza dei risultati [23], sia per la prima parte di una risposta all'impulso, sia sulla maggiore o minore diffusione del campo sonoro in spazi critici dove compaiono geometrie oblunghe oppure materiali fonoassorbenti concentrati solo su alcune superfici, pertanto, malgrado la maggiore difficoltà di trovare dati “pronti”, l'inserimento dei coefficienti di scattering va sempre effettuato con molta cura [24]. Inoltre, è stato dimostrato che lo scattering superficiale può avere effetti percepibili soggettivamente [25,26], quindi quando le simulazioni devono essere impiegate per l'auralizzazione dei segnali, è necessaria particolare cura nella selezione dei valori.

Di conseguenza, l'assegnazione di opportuni coefficienti di scattering alle superfici può diventare una parte rilevante della preparazione del modello acustico e anche una parte non banale. Infatti, oltre alle variazioni dipendenti dall'algoritmo, i coefficienti di scattering soffrono di una sostanziale mancanza di dati rispetto ai coefficienti di assorbimento. Nonostante l'esistenza di uno standard internazionale (ISO 17497-1[27]), il numero di dati misurati è limitato a “diffusori sonori” commerciali e relativamente pochi trattamenti di diffusione archetipici basati su geometrie semplici [28-29]. Negli altri casi è possibile utilizzare formule semplificate che tengano conto della rugosità della superficie, oppure modellare numericamente l'interazione fra l'onda e la forma della superficie [30]. In tutti i casi, appare una sostanziale dipendenza dall'esperienza e dalla sensibilità dell'utente, poiché i coefficienti di scattering possono influenzare il comportamento in campo diffuso di uno spazio, che, in particolare nelle geometrie meno diffondenti, può essere fortemente dipendente dalle proprietà superficiali.

Infine, come già anticipato, nella modellazione AG, è sempre necessario adattare i coefficienti di assorbimento e scattering al livello di dettaglio adottato, per cui i coefficienti di assorbimento e di scattering possono essere adeguatamente corretti per compensare ricche decorazioni e altre caratteristiche superficiali, purché questo processo derivi da ragionamenti e misure e non sia solo funzionale a conseguire una corrispondenza puramente numerica fra valori attesi e valori predetti, senza tenere nel debito conto la realtà fisica di quanto si sta modellando. Anche perché, un tale approccio, se anche funzionasse con riferimento al parametro prescelto per la verifica, cadrebbe sicuramente in difetto nell'analisi puntuale degli andamenti, motivo per cui è essenziale che questa venga condotta.

Anche su questo fronte, è interessante ragionare sulle potenzialità della modellazione FDTD a confronto con le tecniche AG. Nella prima, la capacità intrinseca di modellare le interazioni ondulatorie con le diverse forme delle superfici mi-

nimizza tutte le problematiche relative all'attribuzione dei coefficienti di scattering, mentre, per contro, in luogo dei coefficienti di assorbimento si rende necessario fornire l'impedenza complessa superficiale la quale può essere ottenuta mediante misure nel tubo ad onde stazionarie, oppure previo calcolo a partire dall'applicazione di modelli teorici o semi-empirici [31] che però possono richiedere la conoscenza di altri parametri come la resistenza al flusso. Come già visto nel caso della questione del livello di dettaglio, la modellazione FDTD apre la strada verso l'utilizzo di modelli geometrici potenzialmente più dettagliati di quelli richiesti dalla AG, compatibilmente con i range di frequenze a cui si è interessati, ma richiede certamente una maggiore padronanza dei fenomeni acustici al fine di caratterizzare opportunamente le superfici [32].

4 | Aspetti pratici della simulazione acustica

Date tutte le limitazioni e le incertezze di cui sopra, sembrerebbe difficile credere che la modellazione AG sia diventata così popolare. Infatti, dalla consulenza acustica, dove ha rappresentato un significativo passo avanti in termini di facilità ed efficienza dei costi rispetto ad altre tecniche di previsione, la modellazione AG è stata utilizzata anche nel campo della ricerca in acustica architettonica, solitamente a complemento delle misurazioni in sito. Infine, negli ultimi anni, tali strumenti sono stati spesso utilizzati negli studi umanistici (musicologia, archeologia, storia dell'arte, ecc.), soprattutto in conseguenza del riconoscimento del "suono" come patrimonio culturale immateriale e delle implicazioni che l'acustica può avere avuto su altri campi, con conseguente interesse per le ricostruzioni arqueo-acustiche di edifici non più esistenti o fortemente modificati nel corso del tempo.

Mentre quest'ultimo caso sarà discusso nell'ultima sezione, con tutti i suoi potenziali rischi, vale la pena sottolineare le buone pratiche necessarie per ottenere una simulazione acustica accurata. L'approccio più comune, almeno laddove ciò sia possibile (escludendo cioè il mondo della consulenza professionale dove non è possibile il confronto), è quello di partire prima da un modello "calibrato", dove la simulazione può essere confrontata con misure acustiche reali. Nel tempo, sono stati proposti diversi approcci per le fasi di calibrazione, con confronti più o meno accurati a seconda sia della quantità di dati disponibili che dello scopo del confronto.

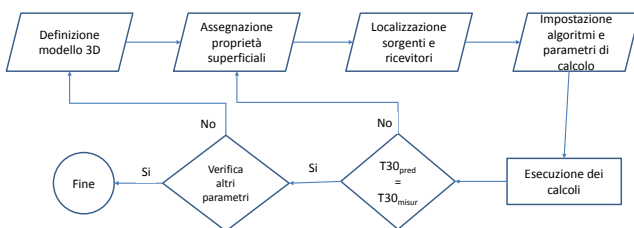


Fig. 3 – Diagramma di flusso del tipico processo di calibrazione di un modello acustico
Flow chart representing a typical calibration process for an acoustic model

Un approccio usuale [33], tipicamente utilizzato in ampi spazi con una geometria sufficientemente diffondente (Fig. 3), presuppone che i coefficienti di scattering siano attribuiti in base alla rugosità delle superfici, quindi i coefficienti di assorbimento, dopo una prima assegnazione basata su dati di letteratura, possono essere modificati iterativamente (principalmente a partire da quelli con più incertezze), fino a quando il tempo di riverberazione mediato spazialmente non corrisponde alle misurazioni. A questo punto, viene eseguita un'analisi più raffinata del modello per avere un accordo punto per punto su parametri spazialmente dipendenti come chiarezza, tempo centrale, ecc. Gli errori di previsione vengono poi confrontati con i valori soglia di JND, in modo da ottenere i valori più piccoli possibili.

Nel caso in cui si vogliono utilizzare le simulazioni acustiche per la generazione di scenari sonori tridimensionali, l'affinamento della corrispondenza fra simulazioni e misure, può essere spinto anche al punto di verificare non soltanto la corrispondenza fra i valori dei parametri, ma anche la sovrapposibilità delle risposte all'impulso e delle direzioni di provenienza delle riflessioni. Ad esempio, nella simulazione acustica della chiesa Dives Misericordiae a Roma [34] è stato impiegato proprio tale approccio, evidenziando che i pattern delle riflessioni misurati e simulati sono simili (Figura 4), con le riflessioni principali che provengono dalla stessa direzione e arrivano nello stesso tempo, con l'unica differenza rilevante rappresentata da riflessioni molto più diffuse nelle risposte misurate. I ricevitori che si trovano più lontano dalla sorgente, come il ricevitore 07, hanno schemi di riflessione più ricchi, il che potrebbe suggerire un rischio maggiore di imprecisione. Tuttavia, la maggior parte delle riflessioni più forti (rif. 2, 4 e 5) appaiono simulati correttamente, mentre alcuni altri appaiono a volte ritardati e/o provenienti da altre direzioni o semplicemente non compaiono.

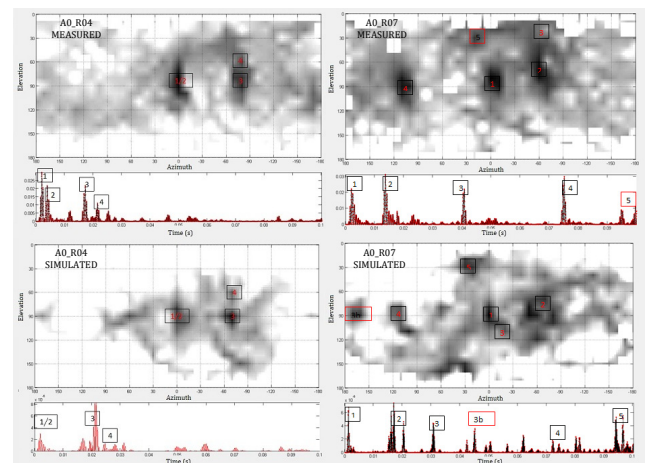


Figura 4. Mappe direzionali e risposte impulsive misurate e simulate con riferimento alla chiesa Dives Misericordiae in Roma
Directional maps and early impulse responses measured and simulated in the church Dives in Misericordiae in Rome

Postma e Katz [35] hanno successivamente proposto un approccio che implica uno studio preliminare della sensibilità del modello geometrico alle variazioni dei coefficienti di scattering, ottenuta impostando tutti i coefficienti di scattering

prima a 0%, poi a 99 %, senza modificare i coefficienti di assorbimento, in modo da comprendere l'influenza di questo parametro sul modello. Quindi, la regolazione delle proprietà della superficie segue un processo sostanzialmente simile a quello descritto nel caso precedente, in modo da ridurre al minimo la deviazione standard delle differenze fra coppie di parametri simulati e misurati per quanto riguarda riverberazione e chiarezza. Allo scopo di eliminare ulteriori elementi di incertezza gli stessi autori raccomandano l'impiego del medesimo software per il calcolo dei parametri acustici. Altri autori, hanno recentemente proposto anche l'impiego di tecniche di ottimizzazione per rendere il risultato meno dipendente dalle scelte dell'utente [36].

Una volta che tali processi di calibrazione sono stati eseguiti con successo, diventa molto più semplice utilizzare il modello AG per studiare altre posizioni di sorgenti o ricevitori, per studiare l'effetto dell'occupazione o dei cambiamenti nelle finiture superficiali o nell'articolazione volumetrica (ad esempio per studiare fasi costruttive precedenti). Al contrario, senza un riferimento solido, i risultati possono discostarsi notevolmente dalla realtà.

5 | Problematiche inerenti alla modellazione di edifici non esistenti

Come detto in precedenza, gran parte dei recenti studi in campo archeoacustico si basano su simulazioni AG di spazi in qualche modo ricostruiti, facendo ipotesi sulla geometria e, ancora più importante per tutte le possibili implicazioni acustiche, sulle finiture superficiali. I risultati acustici saranno influenzati da quelle ipotesi che, almeno, devono essere espresse in modo molto chiaro per garantire la ripetibilità. E, in ogni caso, rappresenteranno solo uno dei tanti possibili (e altrettanto probabili) scenari. Acusticamente parlando, si potrebbero effettuare misurazioni delle proprietà superficiali su frammenti eventualmente ancora esistenti o su edifici di epoca simile, in modo da corroborare le scelte con dati più affidabili.

Con riferimento alla geometria dello spazio, la questione ha implicazioni certamente molto più ampie in altri campi e, qualunque sia la forma che verrà finalmente adottata, dovrà risultare da ricerche storiche, artistiche e archivistiche e dall'aver ottenuto una sorta di consenso nella comunità scientifica di riferimento. Tuttavia, in termini di effetti acustici, anche supponendo che la geometria sia correttamente convertita per gli utilizzi acustici con il livello di dettaglio appropriato, c'è ancora molto da definire prima di poter ottenere una simulazione affidabile.

Per avere risultati affidabili si potrebbe partire da un edificio esistente dove si potrebbero effettuare misurazioni (ove già non fossero disponibili in letteratura), che abbia caratteristiche comparabili a quello da simulare sia in termini geometrici, sia di epoca storica e materiali impiegati. In questo modo si potrebbe effettuare una calibrazione preliminare ed ogni successiva variazione nella forma o nelle proprietà dei materiali potrebbe restituire risultati più convincenti. Ove fossero

disponibili informazioni sulle finiture superficiali, compresi strati sottostanti, si potrebbe ipotizzare di ricostruirne un campione per poter effettuare dei test, ad esempio in tubo ad onde stazionarie, ottenendo una base di partenza scientificamente più solida. In tal senso, è possibile anche impiegare tecniche di misurazione del coefficiente di assorbimento in situ, non distruttive (basate sulla ISO 13472-1[37]) e potrebbero essere utilizzate per testare superfici esistenti aventi caratteristiche confrontabili con le superfici da modellare. Il metodo non è immune da incertezze ma potrebbe certamente contribuire ad avere una più solida base da cui partire. Le misurazioni in situ possono anche essere ottenute utilizzando un approccio indiretto, come nelle camere riverberanti, nel caso in cui il campione di materiale possa essere spostato facilmente [38].

Infine, nel caso in cui nessuno degli approcci precedenti possa essere utilizzato, potrebbe essere utile includere nelle simulazioni una sorta di analisi di sensibilità che mostri la gamma di possibili variazioni a seguito di ragionevoli variazioni delle proprietà dei materiali. Un approccio del genere potrebbe onestamente dichiarare i limiti di ogni studio, consentendo anche al lettore (e agli stessi ricercatori) di trarre conclusioni che coprono almeno una più ampia gamma di possibilità e non solo una sola scelta, potenzialmente arbitraria. Ovviamente ciò va fatto presupponendo che tutte le altre criticità discusse prima siano state affrontate nel miglior modo possibile e che le modalità con cui la simulazione è stata condotta siano state dichiarate espressamente, magari condividendo i dati di partenza, per assicurare la ripetibilità dei risultati.

6 | Conclusioni

In questo lavoro sono state presentate le principali limitazioni della simulazione acustica geometrica, che vanno da quelle intrinsecamente dovute agli algoritmi di simulazione, a quelle più legate ad una corretta conoscenza delle proprietà dei materiali e delle superfici. I coefficienti di assorbimento e di scattering devono essere assegnati con criterio, possibilmente tenendo conto anche delle semplificazioni geometriche. Con riferimento agli edifici non più esistenti, trovare edifici esistenti o trattamenti superficiali che potrebbero essere utilizzati come riferimento per calibrare i modelli è essenziale per ottenere risultati più affidabili, altrimenti dovrebbero essere indicati intervalli di incertezza adeguati per tenere conto della mancanza di informazioni.

Conclusions

In this work the main limitations of geometric acoustic simulation have been presented, ranging from those intrinsically due to the simulation algorithms, to those more related to a correct knowledge of the properties of materials and surfaces. The absorption and scattering coefficients must be assigned carefully, possibly also taking into account the underlying geometric simplifications.

With reference to no longer existing buildings, it is essential to find existing buildings or surface treatments that could be used as a reference to calibrate the models and obtain more reliable results, otherwise uncertainty ranges should be indicated to account for the lack of more precise information.

Bibliografia

- [1] F. Martellotta, Caveats and pitfalls in acoustic simulation of non-existing buildings, Proc. 2nd International Symposium on The Acoustics of Ancient Theatres (SAT) – 6-8 July 2022, Verona.
- [2] A. Krokstad, S. Strøm, and S. Sørsdal, Calculating the acoustical room response by the use of a ray tracing technique, *J. Sound Vib.* 8(1), 118–125. 1968. doi.org/10.1016/0022-460X(68)90198-3.
- [3] U.P. Svensson and U. Kristiansen, Computational modelling and simulation of acoustic spaces, in Proc. of the AES 22nd Conf. on Virtual, Synthetic Entertainment Audio, Espoo, Finland (2002), pp. 11-30.
- [4] M. Vorlander, International round robin on room acoustical computer simulations, in Proceedings of the 15th International Congress on Acoustics, Trondheim, Norway (1995), pp. 689-692.
- [5] I. Bork, A comparison of room simulation software – The 2nd round robin on room acoustical computer simulation, *Acta Acust. Acust.* 86(6), 943–956 (2000).
- [6] I. Bork, Report on the 3rd round robin on room acoustical computer simulation– Part II: Calculations, *Acta Acust. Acust.* 91(4), 753–763, 2005.
- [7] F. Brinkmann, L. Aspöck, D. Ackermann, S. Lepa, M. Vorländer, S. Weinzierl, S. A round robin on room acoustical simulation and auralization, *J. Acoust. Soc. Am.*, 145(4), 2746-2760, 2019. doi.org/10.1121/1.5096178.
- [8] M. Vorlander, Computer simulations in room acoustics: Concepts and uncertainties, *J. Acoust. Soc. Am.* 133(3), 1203–1213, 2013. doi.org/10.1121/1.4788978.
- [9] L. Savioja, P. Svensson, Overview of geometrical room acoustic modeling techniques. *J. Acoust. Soc. Am.*, 138(2), 708-730, 2015. doi.org/10.1121/1.4926438.
- [10] D. Botteldooren, Finite-difference time-domain simulation of low-frequency room acoustic problems, *J. Acoust. Soc. Am.*, 98, (6), 3302-3308, 1995. doi.org/10.1121/1.413817.
- [11] K. Kowalczyk and M. van Walstijn, Room acoustics simulation using 3-D compact explicit FDTD schemes, *IEEE Trans. Audio Speech Lang. Process.* 19(1), 34-46, 2011. DOI: 10.1109/TASL.2010.2045179.
- [12] B. Hamilton, C.J. Webb, N. Fletcher and S. Bilbao, Finite difference room acoustics simulation with general impedance boundaries and viscothermal losses in air: Parallel implementation on multiple GPUs, In Proc. ISRA, 52, 2016.
- [13] G. Fratoni, B. Hamilton and D. D’Orazio, Rediscovering the Acoustics of a XII-Century Rotunda through FDTD Simulation, 2021 Immersive and 3D Audio: from Architecture to Automotive (I3DA), 2021, pp.1-8. DOI: 10.1109/I3DA48870.2021.9610967.
- [14] T. Okuzono, T. Otsuru, R. Tomiku, N. Okamoto, Fundamental accuracy of time domain finite element method for sound field analysis of rooms, *Appl Acoust.* 71 (10), 940-946, 2010. DOI: 10.1016/j.apacoust.2021.108212.
- [15] F. Martellotta, Identifying acoustical coupling by measurements and prediction-models for St. Peter’s Basilica in Rome, *J. Acoust. Soc. Am.* 126 1175:1186, 2009. DOI: 10.1121/1.3192346.
- [16] S. Prepelitá, M. Geronazzo, F. Avanzini, and L. Savioja, Influence of voxelization on finite difference time domain simulations of head-related transfer functions, *J. Acoust. Soc. Am.* 139(5), 2489–2504, 2016. doi.org/10.1121/1.4947546.
- [17] U.P. Svensson, R.I. Fred, and J. Vanderkooy, An analytic secondary source model of edge diffraction impulse responses, *J. Acoust. Soc. Am.* 106, 2331–2344, 1999. doi.org/10.1121/1.428071.
- [18] T. Lokki, V. Pulkki, P. T. Calamia, Measurement and Modeling of Diffraction From an Edge of a Thin Panel, *Appl. Acoust.* 69, 824-832, 2008, doi.org/10.1016/j.apacoust.2007.05.005.
- [19] F. Martellotta, M. D’Alba, U. Ayr, Acoustic problems in a large hemispherical concrete church, Proc. EuroNoise 2018, Crete 27-31 May 2018.
- [20] ISO 354:2003. Acoustics: Measurement of Sound Absorption in a Reverberation Room. ISO, Geneva, 2003.
- [21] ISO 10534-2:1998, Acoustics — Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes — Part 2: Transfer-function method, ISO, Geneva, 1998.
- [22] D. Rhazi, N. Atalla, A simple method to account for size effects in the transfer matrix method. *JASA Express Letters.*, 127(2), EL30 – EL36, 2010, doi.org/10.1121/1.3280237.
- [23] X. Zhu, J. Kang, H. Ma, The impact of surface scattering on reverberation time in differently shaped spaces. *Applied Sciences*, 10(14), 4880, 2020, doi.org/10.3390/app10144880.
- [24] H. Autio, N.G. Vardaxis, D.B. Hagberg, The Influence of Different Scattering Algorithms on Room Acoustic Simulations in Rectangular Rooms. *Buildings* 11, 414, 2021. doi.org/10.3390/buildings11090414.
- [25] L. Shtrepi, A. Astolfi, S. Pelzer, R. Vitale, M. Rychtáriková, Objective and perceptual assessment of the scattered sound field in a simulated concert hall. *J. Acoust. Soc. Am.*, 138(3), 1485-1497, 2015, doi.org/10.1121/1.4929743.
- [26] C. Visentin, M. Pellegatti, N. Prodi, Effects of multiple early diffuse reflections on spatial percepts, *J. Acoust. Soc. Am.*, 150 (4), pp. 2999 – 3010, 2021, DOI: 10.1121/10.0006744.
- [27] ISO 17497-1:2004, Acoustics -- Sound-scattering properties of surfaces -- Part 1: Measurement of the random-incidence scattering coefficient in a reverberation room, ISO, Geneva, 2004.
- [28] T.J. Cox, P. D’Antonio, Acoustic Absorbers and Diffusers, 3rd ed.; Taylor & Francis Group, USA, 2017.
- [29] M. Vorlander, Auralization. Fundamentals of Acoustics, Modelling, Simulation, Algorithms and Acoustic Virtual Reality, 1st ed. (Springer, Berlin, 2020).
- [30] J. Redondo, R. Picó, M.R. Avis, T.J. Cox, Prediction of the Random-Incidence Scattering Coefficient Using a FDTD Scheme, *Acta Acustica united with Acustica*, 95(6), 1040-1047, 2009, doi.org/10.3813/AAA.918236.
- [31] M. Cingolani, G. Fratoni, L. Barbaresi, D. D’Orazio, B. Hamilton, M. Garai, A Trial Acoustic Improvement in a Lecture Hall with MPP Sound Absorbers and FDTD Acoustic Simulations. *Appl. Sci.* 2021, 11, 2445, doi.org/10.3390/app11062445.
- [32] G. Fratoni, B. Hamilton, D. D’Orazio, Feasibility of a finite-difference time-domain model in large-scale acoustic simulations. *J. Acoust. Soc. Am.*, 152(1), 330-341, 2022, doi.org/10.1121/10.0012218.

- [33] L. Álvarez-Morales, F. Martellotta, A geometrical acoustic simulation of the effect of occupancy and source position in historical churches. *Appl. Acoust.* **91**, 47-58, 2015, doi.org/10.1016/j.apacoust.2014.12.004.
- [34] L. Alvarez-Morales, F. Martellotta, Using 3D sound field information as an instrument to improve the accuracy of virtual acoustic models, Proc. 45º Congreso Español de Acústica, 8º Congreso Ibérico de Acústica, European Symposium On Smart Cities And Environmental Acoustics.
- [35] B.N.J. Postma and B.F.G. Katz, Perceptive and objective evaluation of calibrated room acoustic simulation auralizations, *J. Acoust. Soc. Am.* **140**, 4326-4337, 2016, doi.org/10.1121/1.4971422.
- [36] A. Pilch, Optimization-based method for the calibration of geometrical acoustic models. *Appl. Acoust.*, **170**, 107495, 2020, doi.org/10.1016/j.apacoust.2020.107495.
- [37] ISO 13472-1:2022, Acoustics – Measurement of sound absorption properties of road surfaces in situ – Part 1: Extended surface method, ISO, Geneva, 2022.
- [38] F. Martellotta and L. Pon, On-site acoustical characterization of Baroque tapestries: The Barberini collection at St. John the Divine Cathedral, *J. Acoust. Soc. Am.* **144**, 1615-1626, 2018, doi.org/10.1121/1.5055561.

AURA project: enjoyment of the auralisation experience by different target groups

Chiara Bartalucci* | Raffaella Bellomini | Lucia Busa | Paola Pulella

Vie en.ro.se. Ingegneria Srl,
Viale Belfiore, 36, 50144 Firenze

* Corresponding author:
chiara.bartalucci@vienrose.it

Ricevuto: 28/10/2022

Accettato: 8/12/2022

DOI: 10.3280/ria1-2023oa14815

ISSN: 0393-1110

ISSNe: 2385-2615

Modern technologies have become a familiar feature in experiencing our cultural heritage. With the AURA (Auralisation of acoustic heritage sites using Augmented and Virtual Reality) project, music and opera houses in Berlin, Florence and Lviv opened up to the potentials of auralisation for music performing arts and establishments. AURA reached out to the European music community and offer a wide range of opportunities of building new audiences, new business models, new performance practices and exciting new aural experiences. Also, it aims to create a model for cross sectoral collaboration to foster creativity and to promote European heritage in new ways. The present article describes the procedures applied by Vie en.ro.se Ingegneria project partner to engage different target groups, make them experience auralised models of the three theatres and assess their perception through a questionnaire designed ad-hoc for each group and through the participation in round tables discussions. The main outcomes from the analysis of the collected data are reported, together with the structure of video tutorials implemented to ensure a wide dissemination of results.

Keywords: auralisation, immersive experience, virtual reality, acoustic, theatre, music, cultural heritage

Progetto AURA: fruizione dell'esperienza immersiva dell'auralizzazione da parte di diversi gruppi target

Le nuove tecnologie sono utilizzate sempre più di frequente per la fruizione del patrimonio culturale. Con il progetto AURA (Auralisation of acoustic heritage sites using Augmented and Virtual Reality), i teatri d'opera e musicali di Berlino, Firenze e Leopoli hanno potuto sfruttare le potenzialità che l'auralizzazione offre alle arti dello spettacolo e alle istituzioni musicali. AURA si rivolge alla comunità musicale europea alla quale offre un'ampia gamma di opportunità per attrarre nuovo pubblico e creare nuovi modelli di business, nuove performance e nuove entusiasmanti esperienze sonore. Si propone inoltre di sviluppare un modello di collaborazione intersettoriale al fine di promuovere in maniera innovativa la creatività e il patrimonio europeo. Il presente articolo descrive le procedure applicate dal partner del progetto Vie en.ro.se Ingegneria per coinvolgere diversi gruppi target, far loro sperimentare esperienze immersive virtuali nei tre teatri e valutarne la percezione attraverso un questionario elaborato ad-hoc per ogni gruppo e attraverso la partecipazione a tavole rotonde. Vengono inoltre riportati i principali esiti ricavati dall'analisi dei dati raccolti e presentati i video tutorial sviluppati per dare ampia diffusione ai risultati.

Parole chiave: aurizzazione, esperienza immersiva, realtà virtuale, acustica, teatro, musica, patrimonio culturale

1 | Introduction

Modern technologies are increasingly used for the enjoyment of cultural heritage. In fact, theatre and musical performances are by their nature "immersive" and this feature can be achieved thanks to the auralisation technique which creates virtual soundscapes starting from 3D-models recreating the sound environment of a real space. This allows to propose an immersive experience in which the user can move around in space and experience how the architecture influences the sound.

The AURA project is led by the Berliner Gesellschaft für internationale Zusammenarbeit mbH, in collaboration with

academic partners from the Hochschule für Technik und Wirtschaft in Berlin, the Departments of Architecture and Industrial Engineering of the University of Florence and the Lviv Polytechnic National University, supported by musical institutions such as the Konzerthaus in Berlin, Vie en. ro.se. Ingegneria s.r.l. from Florence, a partner with extensive practice in involving people in immersive experiences and evaluating their perception, the Lviv Tourist Development Center of Lviv and Magnetic One of Ternopil.

Auralisation technology is continuously evolving in sync with computational possibilities and has proven its value for different acoustic-related disciplines and multiple potential

applications. As an illustration, auralisation is gaining momentum in the archaeology field since it enables the reconstruction of the acoustic of past venues and heritage sites [1], [2]. Also, several modelling methods are available in architectural acoustics for the purpose of simulating sound in modelled environments [3]; recent developments have focused on ways to better integrate auralisations in architect workflow [4] and to complement it with immersive virtual reality technologies [5]. Despite these developments, the application of auralisation to deliver a multisensory experience to performers and audience, in the fields of music and theatre, is still in its infancy. Introducing auralisation as a cultural experience and a tool to be used by the culture industry and assessing the opportunities it offers is the innovative approach taken by the AURA project.

The AURA project aims to promote auralisation in the field of cultural heritage and performing arts. Particularly, the AURA Project aims at setting immersive experiences of three European theatres, investigated as case studies. Auralised 3D models are expected to offer a wide range of opportunities to build new business models, new performance practices and exciting auditory experiences. In this way, AURA aims to create a model of cross-sector collaboration to foster creativity and promote European heritage in new ways.

Among the project activities, collecting the future users' feedbacks, such as the point of view of musicians, designers and theatre-goers, has a crucial role for the implementation of the tool. Indeed, assessing audience experiences gives a key for understanding how and in what conditions auralisation can represent a rich and exciting alternative to the immersive nature of the live performance.

This latter aspect is particularly relevant to understand how young people, who are the age group least likely to attend theatres, perceive the theatre experience. Additionally, the experts' and technicians' opinion is considered important for a meticulous comparison between the real and the virtual experience and for the definition of a model which can better fit the reality.

The main aim of the paper is to assess audience experience of AURA innovative auralised 3D models. In what follows, a brief introduction on the development of the models for the three European theatres carried out by project partners is presented. The paper then focuses on the sessions of immersive experiences designed by Vie en.ro.se Ingegneria S.r.l. Adopted methods to collect data – a questionnaire administered to the participants and round table discussions – are illustrated and results are reported and commented. Video tutorials, implemented to disseminate project's results to different target groups, are also presented.

2 | The immersive experience

2.1 | The definition of three virtual environments

The three theatres which have been modelled and simulated in virtual reality are:

- Teatro del Maggio Musicale Fiorentino (Florence, Italy);
- Konzerthaus (Berlin, Germany);
- Lviv National Academic Opera and Ballet Theatre named after Solomiya Krushelnytska (Lviv, Ukraine).

The theatres differ in terms of architecture style and period of construction as well as acoustic features. They are characterized by different volume, number of seats and reverberation time, which affect their acoustic performance.

The synergic collaboration between the University of Florence and the HTW Berlin University of Applied Sciences resulted in the definition of three application for the simulation of virtual reality. Following theatres surveys, the Department of Architecture of the University of Florence has developed the visual 3D models of the inside, whereas the HTW dealt with the implementation of the auralisation process. The combination of these two aspects makes the experience of immersion inside the theatre realistic.



Fig. 1 – Inside view of the 3D model of the “Konzerthaus” in Berlin
Visualizzazione dall'interno del modello 3D della Konzerthaus di Berlino

Thanks to the definition of 3D visual and acoustic models, the three theatres have been implemented in a specific software (Unity) and three applications for personal computers have been set.

For an easier control of the user experience, some significant listening points have been defined (e.g., in the first row, on the balcony, on the stage).

As regards the audio simulation, the orchestra plays the 4th part “Golliwogg’s Cakewalk” from “Children’s Corner”, a composition by Claude Debussy.

The following sections present the procedures and methods applied by Vie en.ro.se Ingegneria project partner to engage different target groups (general public, technicians and experts), making them experience the auralised models of the three theatres and collecting their feedbacks through a questionnaire and through the participation to round tables discussions.

2.2 | Sample definition

Users' experiences and the analysis of their perceptions have been diversified in order to understand how categories of audiences can differently be influenced by the proposed tools and to collect distinct feedbacks on potential improvements and applications.

Three groups of subjects have been identified: i) General Public (students from high schools and general non-expert public); ii) Technicians (architectural designers, acoustic designers, students of engineering and architecture); iii) Experts (musicians, singers, conductors, actors, expert audience).

In order to reach and engage a broad number of participants, several actions were put in place using a wide range of tools and messages tailored to the addressed category. Specifically, the sessions of AURA immersive experiences were disseminated through the social media accounts (e.g., LinkedIn) of Vie en.ro.se Ingegneria (Figure 2).

IMMERSIVE EXPERIENCE FOR GENERAL PUBLIC	
The experience	
How is it structured?	<ul style="list-style-type: none"> • Audio and audio-video experience of a piece of classical music • Completion of a questionnaire
Who can participate?	<ul style="list-style-type: none"> • Students of secondary schools • General public, non-expert
Where?	Laboratory of Extended Reality of the Department of Architecture - University of Florence
When?	Sessions during June-July 2022
PROJECT WEBSITE: https://aura-project.eu	

Fig. 2 – Leaflet designed to promote the AURA immersive experiences

Volantino redatto per promuovere le esperienze immersive del Progetto AURA

Additionally, the experiences were promoted through emails and phone calls to Florence music schools, to the Florence music Conservatory as well as to the acting schools. Voluntary participants have also been identified during academic courses of the University of Florence.

The immersive experiences took place between the months of May 2022 and October 2022 in the LXR Laboratory of Extended Reality of the Department of Architecture at the University of Florence and have been organised in eight sessions.

2.3 | General public experience

Participants are divided in small groups of maximum 4 people and accompanied in the Laboratory where the technical supervisor briefly describes the subsequent phases of the experience (Figure 3).

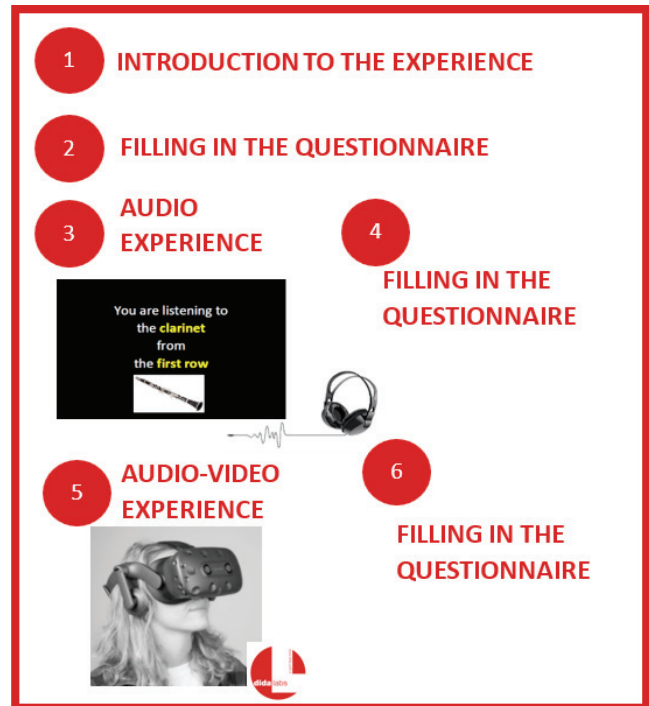


Fig. 3 – The experience's phases for General Public
Le fasi dell'esperienza per il Pubblico generico

The questionnaire is created using Google forms, and participants are given the possibility to fill-in the set of questions on their mobile phones.

The structure of the questionnaire consists of 30 questions divided into six main sections.

The first part of the questionnaire includes:

- Section A, regarding personal information (5 questions).
- Section B, focusing on personal habits related to theatre attendance (10 questions).

The second part is composed of one section:

- Section C, with a single matrix question, focusing on the evaluation of the audio experience.

The third part includes three sections:

- Section D, concerning the evaluation of the immersive audio-video experience (6 questions).
- Section E, focusing on the comparison between the immersive audio-video experiences in the three theatres (3 questions).
- Section F, concerning future developments (5 questions).

The questions included in the questionnaire are closed-ended or multiple-choice. The questions related to the characterization of the samples and their assessment of different kinds of music performances are designed drawing on a literature review and surveys deployed by projects in the field of performing arts. We especially review recent projects, scholarly sources and reports by musical and theatre institutions which mainly aim to i) collect robust data on audiences including demographic profile and booking behaviours [6], [7]; ii) identify audience' motivations to attend arts and music performances [8] and iii) explore benefits people enjoy from music, barriers to concert attend-

ance as well as strategies to creatively engage audiences [9], [10].

2.3.1 | *The audio experience*

Before starting the audio experience, participants are asked to answer to the questions included in the first part of the questionnaire (sections A and B).

For the audio experience, the technician provides stereo headphones to the users. Participants listen to the music piece by Debussy auralised in the Konzerthaus in Berlin.

The two minutes audio track consists of different instruments playing inside the theatre and in different listening positions (e.g., listening to the whole orchestra from the stage, or to the clarinet from the first row). The description of the content of each part of the audio track, which consists of the playing instrument(s) and the position in the theatre from which each participant was listening to it, is displayed on the PC monitor. At the end of the audio experience, participants answer to Section C of the questionnaire.

To engage youth participants, an Audio Interactive Game is also designed. Students are asked to listen to an audio track and recognize the instrument playing and understand how close to the orchestra he/she is listening to it. The interactive quiz is implemented in Microsoft Forms; the correct answer is displayed on the screen as soon as the answer is given by participants.

2.3.2 | *The audio-video experience*

In order to make participants test the audio-video experience, the technical supervisor provides an Oculus – a virtual reality headset that allows to play the audio and the 360° space view of the theatres – to each of them and runs the Apps of the three theatres so that users listen to the auralised audio tracks (the Debussy piece played by the whole orchestra) and visualize the corresponding space in the Oculus (Figure 4).



Fig. 4 – Audio-video experience using Oculus
Esperienza audio-video con Oculus

Participants lead the experience and independently choose the listening positions within each of the three theatres (e.g., on the stage, front rows, balcony seats etc.) (Figure 5).

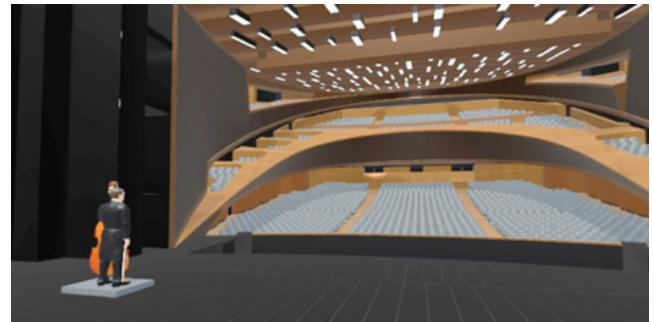


Fig. 5 – The audio-video experience
(visualization from the stage position)
Esperienza audio-video (visualizzazione dal palco)

At the end of the experience, participants are asked to answer the third part of the questionnaire.

2.4 | **Technicians and experts' experience**

The experience designed for technicians and music experts slightly differs from the one carried out with the general public, in order to suit the peculiar characteristics of the sample categories. The main variation deals with their participation to round table discussion and with the structure of the questionnaire.

The structure of the questionnaire administered to technicians consists of i) section A, with 5 questions on personal information and ii) section B, with 6 questions on habits regarding theatre attendance and on professional experience. The questionnaire for experts consists in i) section A, with 5 questions on personal information and ii) section B, with 10 questions on theatre attendance habits and professional experience.

2.4.1 | *The audio experience and the audio-video experience*

Before starting the audio experience, participants are asked to fill in the entire questionnaire. The audio experience is carried out as described in section 2.2.1 for the general public's sample group. In this case, the Interactive game is not performed. The audio-video experience is carried out as described in section 2.2.2.

2.4.2 | *Round table discussion*

At the end of the audio-video experience a round table is organized: participants are divided into small groups (up to 5 persons). Two specific canvas – one for each participants'

sample group – are elaborated and displayed on a screen and printed to facilitate the discussion on specific topics (Figure 6). Suggestions, comments and ideas are collected by the staff conducting the experience.

During the round tables with technicians, the following aspects are touched upon:

- other potential applications of auralisation in their field;
- utility of the tool for the choice of materials in a designer project;
- benefits of the tool in the field of architectural design;
- added value compared to traditionally used tools;
- specific benefits for acoustic designers;
- Music experts are instead asked to discuss and give their feedbacks on the following topics:
- previous experiences with immersive technologies;
- benefits of listening from different points of the theatre;
- benefits of knowing the architecture and acoustics before the performance;
- benefits of activating/deactivating different instruments;
- utility for a specific type of theatre or performance;
- effectiveness of the tool in attracting new audience.

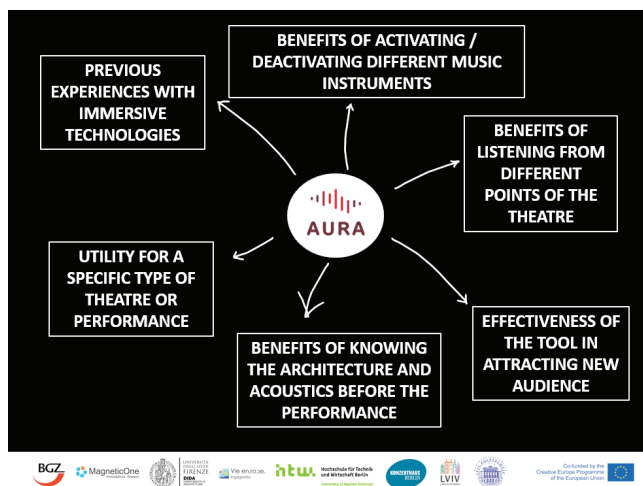


Fig. 6 – Canvas for round tables (Experts)
Schema per le round table (Esperti)

3 | Analysis of collected data

The total number of participants to the AURA immersive experiences was 155, which corresponds to the same number of collected and completed questionnaires distributed as follows:

- 70 questionnaires by the general public;
- 41 questionnaires by technicians;
- 44 questionnaires by experts.

Additionally, field notes of the round table discussions with a total of 85 participants (technicians and experts) were collected and analysed.

3.1 | Results for general public

Demographic profile and habits related to theatre attendance

The number of female participants is greater than the male one (44 versus 26). The majority of the respondents is in an age range between 18 and 40 years and has at least a high school diploma. As regards their occupation, the largest group (65%) corresponds to students.

The sample group is composed of a majority of non-theatre-goers. Less of 10% of the subjects attend a music performance more than 5 times a year. The great majority of respondents (80%) usually enjoys music using streaming platforms. Instead, “Enjoying music at theatre” is the option chosen by just 3% of the sample. When comparing it with the question “Why you go to music theatre?”, the motivation indicated with more frequency was: to listen to a richer, louder, more real sound (31 out of 70).

3.1.1 | Audio and audio-video experiences

As regards the results concerning the audio experience, 93% of the participants declared that the audio experience met their expectations – at least “moderately”.

When asked to assess the audio-video experience in the three theatres, 32% of the participants indicated that had perceived significant acoustic differences when listening from different points of the theatre. 47% of the respondents perceived acoustic differences in a moderate way (Figure 7).

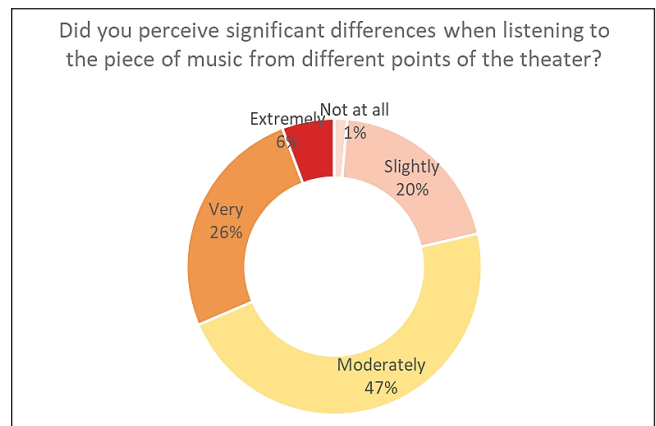


Fig. 7 – Perceptions of acoustic environment
Percezione dell'ambiente sonoro

According to a great majority of participants (66%), the possibility to listen to the piece of music from positions which are usually difficult to access (e.g., the stage) or less affordable (e.g., the first rows) is an added value compared to the real experience.

The Berlin Konzerthaus was selected by the majority of participants as the theatre where they had the most enjoyable audio-video experience.

The immersive experience was mainly defined as “evocative” and “enjoyable”.

3.1.2 | Future developments

Notably, 66% of the participants claimed that their willingness to go to the theatre increased after the experience (Figure 8), demonstrating the potential of the tool to attract new theatre audience.

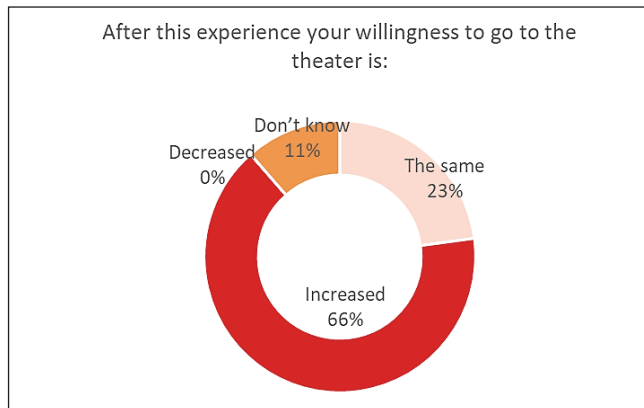


Fig. 8 – Willingness to go to theatre
Desiderio di andare a teatro

Figure 9 shows that the general public is extremely interested in having at home the kind of immersive experience like the one enjoyed at the laboratory. Furthermore, respondents identified the possibility of attending a performance when it is not possible to go to the theatre or the theatre is far from home as significant potentials of the auralisation tool (Figure 10).

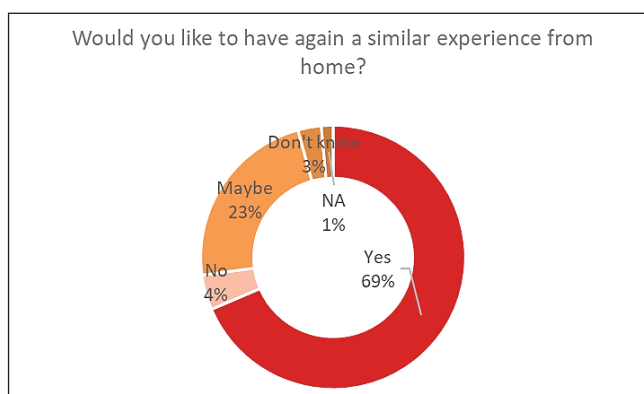


Fig. 9 – Immersive experience from home
Esperienza immersive da casa

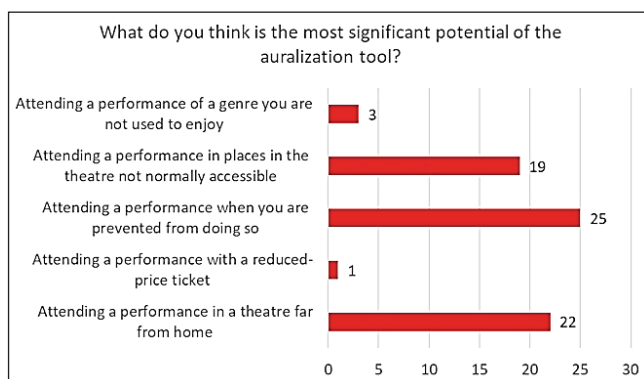


Fig. 10 – Potentiality of the auralisation tool
Potenzialità dell'auralizzazione

3.2 | Results for technicians

Demographic profile and habits related to theatre attendance
The sample is equally distributed by gender and the majority of the respondents is in an age range between 26 and 40 years. Participants are mainly architecture or engineering students (42%), architects (24%) and designers (24%); whereas only 5% of the sample is made up of acoustic designers. 7% of the sample has already dealt with acoustical and 5% with architectural design or requalification of a theatre.

63% of participants enjoy cultural events more than 6 times a year. However, technicians rarely enjoy live streaming or attend in-person music shows.

3.2.1 | Round tables

Architects agreed that the immersive tool is useful during the design process as it allows to test ideas, evaluate the performance of materials not only aesthetically but also acoustically and enables a complete perception of space.

The main benefit identified by acoustic designers deals with the acoustic simulation provided by the auralisation technique that allows to show design results to the clients for a better understanding and enjoyment of the designed spaces. Before they are built.

Participants suggest the following additional potential applications of auralisation in their field:

- To provide a virtual reality experience of urban parks and soundwalks.
- To offer alternative way to visit archaeological sites through a virtual reproduction of ancient sites.
- To give the possibility to join events in indoor and outdoor environments (e.g., fairs, exhibitions).
- To check construction sites.
- To design acoustic barriers.

3.3 | Results for experts

Demographic profile and habits related to theatre attendance
The majority of the respondents (66%) is in an age range between 41 and 65. Half of the sample is composed by musicians, and pianists represent the largest group. 14% of the participants are singers, while the number of actors is less relevant (4% of the total).

Not surprisingly, the expert group is composed of persons who are likely to participate to cultural events and are theater-goers; 73% of the participants attend a cultural event more than 6 times a year.

3.3.1 | Round tables

No participants to round tables belonging to the experts' group had used audio-video immersive tools before for work-related activities.

Experts agreed that the possibility to listen to the music piece from different points of the theatre and to appreciate acoustic differences is particularly useful to evaluate the spatial response of a music performance and to identify the best points on stage for actors' voice output. This was considered particularly helpful to test and evaluate the acoustic response of the theatre or other spaces before the performance, especially as regards recently built theatres whose acoustic is not well known by artists. According to the majority of experts, immersive experiences are useful for didactic purposes. Several potentialities as marketing tool were also identified; e.g., the integration of auralisation in virtual reality can give theater audience the possibility to hear online what the acoustic response might be from a specific seat to be booked. Also, a participant suggested the following: "an instrument of this kind instead of being used to enjoy a "traditional" theatre experience can open up new avenues for completely new performances in a virtual environment, specifically designed to make the most of the innovative technological application".

Notably, many participants identified the need to enhance the AURA 3D models in terms of acoustic performance with technical improvements (e.g., as regards signal amplitude and reverberation at different positions) to provide a better reproduction of the sound environment of a real space.

4 | Discussion on results and ongoing project activities

Thanks to the organized sessions, 155 participants enjoyed the AURA immersive experiences designed and conducted by Vie en.ro.se Ingegneria project partner. Results demonstrate that virtual immersive theatre experiences provide a great tool for audience to enjoy performances from the comfort of their own homes. Indeed, the great majority of the general public sample, mainly composed of young people and non-theatre goers, defined the AURA immersive experience as "evocative" and "enjoyable" and expressed their desire to have a similar experience at home. Specifically, enjoying the possibility to listen to the piece of music from points of the theatre which are usually difficult to access was generally considered an added value compared to the real experience.

The sample also identified the possibility of attending a performance when it is not possible to go to theatres (e.g., during COVID-19 pandemic restrictions or for patients in hospital), or the theatre is far from home, as useful applications of the auralisation tool. Data also show that the immersive experiences have the potential to attract new theatre audience, especially young people.

Round table discussions have shed light on the diversity of potential applications for auralised 3D models encompassing the integration of auralisations in architect workflows, application as marketing tools for theatres, teaching instruments, and their use for new performance practices.

Some limitations were also pointed out in particular by musicians. Specifically, they explained that a gap still exists between the real experience and the immersive 3D simulated environment which still makes them prefer the real experience to the virtual one to become aware of the architecture and acoustics of a theatre before a performance. A possible future development for the effective use of the tool by the specific musicians target group could be in this sense to carry out an auralisation process as accurate as possible [3]. Building on the results of the immersive experience sessions and in order to widely disseminate findings, three different video tutorials are being designed by Vie en.ro.se Ingegneria, targeting three stakeholder groups: interested adults (belonging to general public), children (belonging to general public) and the technicians. It was considered appropriate not to match the three target groups with those chosen for the enjoyment of the auralisation experience, deciding to focus on those who, according to the project partners, can most benefit from these tools. Examples are illustrated in Figures 11 and 12.

Target	General Public	-
Pills	1. A Brief Overview on Acoustics	<p>Contents Basics of acoustics, room acoustics</p> <p>Running time 5 minutes</p> <p>Language Italian - Familiar</p>
	2. Auralization and the Potentiality of the Tool	<p>Contents Auralization: explanation of the term "Auralization", in analogy with "Visualization", and opportunities of the tool.</p> <p>Running time 5 minutes</p> <p>Language Italian - Familiar</p>
	3. The AURA Project	<p>Contents Presentation of the AURA Project, the experience set at the DIDA Lab and the involved public.</p> <p>Running time 5 minutes</p> <p>Language Italian - Familiar</p>

Fig. 11 – Structure of the video tutorial for General Public
Struttura del video tutorial per il Pubblico



Fig. 12 – Extracts from the video tutorial for children
Estratti dal video tutorial per i bambini

5 | Conclusions

The assessment of end-users experiences of the auralised 3d models for theatres has pointed out that auralisation can offer valuable immersive experience providing an exciting alternative to live performances and promoting the enjoyment of cultural heritage. Our study also suggests that music communities and technicians are very interested in adopting auralisation tools for a variety of purposes. To this end, taking on board the highlighted current limitations is crucial to enhance the AURA tools and make auralisation of cultural places accessible to future developments and uses.

Conclusioni

La valutazione delle esperienze degli utenti dei modelli 3D auralizzati, applicati ai teatri, ha evidenziato che l'auralizzazione offre la possibilità di una esperienza immersiva virtuale che è in grado di fornire una alternativa alle performance dal vivo e di promuovere la fruizione del patrimonio culturale. Il nostro studio suggerisce che la comunità musicale e i tecnici sono molto interessati ad adottare strumenti di auralizzazione per una varietà di scopi. È dunque importante prendere in considerazione i limiti che sono emersi, per potenziare gli strumenti sviluppati dal progetto e rendere l'auralizzazione dei luoghi culturali accessibile a futuri sviluppi e applicazioni.

Acknowledgements

Authors thanks all the partners for the synergic collaboration for the definition of the models and the implementation of the applications, and the Creative Europe Programme of the European Union for the financial support.

References

- [1] R. Suarez, A. Alonso, J. Sendra, Virtual acoustic environment reconstruction of the hypostyle mosque of Cordoba. *Applied Acoustics*, 140, 214-224. (2018) DOI: 10.1016/J.APA-COUST.2018.06.006.
- [2] B. Fazenda, I. Drumm, Recreating the sound of Stonehenge. *Acta Acustica united with Acustica*, 99(1), 110-117. (2013) DOI: 10.3813/AAA.918594.
- [3] D. Thery, V. Boccaro, B.F. Katz, Auralization uses in acoustical design: A survey study of acoustical consultants. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 145(6), 3446-3456 (2019). DOI: 10.1121/1.5110711.
- [4] S.Pelzer, L. Aspöck, D. Schröder, and M. Vorländer, Integrating real-time room acoustics simulation into a CAD modeling software to enhance the architectural design process. *Buildings*, 2, 113-138 (2014). DOI: 10.3390/buildings4020113.
- [5] D. Poirier-Quinot, B.N. Postma, B.F.G. Katz, Augmented auralization: Complimenting auralizations with immersive virtual reality technologies, in *Proceedings of the International Symposium on Music and Room Acoustics (ISMRA)*, September 11-13, La Plata, Argentina, pp. 14:1-10 (2016).
- [6] Aristat Agency, *Orchestral Audiences. A nation-wide study – 2013/2014 season*. Association Française des Orchestres (2015).
- [7] C. Bradley, *National Classical Music Audiences. An analysis of Audience Finder box office data for classical music events 2014-2016*. The Audience Agency (2017).
- [8] Advisory Board for the Arts (ABA), *Opera Patrons ABA Audience Survey Data* (2020).
- [9] T. Baker, *Stop Re-inventing The Wheel. A guide to what we already know about developing audiences for Classical Music*. Association of British Orchestras (2000).
- [10] K. Dilokkunanant, *Strategies for classical music audiences: an exploration of existing practices used by western European art music organizations*. DMA (Doctor of Musical Arts) thesis, University of Iowa (2019).

The restoration of the Theatre of Arts Academy in Tirana – Acoustic analysis and design of the new Orchestra pit

Simone Secchi^{a*} | Veronica Amodeo^a | Fabio Capanni^a | Riccardo Renzi^a |
Lamberto Tronchin^b

^a Dipartimento di Architettura,
Università degli Studi di Firenze

^b Dipartimento di Architettura,
Università degli Studi di Bologna

* Corresponding author:
simone.secchi@unifi.it

Ricevuto: 23/10/2022

Accettato: 22/12/2022

DOI: 10.3280/ria1-2023oa14809

ISSN: 0393-1110

ISSNe: 2385-2615

The origin of the Theatre of Arts Academy of Tirana dates back to the early 20th Century, based on the design of the Italian architect Gherardo Bosio. It was almost abandoned in the last 20 years and only recently a complete renovation has been undertaken, including the extension of the Orchestra pit.

Measurements were carried out at different points in the stalls, in the gallery and in the lodges, using both balloon bursting and sine sweep convolution technique. The results of the measurements achieved in each of the areas with the two different techniques were compared with each other and with the reference values given by literature.

According to the measurements, the Theatre appears to be rather *dull*, but is nevertheless listed as one of the best theatres in Albania.

We used acoustic measurements (monaural and binaural IRs) to calibrate the 3D simulation model and to elaborate the new acoustic design of the Theatre, the most important part of which concerns the reopening of the Orchestra pit, which had been closed and unused for the past decades.

The paper briefly reports the history of the Theatre and the most important outcomes of measurements and simulations.

Keywords: theatre, orchestra pit, reverberation time, acoustic design

Il restauro del Teatro dell'Accademia delle Arti a Tirana – Analisi acustiche e progetto della nuova fossa d'orchestra

Il Teatro dell'Accademia delle Arti di Tirana è stato realizzato all'inizio del XX secolo su progetto dell'architetto fiorentino Gherardo Bosio. Solo recentemente è stato avviato un ampio intervento di restauro dell'edificio in abbandono da 20 anni, che ha incluso la riapertura e l'ampliamento della fossa d'orchestra.

Sono state effettuate delle misurazioni sia con la tecnica dello scoppio del palloncino che con quella della convoluzione della *sine sweep* in diversi punti della platea, della galleria e dei palchi ed i relativi risultati sono stati confrontati tra loro e con i valori di riferimento forniti dalla letteratura.

In base alle misurazioni, il teatro appare piuttosto *sordo* ma è comunque annoverato tra i migliori teatri di tutta l'Albania.

Le misurazioni acustiche (IR monoaurali e binaurali) sono state poi utilizzate per calibrare il modello di simulazione 3D e per elaborare il nuovo progetto acustico del teatro, la cui parte più importante riguarda la riapertura della fossa dell'orchestra, che era rimasta chiusa e inutilizzata negli ultimi decenni.

L'articolo riporta brevemente la storia del teatro e i risultati più importanti delle misurazioni e delle simulazioni.

Parole chiave: teatri, fossa d'orchestra, tempo di riverberazione, progetto acustico

1 | Introduction

This paper is an extended version of the one presented at the international Symposium "The Acoustics of Ancient Theatres", held in Verona 6-8 July 2022 [1].

The Theatre of the University of Arts of Tirana has been recently involved in a project for the restoration and renovation that has been carried out by the Department of Architecture of the University of Florence in collaboration with the engineering study Atelier4 of Tirana [2-5]. The supporter of

the study was Trans Adriatic Pipeline, TAP, with the agreement of the Ministry of Culture of Albania.

The Theatre is considered by the Albanian Ministry of Culture the one with the best acoustic quality in the whole Albania and therefore the restoration project required a special effort in the acoustic characterization and design.

In this paper we show some of the acoustical investigations performed on the different areas of the Theatre (gallery, stalls and lateral lodges), in order to ensure optimal room acoustics after the restoration works.

2 | The concert hall at the University of Tirana

2.1 | About the history of the Theatre

The origin of the Opera Dopolavoro Albanese in Tirana dates back to the period between 1939 and 1943. During these years, the city underwent a building and territorial transformation that changed Tirana's landscape from the small original city, with a predominantly residential layout, into an urban complex that better reflected the image of a capital city. As part of this political, social and urban planning project that affected the whole of Albania, some Italian architects, mainly from Florence, guided by Gherardo Bosio, were called to contribute actively to the transformation of the city of Tirana.

The Theatre, designed by Bosio and developed by collaborators after his sudden death, reflects that language of classical matrix, made of regular geometries, rhythmic repetitions, and functional expressions, which belong to the Italian architecture of Rationalism and that constantly characterize the work of the author (see Figures 1 and 2).



Fig. 1 – Photo of the time during the Theatre construction works (AEGB - archivio eredi Gherardo Bosio - Firenze)

Foto d'epoca durante i lavori di costruzione del Teatro (AEGB Firenze)

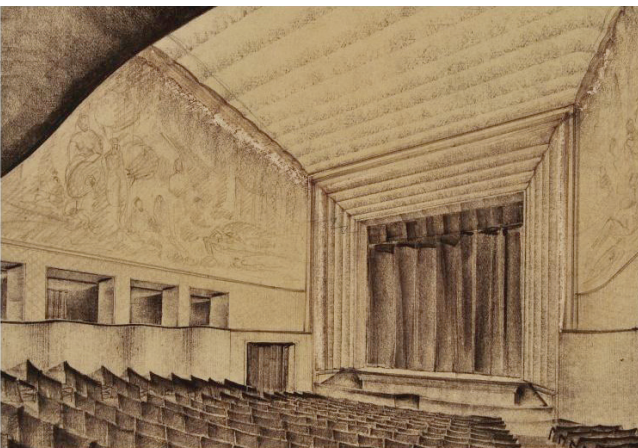


Fig. 2 – Gherardo Bosio, 1939-40. Original design of the Theatre Hall interiors (AEGB Firenze)

Gherardo Bosio, 1939-40. Progetto originario dell'interno della sala del Teatro (AEGB Firenze)

Even though the settlement of the city has changed over time, as well as the surrounding area of the Theatre, where now one can find many other architectures close to the build-

ing which have lost the original linguistic strength, the Opera Dopolavoro Albanese, within which the Concert Hall of the University of Arts is located, and the other architecture and boulevards of the same years are still a fundamental part of the historical identity of the city of Tirana. In fact, the building is currently considered as part of the Historical Heritage of Monumental Axis of Tirana: it's located in the historic center of the city, within a national importance area, declared protected since 2017, as architectural, cultural, heritage of 20th Century (see Figure 3).



Fig. 3 – Aerial photo: bottom left, in red, the Theatre in its current; the right side, the new stadium in Tirana

Fotografia aerea: in basso, evidenziato in rosso, il Teatro allo stato attuale; a destra, il nuovo stadio di Tirana

2.2 | About the Theatre

In the functional plan, it is possible to divide the Theatre into four parts corresponding to different development activities (see Figure 4): the hall, the stage and the stage tower, the Orchestra pit and the technical rooms at the lowest level.

The hall of the Theatre has a volume of about 5000 m³ and is characterized by the presence of the stalls surmounted by the gallery, both flanked by an order of double lodges. Both stalls and gallery have a similar number of seats.

The stalls have a carpeted floor and a suspended ceiling that completely encloses a glazed roof, provided by the original design of the Theatre but partially realized. The original

armchairs have been partly removed and replaced with different models.

The Orchestra pit was closed during the last decades with a light iron structure and wooden paving built to expand the stage. This space is lined with dark wood, the same used also in the other parts of the Theatre.

The scenic tower is composed of superimposed orders service and technical rooms.



Fig. 4 – Plan and section of the Theatre at the current state
Pianta e sezione del Teatro allo stato attuale

According to the literature [6] considering the volume of the hall, the optimal reverberation time should be between 1.3 s (for operas and theatrical performances) and 2.4 s (for classical music).

2.3 | The aims of restoration project

The main aim of the Department of Architecture of the University of Florence feasibility study was to define a restoration and refurbishment of the Theatre such as to identify, bring to light and protect the constructive and language characteristics of Bosio's project, and at the same time to guarantee an optimal and safe use of the building, in terms of technological and legislative adaptation, usability and accessibility, minimizing as much as possible the alteration of the original identity of the Theatre (see Figures 5 and 6).

The main specifications for the acoustic project of the restoration of the Theatre concern the reduction and restoration of armchairs, the replacement of curtains and the restoration and enlargement of the Orchestra pit. To achieve this increase of the size of the pit, the floor plan was significantly modified from its original dimensions. It was also foreseen



Fig. 5 – Interior photo showing the Theatre Hall at the current state
Foto interna che mostra la sala del Teatro allo stato attuale



Fig. 6 – Interior rendering showing the restoration design of the Theatre Hall
Rendering interno che mostra il progetto di restauro della sala del Teatro

the installation of a mobile platform to allow the height of the Orchestra pit to be varied, according to the needs of the performances.

Moreover, a new rehearsal room was designed under the stage (see Figure 4).

3 | Measurement procedure

The impulse response measurements were carried out in the Theatre in February 2020.

Due to the operational requirements of travelling to Albania, only lightweight and easily transportable instrumentation was used for measurements. In particular, the signal was acquired with

a 1/2-inch diffuse field microphone and recorded in a 4-channel digital recorder Zoom H4n model. In addition, two Sennheiser in ear microphones were used for binaural measurements.

The results of the measurements were then processed with the software Audacity for windows with the Aurora plug in for Audacity.

Two different types of fixed sound sources were used:

- the Theatre's loudspeakers, with a "sine sweep" audio signal generated by the PC and reproduced by the Theatre's amplification system. In this case, the measurement was then convolved by means of the plugin "Aurora" for Audacity® into a corresponding impulse response [7] and the position of the two loudspeakers was that envisaged by the Theatre (frontal, lateral to the stage, figure 7, S2 a and b);
- an impulse source consisting of the bursting of balloons with a diameter of 40-45 cm; the balloons were all sequentially burst from the stage at the position shown in figure 7 (S1).
- Care was taken to maintain a random and non-symmetrical distribution of microphone positions during the measurements (see Figure 7). Measurement positions R10-R12, not shown in figure 7, were placed in the gallery and in the lateral lodges.



Fig. 7 – Source and measurement positions in the stalls (R1 – R6), in the central stage (R7) and in the lower side lodges (R8 and R9); S1 = position of the impulse source; S2a,b = positions of the two loudspeakers

Posizioni delle sorgenti e dei punti di misura nella platea (R1 – R6), nel palco centrale (R7) e nei palchi laterali inferiori (R8 e R9); S1 = posizione della sorgente impulsiva; S2a,b = posizioni dei due altoparlanti

4 | Measurement results

We obtained the impulse responses in the different positions and in both omnidirectional monaural and binaural modes, using the two measurement methods described (balloons and sine sweep), then we analyzed the following parameters:

- Reverberation time T_{30} ;
- Clarity C_{50} ;
- Clarity C_{80} ;
- Barycentric instant t_s ;
- Early Decay Time EDT;
- Sound Strength G.

Moreover, Speech Transmission Index measurements were also carried out.

The results referred to the 12 measuring points of T_{30} and C_{80} , measured with the sine sweep technique and the omnidirectional microphone, are shown in Figures 8 and 9.

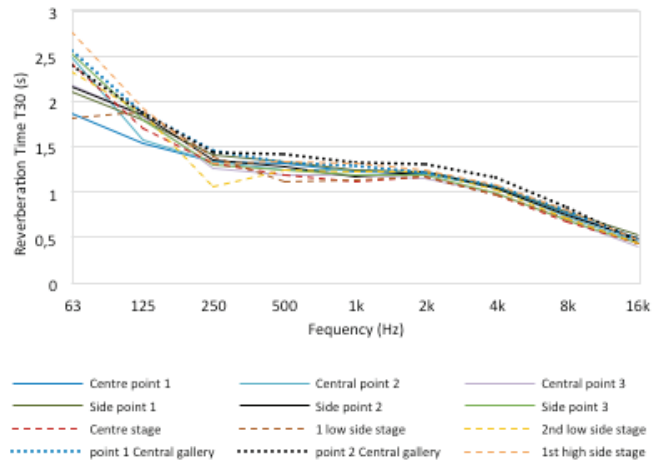


Fig. 8 – Reverberation time T_{30} , in octave frequency bands in the 12 measurement positions

Tempo di riverberazione T_{30} , in bande di ottava nei 12 punti di misura

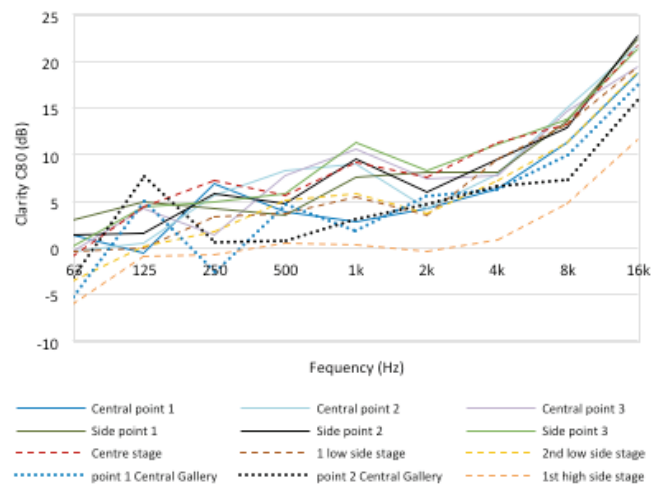


Fig. 9 – Clarity C_{80} , in octave frequency bands in the 12 measurement positions

Chiarezza C_{80} , in bande di ottava nei 12 punti di misura

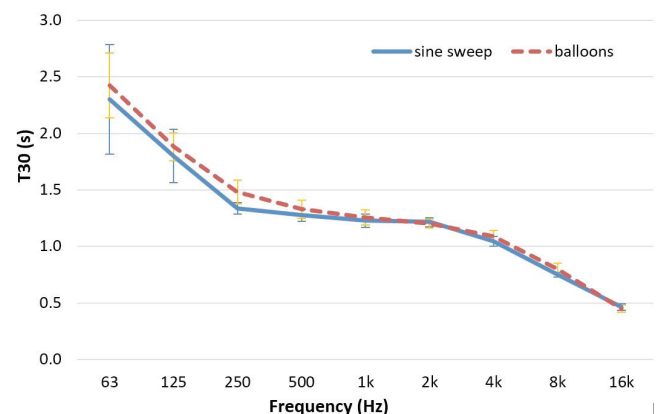


Fig. 10 – Comparison of averages of Reverberation Time (T_{30}) results with the two measurement techniques adopted (error bars are given by \pm standard deviation)

Confronto tra i valori medi delle misure di Tempo di Riverbero (T_{30}) ottenuti con le due tecniche di misura (le barre di errore sono date da \pm la deviazione standard delle misure)

Figure 10 shows a comparison between the average values of the reverberation time in the 12 measuring points obtained with the two techniques.

A good repeatability of the measurement results obtained with the two signal techniques can be observed. Moreover, the average values of T_{30} obtained at the different locations are quite repeatable and therefore “stable”. Figure 11 shows the values of the average T_{30} in the stalls, gallery and lodges positions.

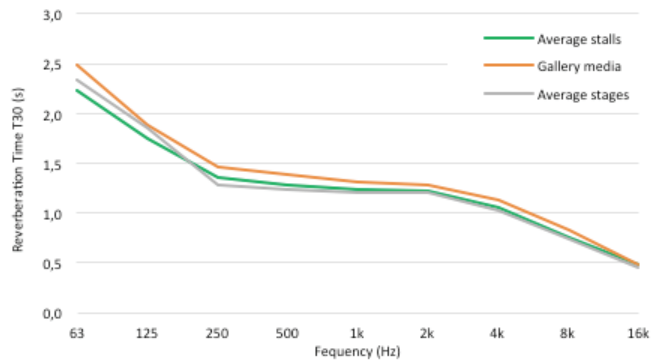


Fig. 11 – Average values of Reverberation Time (T_{30}) in the stalls, gallery and lodges
Valori medi del Tempo di Riverbero (T_{30}) misurato nella galleria, nella platea e nei palchi

Considering the Theatre’s volume of approximately 5000 m³ and referring to the value assumed by the reverberation time at 500 Hz it can be said to have a rather “dry” acoustics, i.e. it has a low reverberation that is well suited to theatrical performances and listening to speech.

With regard to listening to music, for which a greater contribution of reverberation is normally required, the Theatre is probably a little “dull” at high frequencies, i.e. it has a slightly too low reverberation time.

5 | Main indications of the restoration project

The most relevant acoustic changes connected with the restoration project of the Theatre were:

- restoration and reopening of the Orchestra pit;
- reduction of seats in the stalls by about 35%;
- reduction of seats in the gallery by about 30%;
- refurbishment of all plants and of all interior finishes (plasters, stuccos, etc.);
- elimination of the carpets of the gallery;
- elimination of the curtains of the lodges.

The main aim of the restoration project was the conservation of the actual acoustics of the Theatre. At this purpose, in agreement with the design team, the main acoustics issues of the project were:

- the design of the new Orchestra pit;
- the design of the new rehearsal open space under the stage;

- the selection of the new armchairs;
- the selection of the new curtains.

The new armchairs have been designed on the base of the Bosio’s original model. New armchairs, produced in Spain by Euro Seating, have a weighted sound absorption coefficient of 0.70 (MH).

In order to maintain an acoustic response similar to the current one in the lodges, where the curtains will be removed, it was also necessary to insert sound-absorbing panels on the lateral walls inside them.

Figure 12 shows the comparison of the average value of T_{30} according to the measurements and simulations.

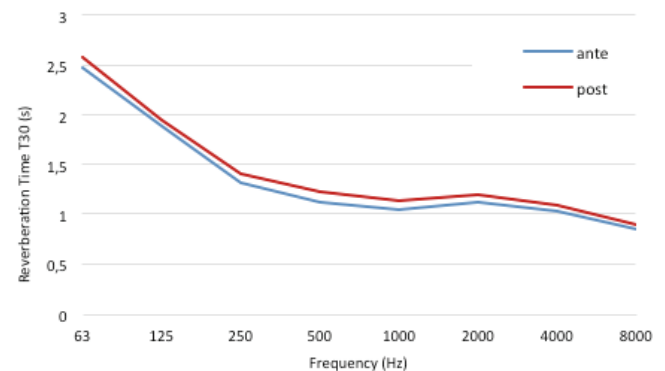


Fig. 12 – Comparison of average of Reverberation Time (T_{30}) results before and after the Theatre Hall restoration project (simulations)
Confronto tra i valori medi del Tempo di Riverberazione (T_{30}) prima e dopo gli interventi di restauro della sala del Teatro (ottenuti dalle simulazioni)

Anyway, the main acoustic design efforts concerned the renovation of the Orchestra pit.

5.1 | Orchestra pit requirements

The main characteristic of an Orchestra pit is the high sound level due to the early reflections which causes a low reverberation sensation compared to the rest of the Theatre; indeed, the sound level due to the early reflections must not exceed a certain range, beyond which it can cause a masking of the reverberated sound [8].

The main problem with the Orchestra pit is usually finding excessive sound levels in some places compared to others; another problem is resonance, especially at low frequencies [9], which can be solved by inserting bass-traps. Moreover, it is important to consider the different combinations of pit floor levels, the material with which it is covered, whether diffusing, reflecting or absorbing, and how this is applied and directed, so as to optimize the acoustics within the Orchestra pit and at the same time, balance its transmission to the hall and stage. Lowering the floor of the pit and adding absorbent material, in fact, changes the relationship between the early energy of the sound and the energy of the

late reflections: in particular, by lowering the floor, the late reflections are higher; by inserting absorbent material, the early ones are higher [10] and the sound level decreases; however, this could increase the difficulty of listening between the musicians and the conductor [11, 12].

A way to have a better sound transmission from the pit to the audience [13] could be to insert reflectors above the pit; instead, a way to better transmit the sound from the pit to the audience could be to modify the height of the parapet surrounding the pit [14].

A widely used solution that theoretically helps to create a more diffuse sound field and improve the overall conditions are diffuser panels.

Although reverberation time is the primary reference for providing an indication of the acoustic qualities of an environment, it does not fully translate the subjective experience of the audience, the musician playing in the pit, or the conductor. To indicate this subjective experience, parameters such as Early Decay Time (EDT), Late Support (STlate) and Sound Strength (G) are used [15] to describe the impression of reverberation. Anyway, this is an attempt to parameterize what is in any case a subjective experience, which can be influenced by many factors, including the listening judgement of the musician, choir or conductor.

5.2 | Orchestra pit restoration

Considering the above indications and the architectural and historical constraints of the Theatre, the following indications emerged from the analysis of the measurement results and from the simulations: the side wall and the floor of the Orchestra pit must be lined in wood, as previously; moreover, it was necessary to apply sound-absorbing material in the ceiling of the covered part of the pit.

Therefore, an acoustic system consisting of panels that can take three different configurations was designed, so that the acoustic response within the orchestral pit can be modified according to the requirements of conductor and musicians.

The panels consist of a 100 cm thick layer of polyester fiber with a density of 40 kg/m³ and flow resistivity of about 5,000 Pas/m², an air gap 10 mm thick and a rigid wood panel 15 mm thick, which can be replaced with another one with holes with diameter of 10 mm and distance of 100 or 50 mm (or a panel with half surface with holes spaced 50 mm and half surface with holes spaced 100 mm to broaden the spectrum of sound absorption – Figure 13).

Each panel, placed in the rear wall and/or in the ceiling of the Orchestra pit (see Figures 14), is independently adaptable, this allows to choose the configuration of the panels, according to the number and distribution of musicians and to the needs of the conductor and orchestral players, varying the acoustic response of the orchestra pit in frequency.

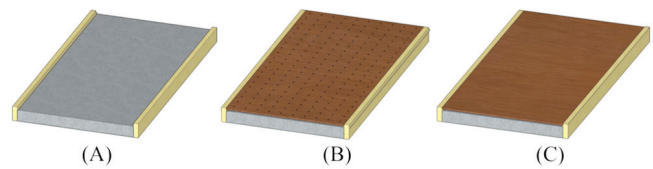


Fig. 13 – Acoustic system with three different possible configurations: (A) high frequency sound absorbing panel (not covered by the wood panel); (B) low frequency sound absorbing panel (covered by the drilled wood panel); (C) sound reflecting panel (when covered by the smooth wood panel)
Sistema acustico con tre diverse configurazioni: (A): pannello assorbente alle alte frequenze (in fibra poliestere non coperta dal pannello in legno); (B): pannello assorbente alle basse frequenze (coperto con il pannello in legno forato); (C): pannello riflettente (coperto con un pannello in legno liscio)

Three possible panel configurations are shown in the figure 13:

- (A) the panel is not covered with any wood layer, making an high frequency sound absorber;
- (B) the panel has a perforated wood cover, making a low frequency sound absorber;
- (C) the panel has a smooth rigid wood cover, making a reflecting surface.

The sound absorption coefficient of these panels has been calculated according to the Allard and Champoux model for rigid panels [16, 17]. The flow resistivity of the polyester fiber has been calculated according to the Garai and Pompoli model [18].

Moreover, since the simulations carried out by means of a finite element model showed that stationary waves may occur at low frequencies, mainly because of the parallelism between the two opposite walls of the pit, the doors of the back wall were retracted so to create a sound spreading surface (see Figure 14).

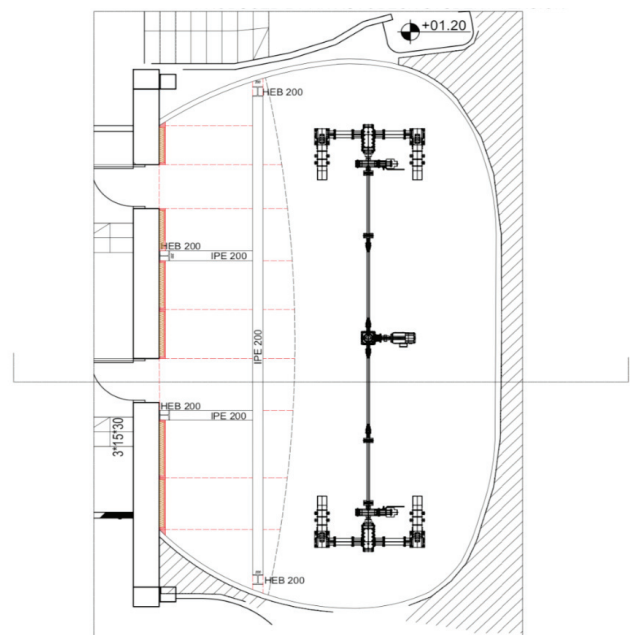


Fig. 14 – Orchestra pit plant showing the position of the variable acoustic panels (in red)
Pianta della fossa d'Orchestra che mostra la posizione dei pannelli ad acustica variabile (in rosso)

The parapet, that separates the Orchestra pit from the stalls, has a very important acoustic function, to reflect the sound rays coming from the stage and the pit. For this reason, it was tilted 7° toward the stalls to better reflect sound toward the stage (see Figure 15).

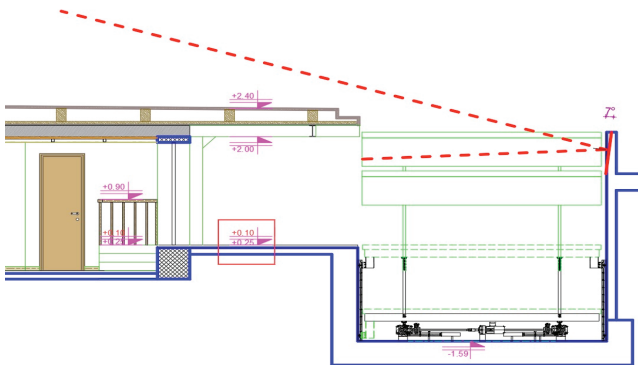


Fig. 15 – Orchestra pit parapet design to improve the propagation of sound from the Orchestra pit toward the stage and vice versa
Progetto del parapetto della fossa d'orchestra per migliorare la propagazione del suono dalla fossa d'orchestra verso il palcoscenico e viceversa

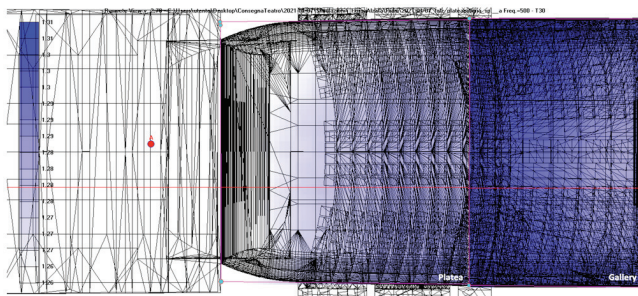


Fig. 16 – Ramsete® software simulation – Reverberation Time (T30) at 500 Hz at the stalls level and at gallery level (raised Orchestra pit configuration)
Simulazione del software Ramsete® – Tempo di riverbero (T30) a 500 Hz simulato al livello della platea e della galleria (con la fossa d'Orchestra coperta)

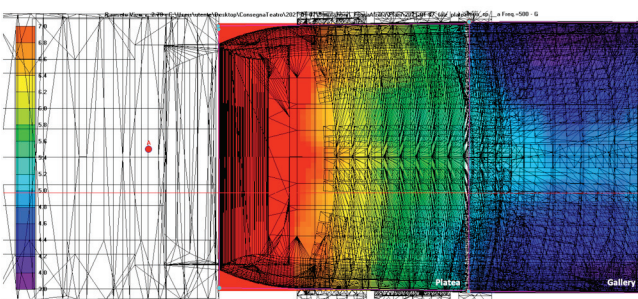


Fig. 17 – Ramsete® software simulation – Sound Strength (G) at 500 Hz at the stalls and at the gallery level (raised Orchestra pit configuration)
Simulazione del software Ramsete® – Forza (G) a 500 Hz simulato al livello della platea e della galleria (con la fossa d'Orchestra coperta)

To ensure an acoustic response similar to the current one, we performed some simulations of the Hall within the design model, using the Ramsete® 2.7 raytracing simulation software [19]. Simulation of Reverberation Time (T30) and Sound Strength (G), run within the design model in the stalls and gallery, are shown in Figures 16-17. These show that the acoustic response of the stalls and gallery in terms of Reverberation Time (RT) and Sound Strength (G) at 500 Hz, in the design configuration, is quite homogeneous, furthermore, the acoustic parameters of the design state, resulting from the simulations, are very near to those measured at the current state.

6 | Conclusions

The renovation of the Theatre of Arts Academy in Tirana involved the refurbishment of all interior finishes (plaster, curtains, flooring etc.), the replacement of all the armchairs and the opening and extension of the Orchestra pit, as well as the refurbishment of all installations. The project aimed to maintain the Theatre's original appearance and acoustic response.

According to the results of the simulations based on the results of the measurements described in the previous paragraph, the acoustic response of the room is slightly more reverberating at the medium frequencies (see Figure 12). However, this modification falls within the limits of tolerance and uncertainty of the calculation method and in any case should not alter the acoustic perception in the Theatre compared to the current condition.

The new design of the Orchestra pit should allow for better acoustics inside the pit for both musicians and actors on stage and the audience, while preserving the visual requirements and the original configuration of the space.

Conclusioni

Il progetto di restauro del Teatro dell'Accademia delle Arti di Tirana ha comportato il rifacimento di tutte le finiture interne (intonaci, tendaggi, pavimenti, ecc.), la sostituzione di tutte le poltrone e l'apertura e l'ampliamento della fossa orchestrale, oltre al rifacimento di tutti gli impianti. Il progetto mirava a mantenere l'aspetto originale del teatro e la sua risposta acustica.

Secondo i risultati delle simulazioni basate sulle misure descritte nel paragrafo precedente, la risposta acustica della sala è leggermente più riverberante alle medie frequenze (vedi Figura 12). Tuttavia, questa modifica rientra nei limiti di tolleranza e incertezza del metodo di calcolo e in ogni caso non dovrebbe alterare la percezione acustica del teatro rispetto alla condizione attuale.

Il nuovo design della fossa orchestrale dovrebbe consentire una migliore acustica all'interno della fossa sia per i musicisti e gli attori sul palco che per il pubblico, preservando al contempo i requisiti visivi e la configurazione originale dello spazio.

Acknowledgements

The restoration project has been funded by the Trans Adriatic Pipeline with the collaboration of the Ministry of Culture of Albany. The authors wish to thank engineer Fabio Brocchi and all the team of the engineering study Atelier4.

References

- [1] Amodeo, V., Capanni, F., Renzi, R., Ruoran, Y., Secchi, S., Tommasino, M.C., Tronchin, L., Acoustics of the Teatro dell'Accademia delle Arti in Tirana (Albania) – spatial sound analysis, in Proc. of Symposium “The Acoustics of Ancient Theatres”, Verona 6-8 July 2022.
- [2] Renzi, R., Gherardo Bosio. Opera completa 1927-1941, Edifir, Firenze, 2016.
- [3] Renzi, R., *Tirana, Edificio O.D.A.*, in Tramonti, U. (a cura di), Architettura e urbanistica nelle terre d'oltremare. Dodecaneso, Etiopia, Albania (1924-1943), Bonomia University Press, Bologna, 2017, pp. 231-233.
- [4] Renzi, R., Feasibility study for the restoration and recovery of the Theatre of the Academy – University of Arts in Tirana, in «Evolution», Vol. I, Issue 2, May 2021, pp. 93-102.
- [5] Renzi, R., Lo studio di fattibilità per il Restauro ed il Recupero del Teatro dell'Accademia – Università delle Arti di Tirana / The Feasability study for the Restoration and Recovery of the Academy Theatre – University of Arts in Tirana, in N. Valentin (a cura di), Albania nel terzo millennio. Architettura, Città, Territorio, Gangemi, Roma, 2021, pp. 33-36.
- [6] Spagnolo, R. (edited by), Manuale di Acustica, UTET libreria, 2001.
- [7] Lavagna, L., Shtrepi, L., Farina, A., Bevilacqua, A., Astolfi, A., Acoustic design optimization through the use of auralization: how does it sound like?, Proc. of Symposium “The Acoustics of Ancient Theatres”, Verona 6-8 July 2022.
- [8] Ueno, K., Tachibana, H., Kanamori, T., 2004. Experimental Study on Stage Acoustics for Ensemble Performance in Orchestra. Proceedings of 18th ICA, Kyoto, Japan. <https://doi.org/10.1250/ast.26.345>.
- [9] Zha, X., Fuchs, H.V., Drotleff, H., 2002. Improving the acoustic working conditions for musicians in small spaces, Applied acoustics 63 (2002), pp. 203-221. [https://doi.org/10.1016/S0003-682X\(01\)00024-X](https://doi.org/10.1016/S0003-682X(01)00024-X).
- [10] Van Der Heide, A.H.M., Van Luxemburg, 2011. The Acoustics of Orchestra pits. A case study: Het Muziektheater, Amsterdam – April 2011.
- [11] Gade, A.C., Kapenekas, J., Andersson, B.T., Gustafsson, J.I., 2001. Acoustical problems in Orchestra pits; Causes and possible solutions, Proceedings of International conference ICA2001, Roma, 2-7 September 2001.
- [12] Barron, M., 1993. Auditorium acoustics and architectural design, 1st ed. London: E&FN Spon.
- [13] Halmrast, T., Buen, A., Ihlen, G., 2002. The influence of a large reflector over the orchestra pit in an opera house, Oslo: Brekke and Strand Acoustics. www.akutek.info/Papers/TH_AB_Gl_Folketeateret.pdf.
- [14] Parati, L., Prodi, N., Pompoli, R., 2007. Computer model investigations on the balance between stage and pit sources in opera houses, Applied acoustics, 68(2007), pp. 1156-1176. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2006.06.008>.
- [15] Dammerud, J.J., Barron, M., Kahle, E., 2010. Objective assessment of acoustic conditions on concert hall stages – limitations and new strategies. Proceedings of the International Symposium on Room Acoustics, ISRA 2010. www.acoustics.asn.au/conference_proceedings/ICA2010/cdrom-ISRA2010/Papers/O1a.pdf.
- [16] Allard, J.F., Atalla, N., “Propagation of Sound in Porous Media: Modelling Sound Absorbing Materials”, Second Edition. John Wiley & Sons, 2009. doi:10.1002/9780470747339.
- [17] Allard, J.F., Champoux, Y., “New empirical equations for sound propagation in rigid frame fibrous materials”, 1992, J. Acoust. Soc. Am., 91(6), 3346-53. <https://doi.org/10.1121/1.402824>.
- [18] Garai, M., Pompoli, F., “A simple empirical model of polyester fibre materials for acoustical applications”, December 2005, Applied Acoustics 66(12): 1383-1398. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2005.04.008>.
- [19] Farina, A., Validation of the pyramid tracing algorithm for sound propagation outdoors: Comparison with experimental measurements and with the ISO-DIS 9613 standards. *Adv. Eng. Softw.* 2000, 31, 241-250. [https://doi.org/10.1016/S0965-9978\(99\)00053-8](https://doi.org/10.1016/S0965-9978(99)00053-8).

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.

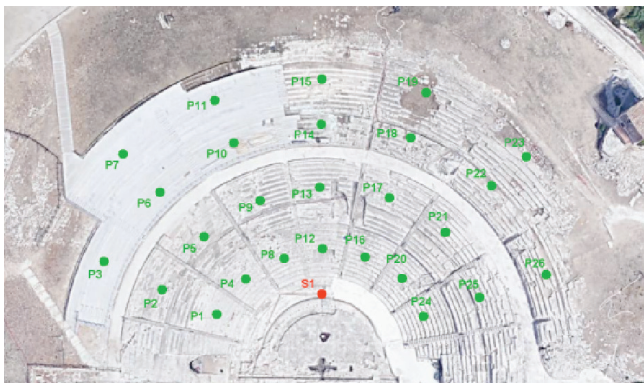


Fig. 2 – Posizioni © 2022 Google
Positions © 2022 Google

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.

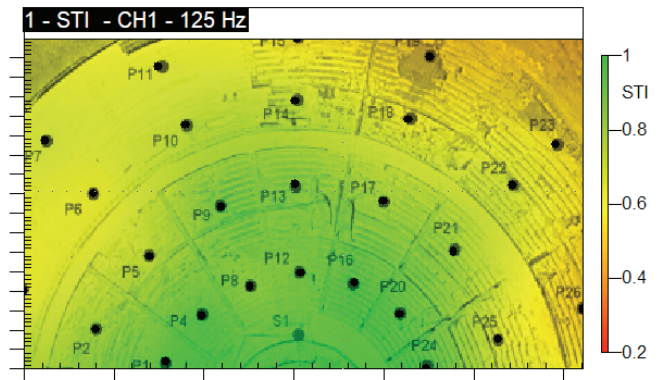


Fig. 3 – STI 125 Hz
STI 125 Hz

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.

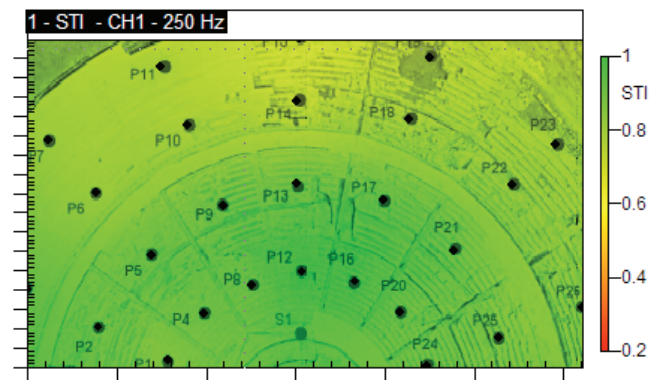


Fig. 4 – STI 250 Hz
STI 250 Hz

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.

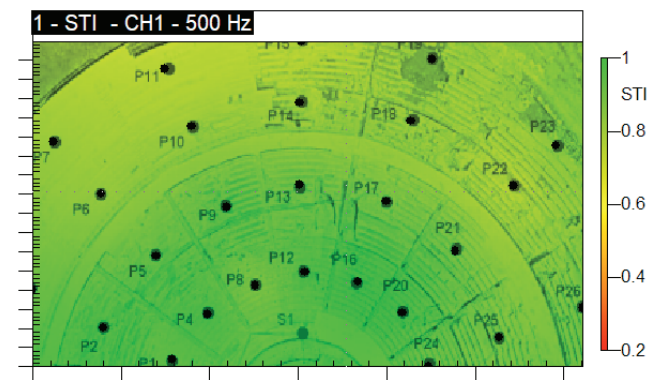


Fig. 5 – STI 500 Hz
STI 500 Hz

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.

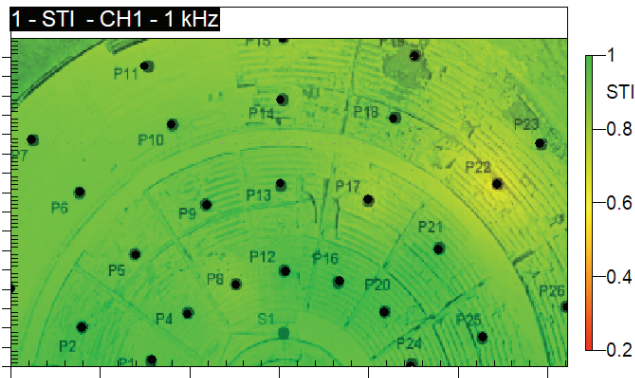


Fig. 6 – STI 1000 Hz
STI 1000 Hz

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

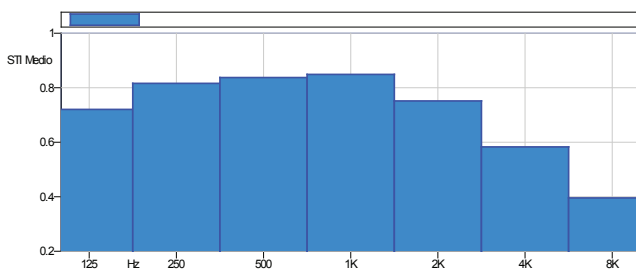


Fig. 7 – STI medio
Averaged STI

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.

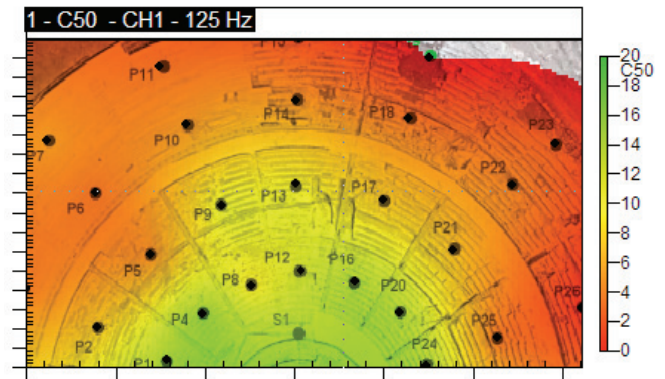
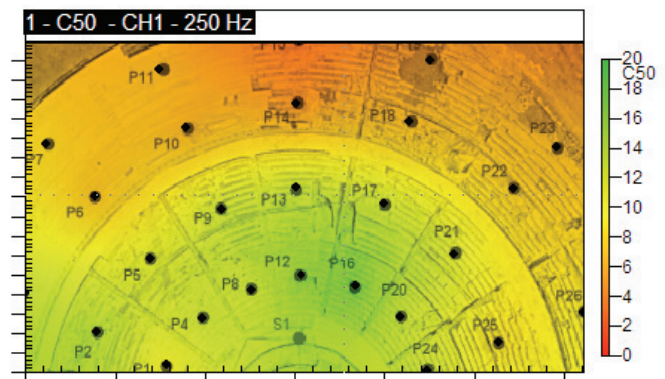


Fig. 8 – C_{50} 125 Hz
 C_{50} 125 Hz

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

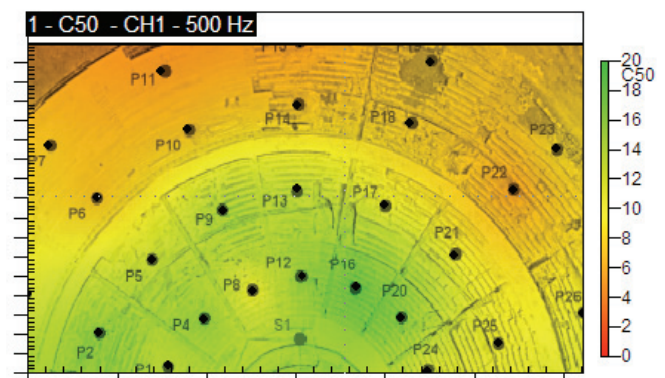


Fig. 10 – C_{50} 500 Hz
 C_{50} 500 Hz

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.

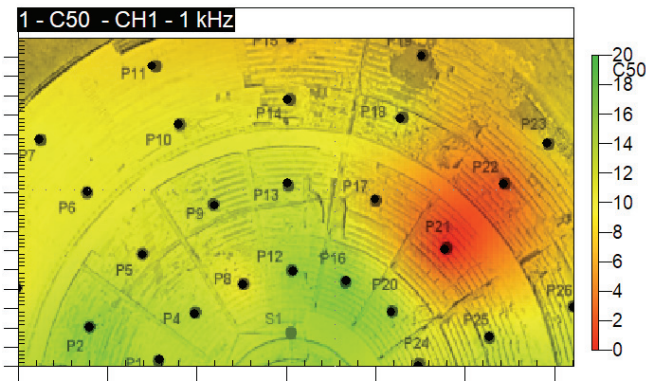


Fig. 11 – C_{50} 1000 Hz
 C_{50} 1000 Hz

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

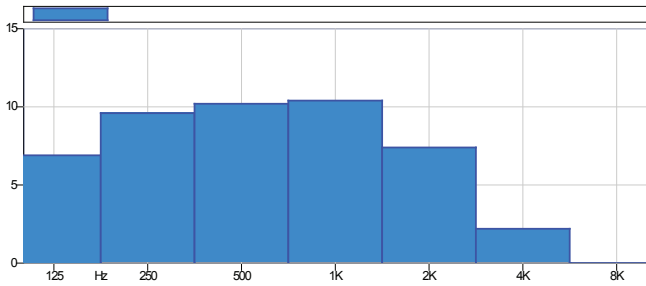


Fig. 12 – C_{50} medio
Averaged C_{50}

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.

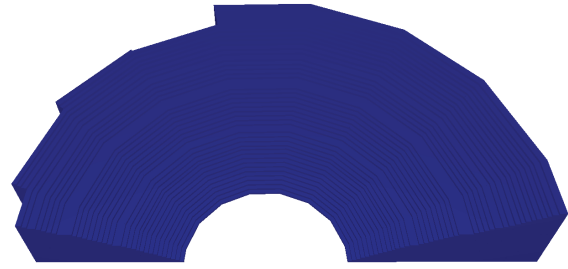


Fig. 13 – Modello numerico semplificato
Simplified numerical model

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.

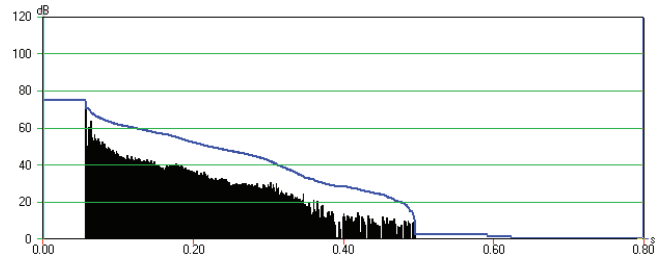


Fig. 14 – Risposta all'impulso
Impulse response function

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.

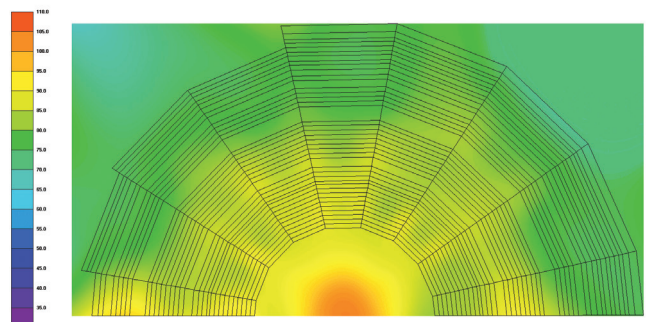


Fig. 15 – Mappa dBA con sorgente Lw 110 dB
dBA map ref to Lw 110dB

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.

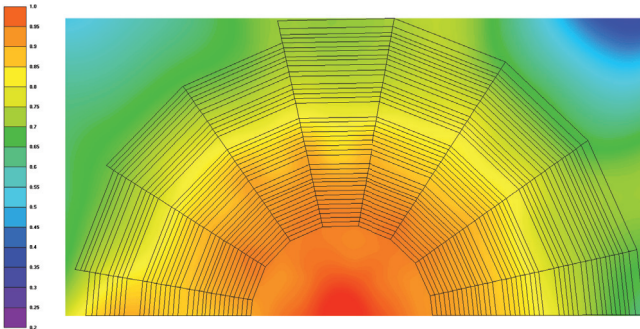


Fig. 16 – Mappa simulata STI 125 Hz
Computed STI map @ 125 Hz

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.

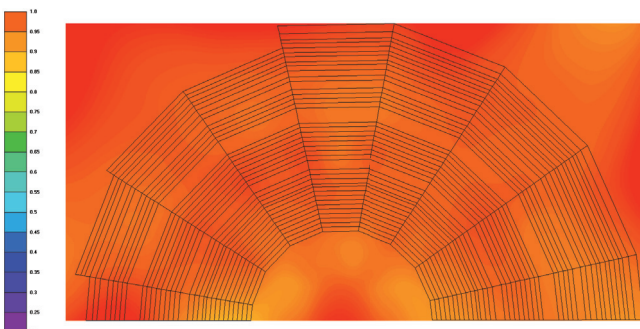


Fig. 17 – Mappa simulata STI 250 Hz
Computed STI map @ 250 Hz

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.

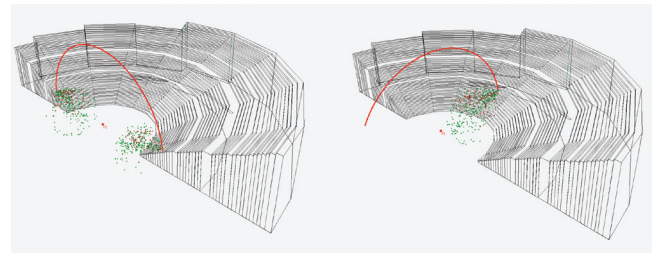


Fig. 18 – Propagaz. vert. con Odeon 500 Hz
Odeon vert. propagation 500 Hz

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.

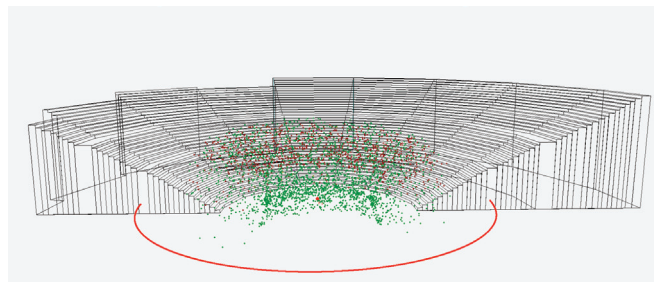


Fig. 19 – Propagaz. vert. con Odeon 500 Hz
Odeon vert. propagation 500 Hz

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.

Progettazione, installazione e messa a punto di un sistema audio in un grande spazio all'aperto soggetto a vincoli artistici ed archeologici

Guido Diamanti

Progettista di sistemi audio professionali,
Via Dario Niccodemi, 12, 20900 Monza
guido.diamanti@audio61.eu

Ricevuto: 24/10/2022

Accettato: 20/11/2022

DOI: 10.3280/ria1-2023oa14813

ISSN: 0393-1110

ISSNe: 2385-2615

Rispetto ad un impianto audio installato in un luogo convenzionale, aspetti come il percorso dei cavi, le dimensioni e le posizioni degli altoparlanti sono soggetti a limitazioni che richiedono una particolare attenzione da parte dell'appaltatore, nella definizione del layout dell'impianto e della sua messa a punto. Inoltre, sono presenti tutte le problematiche tipiche legate alla progettazione di un impianto audio in un grande spazio all'aperto principalmente legate alla velocità di propagazione del suono e alla capacità di integrazione dell'orecchio umano. Nel presente articolo è presentata la metodologia di progettazione del sistema.

Parole chiave: public address, diffusione sonora, simulazione elettroacustica, tuning di un sistema audio

Design, installation and tuning issues for audio systems in large outdoor areas with artistic and archaeological constraints

Compared to an audio system installed in a conventional location, aspects such as the cables path, the dimensions and the positions of the loudspeakers are subject to limitations that require special attention from the contractor, in defining the layout of the system and its tuning. Furthermore, there are all the typical problems related to the design of an audio system in a large outdoor space mainly related to the speed of sound and to the integration capacity of the human ear. The system design methodology is presented in this article.

Keywords: public address, sound system, electro-acoustic simulation, sound system tuning

1 | Introduzione

Ad un sistema di diffusione sonora sono richieste prestazioni in funzione della destinazione d'uso relativamente a:

- livello di pressione sonora, in valore assoluto ed uniformità nella distribuzione sull'area di ascolto;
- spettro del segnale da riprodurre con buona fedeltà rispetto allo spettro del segnale sorgente ed uniformità della risposta in frequenza sull'area di ascolto.

Se l'area da sonorizzare è estesa, si aggiunge un altro punto di attenzione:

- istante di arrivo dei segnali sull'area di ascolto: in caso di sorgenti multiple o di riflessioni non debbono essere percepiti fenomeni di arrivo differenziato assimilabili all'eco.

Per "area estesa" possiamo riferirci come ordine di grandezza alla distanza percorsa dal suono in 80-100 ms, cioè possiamo assumere da 1000 m² in su.

Nella fase di progetto, è necessario anche verificare:

- che il sistema sia installabile, cioè che nulla osta al posizionamento ed al collegamento di tutti gli apparati a campo ed in regia;
- che il sistema sia regolabile, ovvero che eventuali operazioni di ottimizzazione del segnale attuate per una parte dell'area di ascolto non comportino evidenti peggioramenti delle prestazioni in altre porzioni dell'area di ascolto stessa.

Se il sito è sottoposto a particolari vincoli artistici o archeologici, oltre alle variabili "standard" che determinano le scelte progettuali, se ne aggiungono altre, che riguardano apparati, accessori e modalità di installazione, sintetizzabili nel modo seguente.

Altoparlanti:

- dimensioni massime (xyz) dell'altoparlante o dell'array di altoparlanti;
- posizioni vietate per il posizionamento (perché troppo in vista o eccessivamente numerose).

Regia:

- posizione rispetto alla rete di altoparlanti, all'eventuale palcoscenico e rispetto all'area di ascolto.

Rete cavi:

- percorso delle vie cavi da altoparlanti a regia e da regia ad eventuale palco.

Le prestazioni acustiche del sistema audio possono essere condizionate in modo importante da queste variabili supplementari.

La destinazione d'uso del sistema potrebbe richiedere prestazioni tali da essere irraggiungibili proprio a causa dei vincoli artistici o archeologici.

In sostanza, a livello di progettazione, non cambia il procedimento di configurazione del sistema ma i vincoli di cui sopra possono influenzare a tal punto le prestazioni da rendere

addirittura impossibile lo svolgimento di determinate attività con prestazioni accettabili.

Per ogni scelta progettuale che soddisfi gli obiettivi in termini di prestazioni acustiche sarà necessario un loop di verifica al fine di controllare se ci si sta avvicinando ad oltrepassare i limiti imposti dai vincoli.

2 | Progettazione

Un progetto per una vasta area soggetta a vincoli artistici/archeologici dovrebbe iniziare necessariamente con un documento che indichi, tra quelli già citati, quali sono i vincoli assolutamente insormontabili e non negoziabili ad es.:

- dove NON possono essere installati i diffusori, perché ad esempio andrebbero ad avere un impatto evidente nelle vicinanze di statue, capitelli o altro;
- dove NON possono essere installati cavi (di potenza) dagli amplificatori ai diffusori, perché gli eventuali tubi o canaline potrebbero essere visibili in prossimità di camminamenti o di installazioni di opere d'arte.

Ci sono poi dei vincoli forse sormontabili, ma che occorre conoscere preventivamente:

- dove NON possono essere installati cavi (di segnale) da regia/palco agli amplificatori;
- dove NON può essere realizzata la regia;
- qual è la distanza minima tra la regia e gli amplificatori o tra la regia e i diffusori.

In parallelo c'è infine un aspetto fondamentale, a cui già si è accennato e che va considerato alla stregua dei vincoli sopra elencati:

- qual è la (principale) destinazione d'uso del sistema;
 - musica di sottofondo (ambiente);
 - spettacoli suoni/luci/proiezioni con audio mono o stereo;
 - conferenza, prosa (parlato) con palcoscenico o postazione oratore;
 - spettacoli musicali dal vivo con palcoscenico;
 - audio immersivo.

La tabella seguente mostra che i vincoli artistici/archeologici impongono delle scelte che possono risultare decisive per lo svolgimento corretto di alcune attività (* poco importante, *** fondamentale).

Tab. 1 – Importanza dei vincoli in funzione della destinazione d'uso del sistema audio

Importance of the restraints as a function of the intended use of the audio system

Tipologia evento	Dimensione altoparlanti	Lunghezza cavi	Provenienza del suono
Musica di sottofondo	**	*	*
Suoni e luci	***	***	*
Conferenza-prosa	*	*	***
Musica dal vivo	***	***	***
Audio immersivo	***	***	***

Per quanto riguarda la *dimensione dei diffusori*: a parità di tecnologia, le dimensioni dei componenti indicano generalmente la capacità di riprodurre frequenze più basse e, in particolare modo per le frequenze medio-alte, la massima pressione sonora erogabile. Quindi imporre una dimensione massima del componente ha implicazioni sulla banda riprodotta e sul valore assoluto e la distribuzione della pressione sonora.

Questo tipo di problemi si evidenzia soprattutto nelle attività in cui si ha la diffusione di musica, cioè segnali con energia consistente anche al di sotto dei 150 Hz, tanto più quando sono richiesti anche elevati livelli di pressione sonora. Da questo punto di vista saranno penalizzate in modo importante le performance di spettacoli musicali dal vivo. Tuttavia per questi si ricorre assai raramente ad installazioni permanenti, tutto l'equipaggiamento fa parte di un sistema installato solo in occasione dell'evento.

Inoltre, nei concerti di musica dal vivo, si hanno degli standard super-consolidati per ciò che riguarda tipologia e posizione dei diffusori, sintetizzati nella tabella seguente:

Tab. 2 – Tipologia diffusori utilizzata nei concerti dal vivo
Type of loudspeakers used during the live concerts

Tipologia diffusori	Posizione	Note
MF/HF left/right	Ai lati del palco	Obiettivo: copertura uniforme dell'area di ascolto
Subwoofer	Alla base del palco	Quantità congrua rispetto ai diffusori MF/HF
Front-fill	Distribuiti alla base del boccascena	Incremento HF prime file e correzione della sensazione di provenienza del suono
Monitor palco	Sul palcoscenico	Monitoraggio per il singolo artista

Dal momento che questi sistemi sono installati temporaneamente e gli artisti generalmente non possono accettare compromessi per la presenza di vincoli, si farà riferimento d'ora in avanti soltanto ad installazioni permanenti.

Per quanto riguarda la metodologia di progettazione, almeno nella fase iniziale sarà necessario procedere per approssimazioni successive.

Utilizzando un software di simulazione [1], si può schematizzare l'area di ascolto, e valutare la distribuzione della pressione sonora iniziando col posizionare un solo diffusore o un array di diffusori di dimensioni in una posizione "autorizzata". La scelta del componente quindi, oltre a dover soddisfare i requisiti di qualità attesi, dovrà cadere su apparecchiature con un impatto visivo conforme ai vincoli imposti. L'orientamento del diffusore sarà ottimizzato per consentire una distribuzione uniforme della pressione sonora che sia 15 dB superiore al rumore di fondo nell'area più estesa possibile.

In base ai risultati ottenuti, può essere necessario aggiungere uno o più diffusori fino a coprire tutta l'area di ascolto con una pressione sonora adeguata e che non vari

orientativamente di ± 2 dB intorno al valore medio. Possono essere accettate disuniformità superiori al di sotto dei 250 Hz e al di sopra dei 4000 Hz.

Per ottenere una pressione sonora elevata con una risposta in frequenza che abbia il limite inferiore intorno ai 100 Hz può essere necessario utilizzare altoparlanti con particolari caratteristiche costruttive: ad esempio alcune aziende producono casse acustiche in cui il componente per le frequenze medio-basse è “horn-loaded” cioè “caricato a tromba” (termine forse improprio ma utilizzato in modo diffuso sui data-sheets). In questo caso viene sacrificata la profondità della cassa acustica, ma si potranno utilizzare woofer di dimensioni minori dei componenti da 12 o 15 pollici che costituiscono la produzione standard. In questo caso si riesce ad ottenere una elevata efficienza anche verso il limite inferiore della banda riprodotta.

Già da queste prime fasi, occorre sempre tenere nella massima considerazione la destinazione d'uso del sistema. Questo dato è fondamentale perché influenza in cascata tutta una serie di parametri/decisioni che saranno approfondite di seguito:

utilizzo del sistema → larghezza di banda → risposta in frequenza del diffusore → dimensioni del componente LF (woofer) → potenza elettrica necessaria per pilotare il diffusore → lunghezza del cavo di collegamento → sezione del cavo.

Pur essendo ancora nella fase di progettazione della rete di altoparlanti, è importante continuare a monitorare la ripercussione delle scelte relativamente agli altri vincoli:

2.1 | Cavi

Nelle posizioni in cui saranno installati i diffusori, deve essere possibile installare i cavi verso gli amplificatori.

Se il percorso dei cavi è realizzabile con i vincoli imposti, sarà valutata in una fase successiva la lunghezza della tratta, al fine di identificare la quantità e la sezione dei cavi, e l'eventualità di utilizzare trasformatori di impedenza su ogni altoparlante.

2.2 | Echi

Nei punti dell'area di ascolto in cui c'è il contributo di due altoparlanti con differenze di livello inferiori ad almeno 10 dB, l'istante di arrivo del segnale proveniente dall'altoparlante più lontano non deve essere superiore a circa 70 ms rispetto all'istante di arrivo del segnale proveniente dall'altoparlante più vicino.

Inoltre, se a causa della geometria dell'area di ascolto saranno imposti dei ritardi su alcuni segnali per l'allineamento temporale delle sorgenti, sarà necessario verificare che proprio a causa di queste regolazioni non insorgano echi in altri punti dell'area di ascolto. Questo punto sarà approfondito nel capitolo dedicato al tuning.

3 | Installazione

I vincoli relativi alla rete cavi, apparentemente legati solo a problemi di installazione, sono importanti anche in relazione alle prestazioni acustiche del sistema.

Distanza degli amplificatori dagli altoparlanti: maggiore è la distanza (la lunghezza dei cavi), maggiore è la caduta di tensione dovuta alla resistenza del cavo.

Ciò implica che il livello di pressione sonora è inferiore a quello pianificato.

Non è superfluo indicare anche in questa sede anche l'impatto economico: il costo del rame è tale per cui vale la pena di non eccedere nella sezione dei conduttori.

Una possibile opzione per non utilizzare cavi di sezione eccessiva, consiste nel dotare ogni altoparlante di un trasformatore di impedenza.

Supponiamo, per semplicità di calcolo, che il cavo abbia lunghezza e sezione tali da avere una resistenza di 4 Ohm, pari alla metà dell'impedenza nominale dell'altoparlante. Questo valore si ha per un cavo a due conduttori lungo 290 m di sezione 2,5 mm². La tensione disponibile ai capi dell'altoparlante sarebbe 2/3 della tensione disponibile all'uscita dell'amplificatore.

Ma se il trasformatore fa sì che l'impedenza dell'altoparlante vista dal suo primario diventi ad esempio 40 Ohm, la tensione disponibile ai capi dell'altoparlante sarebbe il 92% della tensione disponibile all'uscita dell'amplificatore con una conseguente attenuazione della pressione sonora di fatto impercettibile per l'orecchio umano e trascurabile rispetto al target di SPL pianificato.

Questa scelta si ripercuote sulla scelta dell'amplificatore: le aziende produttrici indicano il tipo di impedenza di carico sulla quale sono nominalmente progettati per funzionare. La terminologia utilizzata per definire amplificatori che possono lavorare su impedenze elevate è varia e spesso fuorviante (“100V”, “tensione costante”...) ma ormai consolidata e recepita.

Tuttavia, anche per la scelta del trasformatore di impedenza bisogna fare un passo indietro, tornando di nuovo alle variabili ed ai vincoli già presi in considerazione. Occorre prestare attenzione alla larghezza di banda desiderata: alle basse frequenze il trasformatore di impedenza tende ad essere un cortocircuito con conseguente surriscaldamento precoce dell'amplificatore. Si manifesta, in termini audio, come un suono stridulo distorto, simile a una bobina mobile disallineata.

Un altro importante aspetto relativo alla installazione è quello di proteggere i componenti dagli agenti atmosferici.

Le procedure che possono attuarsi per la protezione dei diffusori sono le seguenti:

- trattamento dello chassis di legno con vetroresina;
- impiego di acciaio inossidabile per le parti metalliche;
- protezione dei connettori;
- protezione (con pellicola trasparente) dei trasduttori.

Per quanto riguarda l'elettronica (preamplificatori, mixer, processori di segnale, amplificatori di potenza), se temperatura del locale in cui vengono installati i rack degli amplificatori e dei processori dovesse superare i 30 °C potrebbe essere opportuno prevedere degli armadi con sistemi di raf-

freddamento. Le specifiche tecniche dei processori e degli amplificatori danno sempre informazioni chiare sul range di temperatura consentito.

4 | Tuning

Il metodo di messa a punto del sistema non può essere diverso da quello utilizzato per un'area senza vincoli architettonici. Tuttavia, la difficoltà che si può avere nel posizionare i diffusori nelle quantità e nelle posizioni ottimali per le performance acustiche, inducono ad un'attenzione particolare verso uno dei parametri da ottimizzare.

Istante di arrivo

Se il sistema è costituito da più diffusori, in ogni punto dell'area di ascolto dovranno essere eliminati o ridotti al minimo gli effetti dei ritardi di propagazione dovuti alle diverse distanze dell'ascoltatore dai diffusori.

Se un segnale arriva all'orecchio dell'ascoltatore da due sorgenti ad istanti diversi, possono essere percepiti effetti diversi, a seconda dell'ordine di grandezza del ritardo tra il primo arrivo ed il successivo:

- se il ritardo è dell'ordine delle centinaia di millisecondi l'effetto percepito è assimilabile all'eco;
- se il ritardo è dell'ordine di qualche millisecondo l'effetto percepito può essere un'alterazione del senso di provenienza del suono e/o una sensazione di confusione nell'identificazione della posizione della sorgente;
- se il ritardo è dell'ordine di microsecondi, l'effetto, percepito nel dominio della frequenza, può essere un'alterazione della qualità timbrica. Ciò può verificarsi a causa dell'interferenza tra due altoparlanti adiacenti costituenti un cluster.

Le tre problematiche vanno affrontate in modo distinto, ma solo la prima (ritardo > 50 ms) è peculiare per il tipo di ambiente che stiamo considerando.

Il modello mostrato in figura seguente (realizzato con il software EASE – Enhanced Acoustic Simulator for Engineers [1]) si riferisce ad una vasta area generica con un numero relativamente basso di casse acustiche molto distanti tra loro.

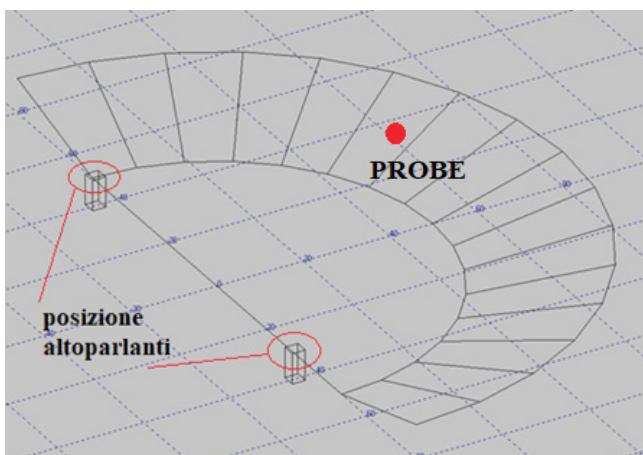


Fig. 1 – Modello 3D realizzato con il software EASE
3D model implemented in the software EASE

È evidenziato anche un punto di misura “PROBE” nell'area di ascolto. In questo punto la differenza dell'istante di arrivo del fronte sonoro dai due altoparlanti è considerevole mentre la differenza di pressione sonora generata in quel punto dai due altoparlanti non è eccessiva

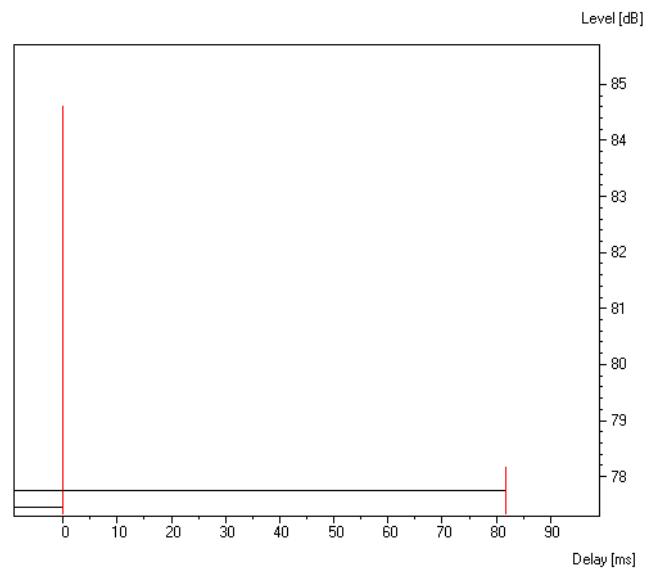


Fig. 2 - Analisi dell'istante di arrivo sul PROBE dei fronti d'onda provenienti dai due altoparlanti: il segnale uscente dall'altoparlante più lontano giunge all'orecchio dell'ascoltatore dopo 82 ms rispetto all'altoparlante più vicino e con un livello di circa 6 dB inferiore

Analysis of the arrival time at the probe of the wavefronts coming from the two loudspeakers: the signal coming from the furthest loudspeaker arrives at the listener's ear with a delay of 82 ms and a level 6 dB lower than the signal arriving from the closer loudspeaker

Il primo accorgimento che potrebbe essere preso in considerazione è di installare un ulteriore altoparlante in mezzo ai due già previsti.

Oppure, in alcune installazioni la differenza di percorso (e di istante di arrivo) viene compensata ritardando con opportuno processore il segnale che arriva per primo, ma nel caso in esame ci sarebbero altri punti nell'area di ascolto che presentano lo stesso tipo di problematica, e addirittura necessiterebbero di regolazioni di segno opposto.

Cosa succede se i vincoli architettonici sono tali da NON poter installare ulteriori diffusori e ci sono delle aree in cui, per architettura o per regolazioni si avverte un'eco?

È possibile ad esempio utilizzare una linea di ritardo ed un mixer, ovvero un processore digitale che abbia queste funzionalità al suo interno.

Si tratta di sommare al segnale (una o più volte a seconda dell'entità del ritardo) la sua replica attenuata e ritardata di un Δt tale da arrivare tra i due fronti d'onda assicurandosi che l'intervallo di silenzio tra i due fronti sia inferiore a quanto percepito come eco.

La nuova situazione è la seguente:

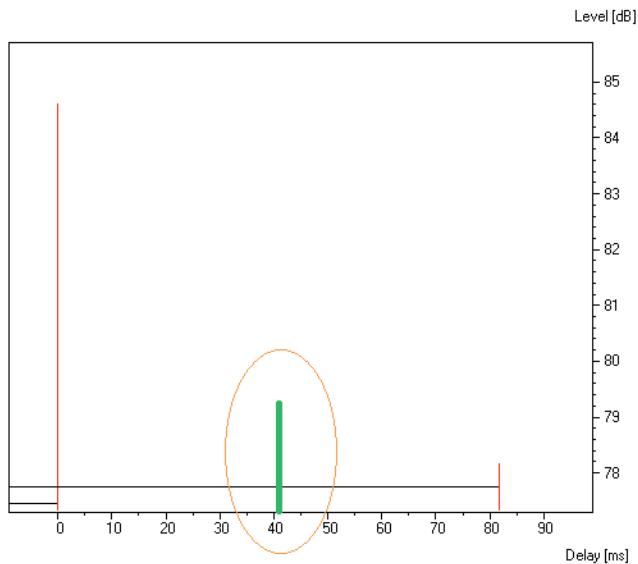


Fig. 3 – L'aggiunta di un ulteriore suono ritardato fa sì che i fronti d'onda che arrivano sul PROBE siano intervallati di circa 40 ms
The addition of a new delayed sound consent to have multiple wavefronts arriving at the probe with time intervals around 40 ms

Il suono percepito sarà un'onda prolungata in modo impercettibile, come un micro-riverbero, senza discontinuità percepibili.

Per realizzare questa funzionalità senza dover ricorrere a componenti discreti si può utilizzare un processore digitale ad "architettura aperta" (Yamaha, Symetrix, Electrovoice ecc.) Nell'area di progetto viene disegnato il flusso che dovrà avere il segnale così elaborato.

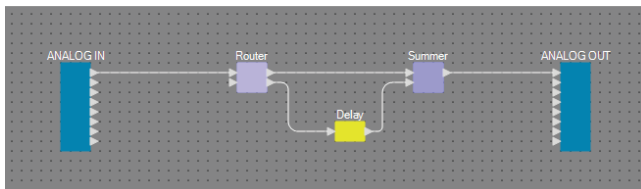


Fig. 4 – Somma di un segnale e della sua replica ritardata programmata su un processore audio Yamaha MTX [2]
Sum of a signal with its delayed copy implemented in a Yamaha MTX [2] audio processor

5 | Conclusioni

Gli attori nella realizzazione di un generico sistema di diffusione sonora, dal committente, al progettista, all'installatore, al fonico, costruiscono insieme una procedura fatta di obiettivi limitati e controllati da vincoli principalmente tecnici.

Quando si opera in un sito particolarmente esteso e soggetto a vincoli artistici/archeologici, sarà necessario inserire dei loop di controllo per ogni scelta che determina un'interferenza con i vincoli.

Conclusions

The actors in the construction of a sound system, from the client, to the designer, to the installer, to the sound engineer, build together a procedure made up of objectives limited and controlled by mainly technical constraints.

When working in a particularly large site subject to artistic/archaeological constraints, it will be necessary to insert control loops for each choice that determines an interference with the constraints.

Bibliografia

- [1] <https://ease.afmg.eu> – software di simulazione elettroacustica
- [2] <https://it.yamaha.com/it/products/proaudio/>-azienda produttrice di prodotti e sistemi audio professionali

AIA Rivista Italiana di Acustica

Semestrale di diffusione scientifica e tecnica

EDITORIALE/EDITORIAL

Special issue from the Symposium on the acoustics of ancient theatres
Astolfi et al.

CONTRIBUTI INVITATI/INVITED CONTRIBUTIONS

Theatres from roman age to renaissance: a short survey on the meaning of
reverberation time measurements

Cocchi

Conservation, transformation, and enhancement of Classical theatres and
amphitheatres

Romeo et al.

The function of the First Ancient Theatre of Larissa within the soundscape of the
contemporary urban fabric

Chourmouziadou

Preserving and managing the sonic heritage of the performative spaces of the past

Bellia

La voce negli antichi spazi

Francini

ARTICOLI SCIENTIFICI/SCIENTIFIC PAPERS

Simulazione acustica di spazi antichi: problematiche e soluzioni

Martellotta

AURA project: enjoyment of the auralisation experience by different target groups

Bartalucci et al.

The restoration of the Theatre of Arts Academy in Tirana – Acoustic analysis and
design of the new Orchestra pit

Secchi et al.

NOTE TECNICHE /TECHNICAL NOTES

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

Cerniglia et al.

Progettazione, installazione e messa a punto di un sistema audio in un grande
spazio all'aperto soggetto a vincoli artistici ed archeologici

Diamanti