
Alma Mater Studiorum – Università di Bologna

DOTTORATO DI RICERCA

Ingegneria Energetica, Nucleare e del Controllo Ambientale

Ciclo XXI

Settore/i scientifico disciplinari di afferenza: ING-IND/11-Fisica Tecnica Ambientale

TITOLO TESI

La Modellazione 3D per la qualità acustica ed illuminotecnica della
Basilica di San Vitale a Ravenna: ricostruzione archeologica-
musicale del canto liturgico in epoca bizantina

Presentata da: Ilaria Durvilli

Coordinatore Dottorato:

Relatore:

Prof.re Antonio Barletta

Prof.re Valerio Tarabusi

Esame finale anno 2009

INDICE

INDICE

PREFAZIONE	6
Capitolo 1 - STORIA DELLA BASILICA DI SAN VITALE - RAVENNA	
1.1 - L'Impero Bizantino	7
1.2 - Materiali e tecniche; architetti, operai e committenti.....	8
1.3 - L'età di Giustiniano	12
1.4 - Santa Sofia	13
1.5 - San Vitale.....	14
Capitolo 2 - TEORIA DELL'ACUSTICA	
2.1 - QUALITÀ ACUSTICA.....	18
2.2 - RISPOSTA ALL'IMPULSO	20
2.2.1 - Risposta all'impulso binaurale	23
2.2.2 - Risposta all'impulso B-format	23
2.3 - TECNICHE DI MISURA DELLA RISPOSTA ALL'IMPULSO	25
2.3.1 - Misura con segnale impulsivo	25
2.3.2 - Segnali particolari: sine sweep	27
2.4 - PARAMETRI ACUSTICI ENERGETICI.....	32
<i>Tempo di riverberazione (T60)</i>	32
<i>Early Decay Time (EDT)</i>	34
<i>Definition (D₅₀)</i>	34
<i>Clarity (C₅₀ e C₈₀)</i>	35
<i>Center Time (t_s)</i>	36
<i>Strenght (G)</i>	36
<i>Speech Transmission Index (STI)</i>	37

<i>Rapid Speech Transmission Index (RASTI)</i>	38
2.5 - PARAMETRI ACUSTICI PER LA SPAZIALIZZAZIONE	38
<i>Lateral Efficiency (LE)</i>	39
<i>Lateral Fraction (LF)</i>	39
<i>Inter Aural Cross Correlation (IACC)</i>	40
 Capitolo 3 - MISURA DELLA QUALITÀ ACUSTICA	
3.1 - MODALITÀ DI ESECUZIONE DELLA MISURE	41
3.1.1 - <i>Protocollo di misura per la caratterizzazione acustica delle chiese - Posizioni di misura</i>	42
3.1.2 - <i>Protocollo di misura per la caratterizzazione acustica delle chiese - Disposizione delle sorgenti</i>	45
3.1.3 - <i>Protocollo di misura per la caratterizzazione acustica delle chiese - Apparato di misura</i>	47
3.1.4 - <i>Strumentazione utilizzata in San Vitale - Posizioni di misura</i>	49
3.1.5 - <i>Strumentazione utilizzata in San Vitale - Disposizione delle sorgenti</i>	50
3.1.6 - <i>Strumentazione utilizzata in San Vitale - Apparato di misura</i>	51
3.2 - VALUTAZIONE DEI PARAMETRI ACUSTICI	51
3.2.1 - <i>Valutazione dei parametri acustici energetici</i>	52
3.2.2 - <i>Valutazione dei parametri acustici per la spazializzazione</i>	54
3.3 - MODELLI DI PREVISIONE TEORICA	57
3.3.1 - <i>Introduzione</i>	57
3.3.2 - <i>Metodo delle sorgenti immagine</i>	58
3.3.3 - <i>Ray Tracing</i>	59
3.3.4 - <i>Tracciatori di piramidi</i>	60
3.4 - PROGRAMMI	64
3.4.1 - <i>Ramsete: Ramsete Cad (RC), Ramsete Trace (RT), Ramsete View (RV)</i>	64
3.4.2 - <i>Adobe Audition & Aurora</i>	67
3.5 - AURALIZZAZIONE 3D	68
3.5.1 - <i>Introduzione</i>	68
3.5.2 - <i>Costruzione del modello geometrico</i>	69

3.5.3 - Taratura del modello matematico	69
3.5.4 - Risultati ottenuti	71
3.5.5 - Simulare la risposta all'impulso	74
3.5.6 - Registrazione anecoica.....	74
3.6 - RIPRODUZIONE DEL SEGNALE AURALIZZATO	75
3.6.1 - Introduzione	75
3.6.2 - Auralizzazione binaurale in cuffia.....	76
3.6.3 - Auralizzazione binaurale tramite altoparlanti stereo (stero dipolo).....	77
3.6.4 - Doppio Stereo Dipolo.....	81
3.6.5 - Auralizzazione con tecnica b-format (ambisonics).....	82
3.6.6 - Ambiophonics.....	83
Capitolo 4 - TEORIA DELL'ILLUMINOTECNICA	
4.1 - BREVI CENNI DI FOTOMETRIA ED ILLUMINOTECNICA	86
4.2 - LE SORGENTI DI LUCE NATURALE.....	90
4.2.1 <i>Quantità e qualità dell'illuminazione naturale all'interno degli spazi confinati</i>	93
4.3 - PARAMETRI ILLUMINOTECNICI	95
Flusso luminoso (Φ)	96
Intensità luminosa (I)	97
Luminanza (L)	98
Illuminamento (E).....	99
Radianza (M).....	100
Efficienza luminosa (E_l).....	100
Capitolo 5 - MISURA DELLA QUALITÀ ILLUMINOTECNICA	
5.1 - LA MISURA DELL'ILLUMINAMENTO	101
5.1.1 - Il metodo di misura	102
5.1.2 - Strumentazione utilizzata in San Vitale – Babuc/A	103

5.2 - STRUMENTI PER L'ANALISI DELL'ILLUMINAZIONE.....	106
5.2.1 - <i>Usa di modelli teorici di sole e di cielo per la progettazione</i>	106
5.3 - PROGRAMMI.....	108
5.3.1 - <i>Ecotect</i>	108
5.3.2 - <i>3D Studio Max</i>	109
5.4 - VALUTAZIONE DEI PARAMETRI ILLUMINOTECNICI	112
5.5 - MODELLAZIONE FOTOREALISTICA	117
5.5.1 - <i>Introduzione al fotorealismo</i>	117
5.5.2 - <i>Algoritmi biased ed unbiased</i>	122
5.5.3 - <i>Applicazioni al caso di studio</i>	124
Capitolo 6 - CONCLUSIONI	
6.1 - CONCLUSIONI	128
BIBLIOGRAFIA	
APPENDICE A	
APPENDICE B	

Prefazione

Nel 2006 il Dipartimento di Ingegneria Energetica, Nucleare e del Controllo Ambientale dell'Università di Bologna ed il dipartimento di archeologia dell'Università di Southampton (UK) hanno avviato una collaborazione per lo studio e la ricostruzione della Basilica di San Vitale a Ravenna da un punto di vista archeologico-musicale, acustico ed illuminotecnico. Tale progetto nasce dalle scoperte ottenute dalle ricerche nel campo dell'archeologia musicale, che hanno evidenziato la rilevanza, non solo storica della Basilica di San Vitale, già ben nota, ma soprattutto, quella meno conosciuta, di tipo acustico - musicale.

L'eredità musicale dell'Europa occidentale, i cui inizi risalgono all'epoca dell'impero romano, riguarda quasi venti secoli di storia, tuttavia, dopo la caduta di Roma nel 493 d.C., solo pochi documenti storici sono pervenuti per descrivere le caratteristiche musicali di quel periodo. In modo analogo, solo un numero limitato di edifici risalenti al sesto secolo, conservano a tutt'oggi le loro caratteristiche originali. Fra loro, le chiese di Santa Sofia a Costantinopoli, oggi trasformata in una moschea, e la Basilica di San Vitale a Ravenna, costituiscono le costruzioni maggiormente rappresentative di quell'epoca. Considerato il ricco patrimonio storico italiano, che comprende anche l'architettura ecclesiastica, è possibile, grazie alla ricerca scientifica nel settore della fisica-tecnica, utilizzare tali conoscenze, unite a quelle dell'archeologia e del restauro, come strumento prezioso per la tutela del patrimonio culturale del nostro Paese: tale sinergia è avvenuta per lo studio acustico ed illuminotecnico della Basilica di San Vitale a Ravenna.

Affiancando o sovrapponendo gli studi di archeologia musicale sulla Basilica con le moderne tecniche di analisi acustica ed illuminotecnica, quali l'auralizzazione 3D mediante la tecnica dello stereo dipolo ed una rappresentazione foto-realistica, attraverso un modello tridimensionale ottenuto con 3d studio max, è possibile riportare nuovamente in vita gli antichi effetti acustici ed illuminotecnici di San Vitale percepibili da un uomo vissuto nel VI sec. d.C.: ricostruzione che resterebbe a noi oggi del tutto sconosciuta se non grazie a questo tipo di ricerche.

CAPITOLO 1

STORIA DELLA BASILICA DI SAN VITALE - RAVENNA

1.1 L'Impero Bizantino

Il termine Impero Bizantino è una convenzione della storiografia moderna. In realtà, non è mai esistito uno stato che si definisse in questo modo, al contrario dell'Impero Romano che ebbe come sua capitale Costantinopoli, la nuova Roma. Sono stati gli storici che, per l'esigenza di dividere il passato in periodi ragionevolmente coerenti e trattabili, hanno stabilito che esso sia iniziato nel 324 d.C. con la fondazione di Costantinopoli e finito con la sua conquista ad opera dei Turchi Ottomani nel 1453 d.C. È una divisione arbitraria, ma conveniente.

Secondo questa definizione, l'architettura bizantina, intesa come architettura dell'Impero d'Oriente, ebbe una durata di undici secoli, senza tener conto della sua sopravvivenza molto oltre il 1453 d.C. nei paesi di fede ortodossa. I monumenti eretti nell'Impero Bizantino fra il 324 d.C. e il 1453 d.C. non presentano, complessivamente, caratteristiche comuni che ci permettono di identificarli come bizantini e di distinguerli da quelli di altre culture e stili, come il Romano, il Romanico, il Gotico o l'Islamico, fu solo dopo il settimo, e più decisamente dopo il nono secolo che, l'architettura bizantina acquistò effettivamente una fisionomia propria, che conservò fino alla fine. Nel periodo precedente, dal IV al VI secolo, l'architettura bizantina era ancora essenzialmente antica, benché fosse considerata la sua prima età dell'oro, l'età di Giustiniano, che vide la costruzione di luoghi sacri come Santa Sofia a Costantinopoli e successivamente San Vitale a Ravenna [56].

Nonostante la quantità del materiale disponibile, la nostra conoscenza dell'architettura bizantina è ancora molto frammentaria e ineguale. Consideriamo alcuni fatti. Costantinopoli, la meglio conosciuta delle città bizantine, aveva nel Medio Evo più di cinquecento chiese e

monasteri. Ne sono rimasti, più o meno ben conservati, una trentina, cioè meno del dieci per cento. I due palazzi imperiali (il Grande Palazzo e il Palazzo delle Blacherne) non hanno quasi lasciato traccia, e della centinaia di grandi residenze della capitale, solo due o tre sono rappresentate da pochi resti insignificanti. La seconda città dell'Impero per popolazione, nel periodo paleobizantino, era Alessandria; e tuttavia non sappiamo nulla della sua architettura cristiana. La terza città, Antiochia, è stata in parte esplorata, ma non si è trovata traccia dei suoi edifici più importanti. Questo ci dà un'idea del carattere frammentario dei nostri documenti. Un'altra grave limitazione è che la documentazione non è rappresentativa. Un profano potrebbe avere l'impressione che i Bizantini costruissero soltanto chiese: in realtà essi costruirono molti altri tipi di edifici, case, palazzi, terme, cisterne, fortificazioni e ponti. Un numero considerevole di edifici secolari esiste ancora dai primi secoli bizantini, un numero molto minore dall'epoca media e tarda: ma, in confronto con l'architettura religiosa, quella profana è stata assai poco studiata.

1.2 Materiali e tecniche; architetti, operai e committenti

Nell'epoca bizantina le varie tecniche costruttive regionali rimasero praticamente immutate per secoli: la cosa si spiega facilmente, prima di tutto perché esse dipendevano dai materiali disponibili localmente, e in secondo luogo perché certe tradizioni locali spesso si conservarono ad onta dei rivolgimenti politici e dell'occupazione straniera. Una certa conoscenza di queste tecniche è essenziale, in quanto da esse dipendeva in gran parte la possibilità (o l'impossibilità) di realizzare le diverse forme architettoniche, nei limiti, naturalmente, delle capacità tecnologiche dell'epoca. In generale, l'edilizia bizantina si distingue in due categorie: quella basata sui conci di pietra, caratteristica della Siria-Palestina, di gran parte dell'Asia Minore e delle regioni di confine dell'Armenia e della Georgia; e quella di *mattoni e pietrisco*, tipica di *Costantinopoli*, della costa occidentale dell'Asia Minore, dei Balcani e dell'*Italia*, cioè la tradizione centrale dell'architettura bizantina.

L'architettura di grossi blocchi lapidei si prestava mirabilmente alla costruzione delle superfici verticali, che si potevano ornare di bassorilievi, ma era meno adatta per le coperture. Gli spazi piccoli si potevano coprire in pietra, o con lastre piatte o con blocchi che formavano volte, ma quelli più grandi dovevano essere coperti di legno o di altro materiale relativamente leggero, come il mattone o il pietrisco. Il metodo abituale, all'epoca, per erigere un muro in pietrisco, consisteva nell'innalzare per prima cosa le due facce esterne, formate da conci quadrati oblungi, disposti in filoni orizzontali. Lo spazio intermedio veniva poi riempito di pietrisco legato con una grande quantità di cemento. Quando la costruzione raggiungeva l'altezza di

qualche piede, si passava ad una fascia di mattoni, generalmente di cinque filari, che riempiva tutta la parete da una parte all'altra. Poi il processo si ripeteva. In un certo senso il mattone era l'elemento fondamentale nella costruzione. Oltre a legare i muri, ne determinava lo spessore, e perciò serviva come modulo. A Costantinopoli si producevano mattoni quadrati, con lato di 35/38 cm e spessore di 4/6 cm, cioè un pò più grossi dei normali mattoni romani. Un muro dello spessore di due mattoni, aveva perciò uno spessore di 75/80 cm.

Sembra che la produzione dei mattoni fosse soggetta a qualche forma di controllo, e, fra il IV e il VI secolo, essi portavano spesso un marchio, di cui però non si è ancora chiarito l'esatto significato. Archi, volte e cupole erano fatti esclusivamente di mattoni; negli archi di grande luce i mattoni erano spesso di misura doppia.

Nell'età giustiniana troviamo un tipo caratteristico di tecnica: la parte più bassa del muro, pressappoco fino alla linea di imposta degli archi, è di pietra; di lì in su il muro è di mattoni, interrotto da singoli filari di blocchi lapidei a intervalli di circa 1.80 m.

Nell'architettura bizantina ci sono tre tipi fondamentali di volte: la volta a botte, la volta a vela e la volta a crociera. Tutte e tre si costruivano con o senza centina, a seconda della loro ampiezza. Il sistema di costruzione di una volta a botte senza centina era il seguente: si innalzavano i quattro muri, poi i muratori cominciavano il lavoro alle due estremità dello spazio da coprire, disponendo i mattoni radialmente, ma tenendoli leggermente inclinati dal centro verso l'esterno, in modo da impedirne la caduta. Quando le due parti della costruzione arrivavano a congiungersi nel mezzo, lo spazio cuneiforme che si formava in questo modo veniva riempito con un tassello di mattone, che fissava l'intera volta in posizione. La volta a vela e la volta a crociera venivano innalzate su spazi delimitati da quattro archi. Nel primo caso i mattoni si disponevano secondo un'inclinazione gradualmente crescente, formando prima i pennacchi che producevano la base circolare per la volta, e poi procedendo verso l'alto fino a raggiungere la chiave. Nella volta a crociera i mattoni si disponevano parallelamente all'estradosso degli archi; lungo la linea sulla quale si congiungevano agli angoli dello spazio da coprire, essi formavano naturalmente uno spigolo, che tendeva a scomparire nell'avvicinarsi alla chiave.

Gli spazi morti sopra l'imposta delle volte erano spesso riempiti con anfore di argilla per ridurre il peso della muratura. Nelle costruzioni voltate troviamo di solito molte irregolarità e una certa improvvisazione; perciò i diagrammi geometricamente accurati che si trovano nelle pubblicazioni moderne sono piuttosto fuorvianti. La cupola, che di solito costituiva il coronamento delle chiese bizantine, come pure di altri tipi di edifici, era costruita in base allo stesso principio della volta a vela, cioè poggiava su pennacchi. La differenza fra i due sistemi è che, mentre nella volta a vela i pennacchi e la calotta formano una superficie sferica continua,

questo non avviene nella cupola, che ha un raggio minore di quello dei pennacchi sottostanti. La cosa non altera la forma dei pennacchi, che sono uguali nei due casi. La calotta della cupola era spesso costolonata nell'intradosso. Le nervature contribuivano a rinforzare la cupola, ma non erano elementi costruttivi, perché, a differenza dei costoloni gotici, erano tutt'uno con il resto della struttura muraria. Dopo il VI secolo, divenne sempre meno frequente la costruzione di basiliche; e una delle ragioni della diffusione delle chiese con tetto in muratura fu molto probabilmente la scarsità di legname. Le pareti esterne degli edifici erano talvolta intonacate, ma pare che più spesso fossero lasciate grezze. Le congiunzioni fra le file di mattoni e la pietra erano sottolineate da uno strato sottile di un cemento più fine, che veniva compresso con uno strumento smussato in modo da formare una leggera scanalatura. I disegni ornamentali in laterizio sono eccezionali prima del X secolo. Anche più rari sono i rivestimenti esterni di marmo (facciata occidentale di Santa Sofia). Il trattamento degli interni contrasta decisamente con quello degli esterni: in essi ogni centimetro quadrato della parete è coperto di lastre di marmo, di stucco, di affreschi e di mosaici. Per quel che riguarda gli elementi strutturali, il marmo era usato soltanto nelle colonne, nei cornicioni e negli architravi; ma si trovava abbondantemente negli elementi sussidiari, come gli stipiti delle porte, le intelaiature delle finestre, le lastre dei parapetti, i pulpiti e, naturalmente, nei rivestimenti di muri e di pavimenti. La produzione del marmo era resa possibile dalla combinazione di diversi fattori: il lavoro degli schiavi per l'estrazione della pietra, la facilità delle comunicazioni, e in particolare della navigazione nel Mediterraneo, la capacità di sollevare e trasportare blocchi di pietra molto pesanti, per cui si dovettero costruire navi speciali. Poiché il trasporto per mare era molto più facile ed economico di quello per terra, le cave situate in prossimità della costa erano le più ricercate. La maggior parte delle cave furono abbandonate nel VI o VII secolo in conseguenza della generale crisi dell'Impero e per il venir meno del lavoro servile. E questo fu certamente uno dei fattori determinanti dello sviluppo dell'architettura medio-bizantina. Veniamo ora ai costruttori.

Nel primo periodo bizantino c'erano due tipi di architetti: il *mêchanikos* o *mêchanopoios* (in latino *mêchanicus*), che era il più importante, e l'*architekōn*". Il termine *mêchacikos* è spesso tradotto come "ingegnere", ma non è una traduzione esatta: si dovrebbe piuttosto parlare di un architetto con una solida conoscenza della matematica. La posizione sociale del *mêchanikos* era elevata. Gli architetti di Santa Sofia, Antemio e Isidoro, erano entrambi *mêchanikoi*, e Antemio era un matematico ragguardevole. Per la sua intensa attività edilizia, Giustiniano si servì di uomini di questo valore. Comunque, i *mêchanikoi* erano piuttosto rari. Gli *architektones* avevano una posizione sociale molto inferiore. Nel quarto secolo erano di solito ancora uomini con un'educazione liberale, e lavoravano anche come istruttori professionali,

ricevendo per la verità compensi piuttosto modesti: poco più degli insegnanti di matematica elementare, ma esattamente la metà di quanto potevano chiedere gli insegnanti di letteratura. Si può pensare che, col tempo, gli *architektones* siano scesi al livello di artigiani. La maggior parte degli edifici bizantini furono probabilmente costruiti da questi maestri costruttori od anche semplicemente da capomastri. È da notare che, dopo il VI secolo, non si ha quasi più notizia di nomi di architetti bizantini. Alle dipendenze degli *architektones* c'erano gli artigiani specializzati, che appartenevano alla classe plebea. La loro condizione sociale si può dedurre dai salari indicati nella tariffa di Diocleziano (il valore in senso assoluto è quasi impossibile da calcolare): i pittori di figura ricevevano 150 *denari* al giorno più il vitto; i pittori di muri 75; i mosaicisti 60; i muratori e i carpentieri 50. In teoria tutti questi artigiani appartenevano a gilde ereditarie (*collegia*), che, a differenza dei moderni sindacati, non erano organizzate per la difesa dei lavoratori, ma per la loro coercizione. Di conseguenza, gli artigiani erano soggetti ad ogni genere di servizi obbligatori, come quello di pulire le fogne.

Per quanto riguarda la questione finanziaria della committenza, l'erezione degli edifici pubblici era interamente nelle mani dello stato, che nel IV e V secolo cercò spesso di scoraggiare questa attività in favore del restauro degli edifici già esistenti, quindi il problema riguardava esclusivamente le chiese, che potevano avere tre tipi diversi di committenti, non sempre facilmente distinguibili uno dall'altro: lo stato, la chiesa locale, e i benefattori privati. Il governo e la chiesa spesso agivano di concerto, e lo stato provvedeva, parzialmente o interamente, a sostenere la spesa. La stessa partecipazione congiunta si aveva fra la chiesa e i committenti privati. Senza per questo sottovalutare quanto nella costruzione delle chiese era dovuto alla devozione disinteressata dei fedeli, vi erano coinvolti dei complessi interessi economici. Nel primo periodo bizantino la Chiesa era immensamente ricca, una grande quantità di denaro passava per le sue mani. Le fonti del denaro erano due: le offerte dei fedeli, volontarie e le rendite delle proprietà accumulate con i lasciti. Le spese consistevano soprattutto negli stipendi del clero, nella manutenzione degli edifici e nella distribuzione delle elemosine. Era compito del vescovo di incoraggiare le donazioni; ma un donatore particolarmente generoso di solito desiderava che la sua generosità fosse immortalata da un monumento. La costruzione di una nuova chiesa significava la creazione di nuovi posti per il clero e di una nuova fonte di offerte: e accadeva anche che i laici costruissero chiese per speculazione commerciale e poi partecipassero agli utili. Nello stesso tempo una nuova chiesa, se non godeva di sufficienti donazioni, spesso rappresentava un onere finanziario per la diocesi. Ci sono indicazioni che verso il VI secolo il sistema cominciava a non funzionare più; sotto la pressione dei committenti si erano costruite troppe chiese e si erano ordinati troppi preti. Perfino la Grande Chiesa di Costantinopoli (cioè un gruppo di quattro chiese, fra cui Santa

Sofia, che erano servite dallo stesso clero) era in gravi difficoltà economiche: Giustiniano fu costretto a emettere un decreto che vietava le nuove ordinazioni di sacerdoti. In senso più generale, potremmo spiegarci meglio la straordinaria ondata di costruzioni ecclesiastiche, specialmente nel V secolo, e la sua diminuzione nell'età di Giustiniano; una diminuzione dovuta non solo al peggioramento delle condizioni generali nell'Impero, ma anche alla sclerosi del meccanismo finanziario della chiesa. Quanto al costo dell'erezione di una chiesa, l'unica cifra sicura che si possiede è quella che riguarda San Vitale di Ravenna: 26000 *solidi*, una somma enorme per quei tempi. Il finanziatore fu il banchiere (*argentarius*) Giuliano, che ebbe parte anche nella costruzione di diverse altre chiese di Ravenna. Non abbiamo modo di sapere, però, se il denaro speso da Giuliano fosse tutto suo o se il banchiere fosse finanziato dal Tesoro Imperiale [45].

1.3 L'età di Giustiniano

L'età di Giustiniano rappresenta certamente la massima espressione dell'architettura paleobizantina. Nella sua opera laudativa sugli edifici costruiti da Giustiniano, scritta fra il 55 e il 555 d.C. e nota generalmente con il titolo "De aedificiis", lo storico Procopio comprende la descrizione degli edifici del regno di Giustino I (518-527 d.C.), in quanto Giustiniano esercitava attraverso Giustino il suo potere, indicandoci, come l'età di Giustiniano abbia occupato circa mezzo secolo (518-565 d.C.), includendo anche il regno di Giustino II (565-578 d.C.). Sotto molti aspetti il suo dominio si può paragonare a quello di Luigi XIV, nonostante il parallelo sia difficile da comprendere, in quanto, il grandioso progetto di Giustiniano fallì pochi decenni soltanto dopo la sua morte e solo alcuni dei suoi edifici più famosi, sono giunti XXI secolo.

Attraverso la lettura del "De aedificiis" si comprende che l'estesa attività edificatoria, intrapresa da Giustiniano, fu motivata da fattori bellici e di difesa dell'impero. In ogni luogo Giustiniano rafforzò le fortificazioni esistenti o ne costruì di nuove, edificò acquedotti, cisterne e ponti, e modificò perfino il corso dei fiumi. Questa grande opera di difesa era stata iniziata dall'imperatore Anastasio; Giustiniano la continuò su scala più vasta e più comprensiva, valendosi dei più esperti ingegneri e della migliore tecnologia del mondo.

Le opere di epoca giustiniana, che sono arrivate al XXI secolo, come testimonianza dell'architettura bizantina, sono le chiese e le basiliche dovute al mecenatismo dell'imperatore, di cui l'esempio massimo è Santa Sofia in Turchia e San Vitale in Italia [56].

1.4 Santa Sofia

Per quanto riguarda Santa Sofia, non esiste un altro edificio bizantino che sia grande neppure la metà di questo; la prima Santa Sofia, nota semplicemente come la Chiesa Grande (Megalē Ekklēsia), fu costruita da Costantino o, più probabilmente, da Costanzo II e dedicata nel 360 d.C. Era una chiesa a copertura lignea, e nel 404 fu distrutta da un incendio. Anche la seconda chiesa fu distrutta dal fuoco durante la rivolta di Nika nel gennaio del 532 d.C.. Della seconda “Santa Sofia” (dedicata nel 415 d.C.) rimane una parte del portico, una fila di colonne con un architrave scolpito. La rivolta del 532 d.C. ridusse in cenere il centro stesso della città e non solo la cattedrale, fornendo a Giustiniano l’occasione che cercava. Non appena le rovine furono rimosse, cominciò la ricostruzione di Santa Sofia: cinque anni e mezzo più tardi, il 27 dicembre 537 d.C., la chiesa fu dedicata solennemente. Gli architetti erano Antemio di Tralles, un famoso ed eccentrico matematico, e Isidoro di Mileto. Il progetto non ha avuto antecedenti diretti, e consiste di elementi che erano comuni a quel tempo, ma che, a quanto sappiamo, non erano mai stati combinati allo stesso modo. Né la chiesa fu imitata nei secoli successivi, fino al XVI secolo, quando furono costruite le moschee ottomane. Questa unicità rende difficile classificare Santa Sofia. La si è definita una basilica con cupola perché ha un asse longitudinale e file di colonne a entrambi i lati della navata, ma questa definizione non da un’idea abbastanza chiara degli elementi strutturali che la compongono. Secondo un’altra interpretazione, la pianta di Santa Sofia è stata ottenuta dividendo a metà i Santi Sergio e Bacco e inserendo fra le due parti la cupola. L’edificio cominciò a deformarsi mentre ancora era in costruzione: la cupola durò soltanto vent’anni. Incrinata da una serie di terremoti che colpirono Costantinopoli fra il 553 e il 557, nel 558 d.C. crollò. Secondo le fonti storiche, la cupola originale di Antemio era circa 7 metri più bassa di quella attuale: quasi certamente assomigliava a quella attuale per avere nervature e per essere provvista di un camminamento alla base. Un’altra caratteristica dell’edificio originale era l’abbondanza di luce, che, secondo le parole di Procopio, pareva non provenire dall’esterno, ma prodursi dentro la chiesa. Le pareti sotto gli archi erano forse traforate da grandi finestre, simili a quella che ancora esiste a ovest, e la luce che inondava l’interno si rifletteva sulle grandi superfici a mosaico. La penombra misteriosa che ora regna nella chiesa, una penombra traversata sul primo mattino e verso il tramonto di raggi obliqui del sole, è dovuta al fatto che le finestre sono state progressivamente chiuse e i mosaici sono andati perduti. Se si considerano le vicissitudini subite da Santa Sofia nel corso di quattordici secoli, il suo stato di conservazione può dirsi miracoloso [56].

1.5 San Vitale

Nell'ambito dell'architettura religiosa, gli edifici costruiti nelle province dell'impero, indicano che la forma a cupola non fu adottata ovunque, e che di solito prevalevano le tradizioni locali. E' proprio il caso di San Vitale a Ravenna a discostarsi dalle regole costruttive italiane dell'epoca. Erroneamente, si considerano i monumenti di questa città tanto quelli del V quanto quelli del VI secolo come bizantini, anzi, come i più perfetti esempi di arte paleobizantina, ma la storia monumentale di Ravenna nel periodo paleocristiano è generalmente divisa in tre periodi. Il primo incomincia nel 402, quando la residenza dell'Imperatore d'Occidente fu trasferita da Milano a questa oscura cittadina circondata da lagune e paludi, e finisce nel 493, quando, dopo un lungo assedio, Ravenna fu conquistata da Teodorico. Il secondo periodo, del regno ostrogoto, arriva fino al 540, l'anno della riconquista della città ad opera di Belisario. Il terzo, che è il periodo bizantino vero e proprio, è quello di Ravenna capitale dell'Esarcato d'Italia, che dura fino al 751.



Figura 1.1.1: Vista esterna di San Vitale

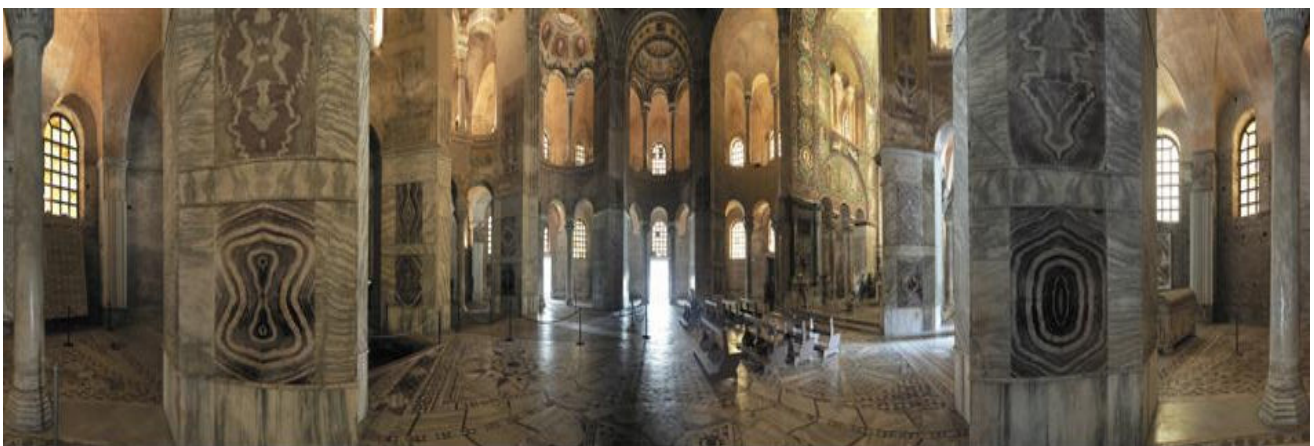
Solo, però, con l'avvento del dominio diretto di Bisanzio, l'influenza "orientale" influì sulle forme architettoniche presenti: la chiesa di San Vitale ne è una dimostrazione. Esaminando l'inventario di tutta la produzione architettonica del VI secolo, si nota che San Vitale rimase un'eccezione a Ravenna, e che la basilica italiana era la norma: lo dimostra la contemporanea chiesa di Sant'Apollinare in Classe, iniziata dal vescovo Ursicino (534-536) e consacrata da Massimiano nel 549, costruita come una normale basilica italiana.

La costruzione di San Vitale (Figura 1.1.1) fu iniziata sotto il vescovo Ecclesius (521-532 d.C.), il cui ritratto, come quello del fondatore, si trova nella semicupola dell'abside, in periodo ostrogoto. Se, come si ritiene generalmente, questo accadde durante la reggenza di Amalasantha (526-534 d.C.), quando l'influenza politica bizantina si stava facendo più forte a Ravenna, si può ragionevolmente concludere che questo splendido monumento volesse essere un'espressione della potenza bizantina. Sull'identità del patrono, il banchiere (*argentarius*) Giuliano, che, spese 26000 *solidi* per San Vitale e finanziò la costruzione di diverse altre

chiese, fra cui Sant'Apollinare in Classe, San Michele in Africisco e forse Santa Maria Maggiore, si conosce, esclusivamente, la sua lontana provenienza: era un orientale di lingua greca; ma l'immaginazione degli studiosi, stimolata dalla sua figura enigmatica e dalla vastità della sua attività edilizia, ne ha fatto l'agente segreto di Giustiniano a Ravenna, ed è giunta a identificarlo nel funzionario piuttosto corpulento rappresentato fra Giustiniano e l'arcivescovo Massimiano nel famoso mosaico di San Vitale.

A quanto pare San Vitale era, originariamente, un martirion, che ne sostituiva uno precedente del V secolo. Non si sa se il progetto architettonico sia stato eseguito al tempo della fondazione della chiesa, cioè verso il 526, e quanta parte della sua costruzione sia stata compiuta prima della riconquista del 540. Sappiamo soltanto che i lavori continuarono sotto i vescovi Ursicino (534-536), e Vittore (538-545), i cui monogrammi appaiono sulle imposte dei capitelli, e che la chiesa fu dedicata dal vescovo Massimiano nel 547 d.C.

La somiglianza con le chiese dei "Santi Sergio e Bacco" e "Santa Sofia" è evidente: ciò dimostra come l'influenza orientale fosse presente a Ravenna, e come l'obiettivo del suo progettista fosse quello di creare un simbolo architettonico del grande impero d'oriente, espressione del medesimo potere, in una lontana colonia, un tempo sede del fallito impero occidentale antagonista. La concezione di San Vitale è dunque veramente bizantina: nel VI secolo, a partire da Giustiniano, l'architettura delle chiese bizantine passò dai modelli delle basiliche a colonnati a pianta circolare, poligonale, triconca, tutte con coperture a volta, al modello a pianta quadrata sormontata dalla cupola. La pianta ottagonale di San Vitale è ottenuta dall'intersezione a 45 gradi di due quadrati; così pure sono bizantini gli elementi marmorei, in particolare le colonne con i capitelli troncoconici di disegno diverso e le basi ottagonali scalate (Figura 1.1.2). Alcuni di questi elementi portano addirittura il marchio dei muratori greci.



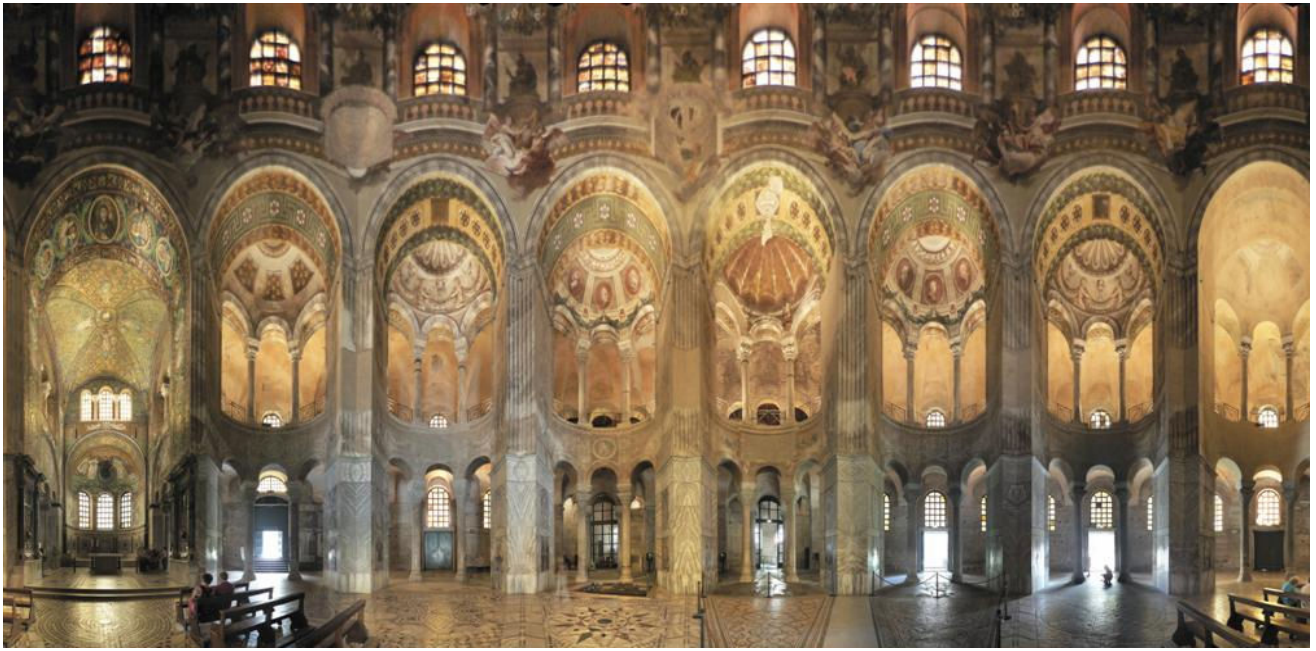


Figura 1.1.2: Viste raddrizzate interne di San Vitale

La sensibilità dei bizantini verso tutto quello che era prezioso e raro (metalli preziosi, vetri, pietre, marmi, smalti) si ritrova in S. Vitale, come si ritrova, a Costantinopoli, nelle altre due maggiori Basiliche di Giustiniano: i SS. Apostoli e Santa Sofia. Anche l'opera muraria è stata prodotta secondo la tecnica bizantina: qui, come in altri edifici del VI secolo a Ravenna, i mattoni sottili sono separati da abbondante malta, con proporzioni inverse a quelle allora prevalenti nell'Italia settentrionale. Tuttavia l'esecuzione fu certamente affidata ad artigiani locali, come prova per esempio la cupola, che è fatta non di mattoni, ma di tubi fittili vuoti disposti ad anelli orizzontali. Si può attribuire all'architetto locale la maggiore verticalità, che è forse la differenza più notevole fra San Vitale e i Santi Sergio e Bacco, anche tenendo conto del fatto che in questa seconda chiesa il pavimento è stato un rialzato.

A Costantinopoli la curvatura della cupola comincia alla base delle finestre, mentre a Ravenna c'è un tamburo intermedio consistente di due zone, prima una cornice di nicchie poco profonde sopra gli angoli dell'ottagono, poi, sopra e fra le nicchie, otto ampie finestre; e la cupola comincia a curvarsi verso l'interno solo al di sopra delle finestre. L'effetto visivo è perciò alquanto differente. Nella chiesa dei Santi Sergio e Bacco il visitatore è dominato dall'enorme, incombente mole della cupola - un effetto deliberatamente ricercato dagli architetti di Giustiniano, come dimostra la cupola originale di Santa Sofia -, mentre in San Vitale l'occhio è guidato più verso l'alto, attraverso una zona di relativa penombra, alla luce che entra dalle finestre del tamburo (Figura 1.1.3), e di qui alla cupola, che non dà l'impressione di minacciare

il crollo [56]. Ravenna assorbì l'influenza bizantina importata da Giustiniano, mantenendo però viva la tradizione italica, ad eccezione di San Vitale e, nonostante la presenza di un potere orientale, rimase per tutto il periodo, una città di lingua e di cultura latina.

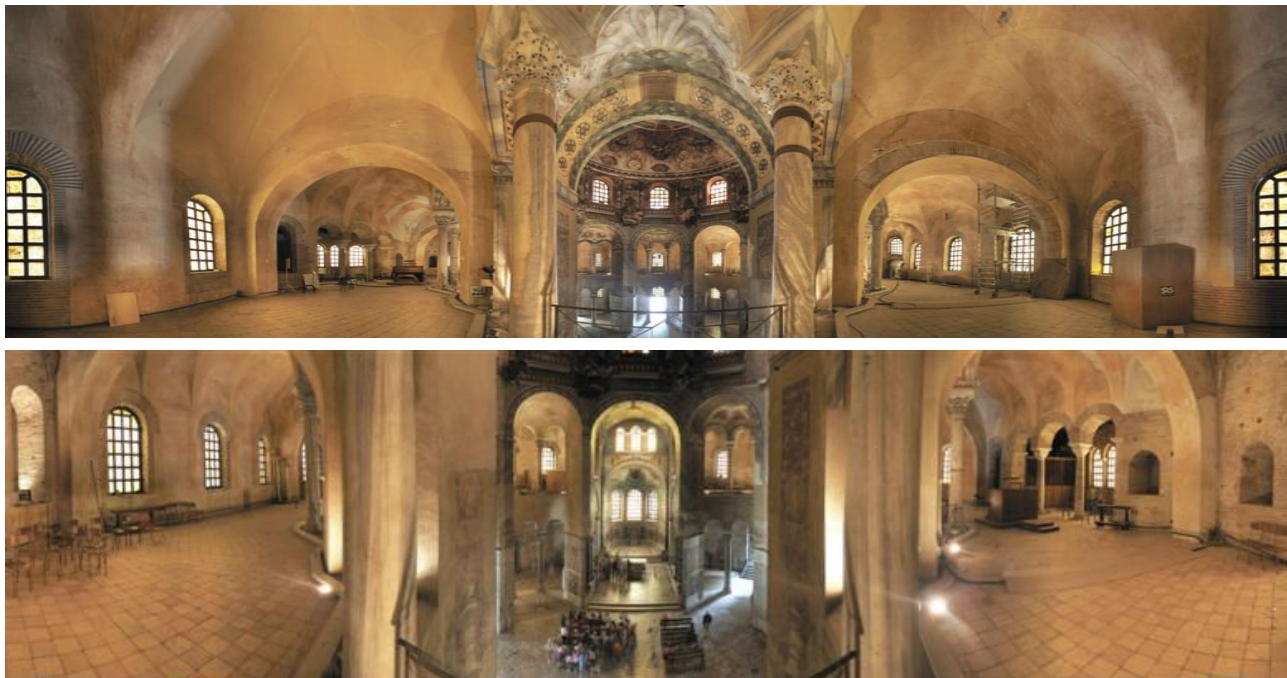


Figura 1.1.3: Viste raddrizzate del matrone - San Vitale

CAPITOLO 2

TEORIA DELL'ACUSTICA

2.1 Qualità acustica

Negli ultimi decenni si è assistito, a livello nazionale ed internazionale, ad una crescita esponenziale dell'interesse per le problematiche relative alla qualità del suono all'interno di teatri o chiese.

W.C. Sabine, definì chiaramente i requisiti fondamentali per ottenere una buona acustica in un auditorium qualsiasi (Sabine, 1922): "... è necessario: 1) che il suono sia sufficientemente forte ; 2) che le componenti contemporanee di un suono complesso mantengano un rapporto appropriato tra le loro intensità; 3) che suoni successivi nella loro rapida articolazione, sia che si tratti di parlato, sia che si tratti di musica, siano chiari e distinti, liberi da sovrapposizione mutua e da rumori estranei. Queste sono le condizioni necessarie, nonché del tutto sufficienti, per una buona acustica..."

Ai giorni d'oggi i requisiti che Sabine esprimeva più di tre quarti di secolo fa, si concretizzano fisicamente in una serie di parametri che prendono spunto fundamentalmente dalle caratteristiche intrinseche che sono possedute da un teatro che può essere inteso come un «sistema lineare tempo invariante», caratterizzato pertanto dalla sua «risposta all'impulso».

La qualità dell'ascolto di un brano musicale o della voce prodotti all'interno di un teatro o di una chiesa dipendono dalle caratteristiche fisico-acustiche della sorgente e dell'architettura dell'ambiente interno. Essa risulta soddisfacente qualora si realizzi un livello di energia sufficientemente elevato ed uniforme, che permetta a tutti i potenziali ascoltatori di udire e comprendere il segnale acustico emesso. L'uniformità delle condizioni di ascolto attribuisce all'ambiente un maggior pregio, a prescindere da qualsiasi altra condizione [22].

In particolare, la contemporanea percezione del suono diretto, generato dalla sorgente sonora, e delle varie riflessioni prodotte dalle superfici delimitanti dall'ambiente, creano una componente riverberante che condiziona il tipo di attività prevista per l'ambiente stesso.

La qualità sonora degli ambienti dipende fortemente dalla riverberazione, ossia dal fenomeno fisico correlato alla propagazione delle onde acustiche nell'aria, al loro contatto con la geometria dell'ambiente, e agli eventi tipici dei fenomeni ondulatori (in particolare la riflessione dell'onda sonora). La contemporanea presenza delle varie onde riflesse dalle superfici dell'ambiente teatrale od ecclesiastico ed anche dagli oggetti in esso contenuto, nonché del segnale sonoro che continua ad essere prodotto dalla sorgente, crea una sovrapposizione di campo diretto e campo riverberato.

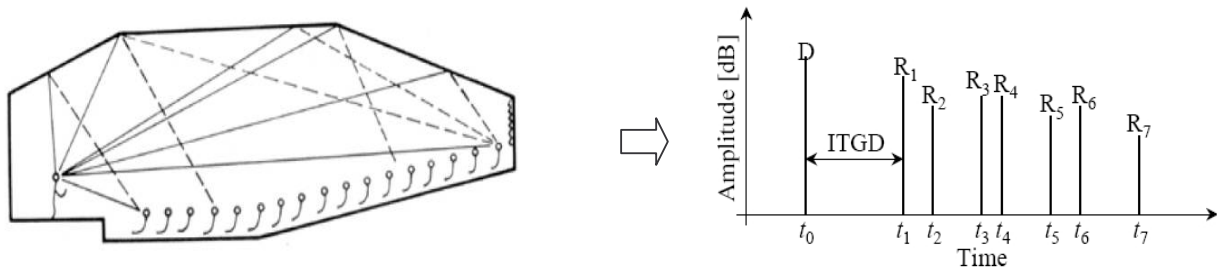


Figura 2.1.1:

Schematizzazione del campo diretto e riverberato e registrazione dei pacchetti di energia sonora nel punto ricevente

A seconda del tipo di sovrapposizione che si viene a creare al suo interno, il messaggio sonoro può essere gradevole o meno, influenzando anche negativamente sulla qualità acustica di un ambiente: una quota eccessiva di energia riverberata può costituire un disturbo indesiderabile ai fini di una corretta comprensione dei segnali emessi dalla sorgente. Infatti, l'ascoltatore in un ambiente chiuso riceve, oltre al segnale acustico proveniente direttamente dalla sorgente, anche la riverberazione residua dei segnali emessi in precedenza, i quali giungono al ricevitore in istanti successivi in funzione delle lunghezze dei cammini percorsi. Se il segnale emesso dalla sorgente è costituito da una serie di impulsi diversi e di breve durata, allora la riverberazione di un segnale costituisce un disturbo per la corretta comprensione del messaggio successivo. In particolare, nel caso di linguaggio parlato il segnale è costituito da un'alternanza di suoni elementari aventi carattere stazionario e altri a carattere di brevi transitori; l'ascoltatore deve poter distinguere ogni suono con la massima chiarezza, senza la sovrapposizione di suoni riverberati.

Nel caso in cui il messaggio sia musicale, un certo grado di riverberazione (dipendente dal genere musicale) è un fenomeno utile per una buona audizione, per la fusione dei suoni e il

legamento delle note. La parte di segnale di riverberazione che è percepita in ritardo rispetto all'onda diretta di pochi millisecondi viene integrata dall'udito al suono diretto; si tratta dunque di una frazione utile all'ascolto.

Il conseguimento del valore ottimale della riverberazione non è però sufficiente ad assicurare la buona acustica di un ambiente chiuso, poiché non si fa alcuna distinzione tra la parte di energia utile all'ascolto, che perviene agli ascoltatori con un ritardo modesto rispetto all'onda diretta e la parte di energia più in ritardo, che è prevalentemente disturbante. Analogamente, non viene considerata nemmeno la direzione di arrivo dell'energia riflessa dalle varie superfici, che dipende dalle caratteristiche fisico-geometriche dell'ambiente e dalla natura della sorgente. In particolare, le varie riflessioni provenienti dall'ambiente devono possedere i seguenti requisiti: essere riflessioni precoci con ritardo rispetto all'onda diretta inferiore ai 100 ms, giungere all'ascoltatore da direzioni laterali, avere una intensità relativa a quella del suono diretto maggiore di una certa soglia ed essere pressoché mutuamente incoerenti.

Queste caratteristiche fisiche sono descritte da una serie di parametri monoaurali e binaurali contenuti nelle Risposte all'Impulso.

2.2 Risposta all'impulso

Il contenuto informativo necessario e sufficiente per una completa caratterizzazione dell'acustica di un ambiente chiuso è racchiuso nella sua risposta all'impulso. L'ipotesi fondamentale di tutte le teorie acustiche formulate sugli ambienti chiusi consiste nell'ipotizzare ciascun ambiente musicale come "sistema lineare tempo invariante": un qualunque sistema può essere considerato lineare quando presi due segnali di ingresso separati (A e B) e determinati i loro corrispondenti segnali in uscita (C e D), una qualunque combinazione lineare dei segnali di ingresso viene mantenuta immutata nei segnali di uscita (A+B produrrà la somma dei segnali in uscita B+C) [22].

ingresso	uscita
A	C
B	D
A+B	C+D

Tabella. 2.2.1: Schema di funzionamento del sistema lineare tempo invariante

Il tempo-invariante comporta che il sistema non si modifichi con il passare del tempo, ciò significa che il sistema dovrà essere immutato per tutto il periodo di analisi.

Nell'acustica degli spazi chiusi si definiscono i seguenti sistemi:

SISTEMA ACUSTICO. Si definisce sistema acustico o spazio acustico-musicale l'insieme delle componenti fisiche che delimitano l'ambiente nel quale si svolge l'attività musicale che è oggetto di studio. Esso è quindi costituito dall'architettura dello spazio, comprendendo la sala, il palcoscenico e tutto ciò che normalmente ne costituisce parte integrante, come le poltrone, le quinte, la macchina scenica, etc. In esso vanno anche comprese le caratteristiche termoigrometriche dell'ambiente, ossia temperatura dell'aria ed il suo gradiente termico, la velocità dell'aria, l'umidità relativa. Possono essere compresi anche gli strumenti musicali.

SISTEMA ELETTRONICO. Il sistema elettronico include tutto ciò che non costituisce il normale spazio acustico ma viene utilizzato esclusivamente per lo svolgimento delle misurazioni. Vanno quindi compresi gli apparati di misurazione quali microfoni, sorgenti sonore, trasduttori di potenza, schede audio, cavi di collegamento ed interfacciamento.

Nel caso dell'acustica degli ambienti chiusi si considera sistema il comportamento acustico esistente tra una particolare sorgente, teoricamente puntiforme, ed un particolare punto d'ascolto, anch'esso ipotizzato puntiforme, collocati all'interno dell'ambiente [22].

Se $x(t)$ rappresenta il segnale emesso dalla sorgente e $y(t)$ è il risultato delle modifiche prodotte dal sistema, black box, sul segnale di ingresso, segnale raccolto dall'ascoltatore, essi sono tra di loro correlati dalla risposta all'impulso dell'ambiente, chiamata $h(t)$. La risposta all'impulso $h(t)$ è la risposta del sistema nell'ipotesi che la sorgente sonora generi un segnale $x(t)$ unitario preceduto e seguito da un'infinità di zeri; esso è chiamato "funzione delta di Dirac":

$$(2.2.1) \delta(t) = 0 \text{ per } \tau \neq 0 \quad \int_{-\infty}^{\infty} \delta(\tau) \cdot d\tau = 1$$

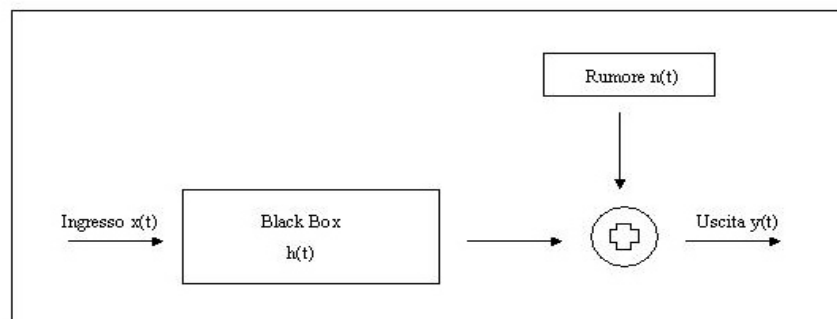


Figura 2.2.1: schema di funzionamento del sistema lineare tempo invariante

Più in generale, dato un segnale qualsiasi $x(\tau)$ generato dalla sorgente, il segnale percepito dal ricevitore in una particolare posizione si ottiene tramite il cosiddetto integrale di convoluzione, dato dall'espressione:

$$(2.2.2) \quad y(\tau) = x(\tau) * h(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} a(\tau) \cdot h(\tau - t) \cdot dt$$

La risposta in frequenza $H(f)$, più propriamente chiamata funzione di trasferimento, è la trasformata di Fourier di $h(\tau)$. Si dimostra che nel dominio della frequenza il prodotto di convoluzione (2.2.1) si traduce in un semplice prodotto fra gli spettri delle funzioni di partenza:

$$(2.2.3) \quad Y(f) = X(f) \cdot H(f)$$

La misurazione e la simulazione acustica può essere ricondotta in estrema sintesi alla determinazione della risposta all'impulso: quando $x(\tau)$ è la pressione sonora alla sorgente, l'uscita $y(\tau)$ è la pressione sonora al ricevitore, nota la quale si possono calcolare i parametri acustici di interesse. [22]

L'acustica di una sala da concerto, di un teatro o di una chiesa è fisicamente considerato un "sistema lineare tempo invariante" e come tale è possibile determinarne le proprietà fisiche, contenute nella sua risposta all'impulso: ciò che determina l'acustica dell'ambiente è la distribuzione al suo interno dell'energia sonora prodotta dalla sorgente; questa energia diversa per ogni singolo punto determina una differente percezione sonora a seconda della posizione dell'ascoltatore.

L'effetto delle riflessioni multiple in un ambiente chiuso, in seguito all'emissione di un segnale impulsivo da parte della sorgente, viene riprodotto graficamente da diagrammi riferiti a punti di ascolto. Tali diagrammi riportano in ascissa il tempo con un intervallo che può arrivare fino a qualche secondo, e in ordinata l'intensità dell'onda diretta e delle successive riflessioni, posizionati rispetto all'origine in funzione dei tempi impiegati a coprire le distanze percorse (Figura 2.2.2).

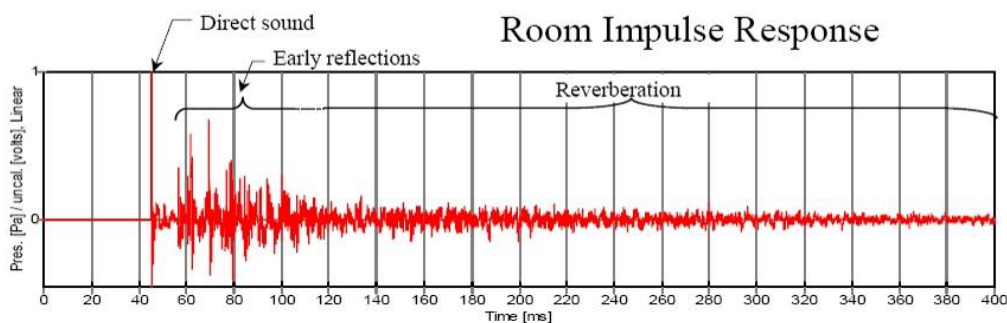


Figura 2.2.2: esempio di forma d'onda costituente la Risposta all'Impulso (IR)

I diagrammi rappresentano la risposta dell'ambiente al segnale impulsivo e permettono di valutare la qualità del segnale ricevuto leggendo le informazioni contenute sulla trasmissione del suono fra sorgente e punto di ascolto.

Tutte le informazioni utili alla descrizione del campo acustico di un ambiente chiuso sono contenute nelle risposte all'impulso (IR).

2.2.1 Risposta all'impulso binaurale

Benchè la risposta all'impulso rappresenti il parametro fisico in grado di esprimere in modo esaustivo le caratteristiche fisico-acustiche di un ambiente chiuso, ciò nondimeno è necessario, per una corretta valutazione della qualità acustica, stabilire come il brano musicale venga percepito e valutato dalle orecchie dell'ascoltatore. La risposta all'impulso pertanto deve essere modificata e riferita alla conformazione dell'apparato uditivo medio, pertanto devono essere considerate anche le funzioni di trasferimento relative alla testa (Head-Related Transfer Function, HRTF). Esse sostanzialmente trasformano la risposta in frequenza del microfono normale (omnidirezionale) in una coppia di microfoni binaurali. Questa operazione è necessaria quando si vuole simulare una risposta all'impulso binaurale, mentre nel corso delle misurazioni essa viene operata molto semplicemente ricorrendo ad un apparato sperimentale appropriato, ossia una testa artificiale (dummy head), che consente di effettuare misurazioni binaurali di risposte all'impulso [22].

2.2.2 Risposta all'impulso B-format

La risposta all'impulso di tipo B-format rappresenta una sorta di sviluppo della risposta binaurale, dacché riunisce in sé le caratteristiche monoaurali e tridimensionali del campocustico. Un esempio tipico di microfono tridimensionale è illustrato in Figura 2.2.3,

assieme ad una testa artificiale. Entrambi sono montati sopra un “torso” che sintetizza la presenza del corpo umano [22].

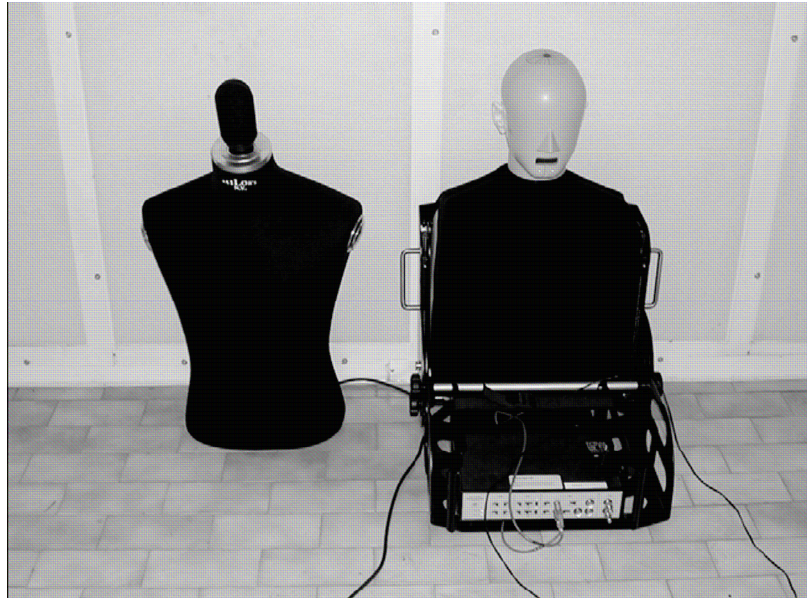


Figura 2.2.3: Testa artificiale (dx) e microfono tridimensionale (sx) montati su dei torsoli

Alla base del funzionamento del sistema vi è l’intuizione di Gerzon di utilizzare un sistema di registrazione a quattro canali caratterizzato da quattro microfoni cardioidi montati su un supporto tetraedrico regolare, chiamato a-format (Gerzon, 1975). Tale sistema, utilizzato per le riprese sonore di eventi musicali dalla BBC, doveva poi essere decodificato tramite opportune relazioni per essere successivamente riprodotto in un ambiente d’ascolto secondo una serie di formule che costituivano la teoria Ambisonics. Nella Figura 2.2.4 si riporta lo schema del sistema a-format [22].

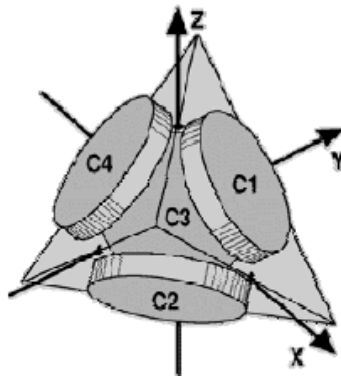


Figura 2.2.4: Le quattro capsule del a-format del sistema Ambisonic

I segnali in ingresso nelle capsule del sistema a-format possono essere elaborati, secondo le semplici relazioni della formula 2.2.4, ottenendo una serie di segnali virtualmente provenienti da altre direzioni, chiamate B-format (Figura 2.2.4):

$$\begin{aligned}(2.2.4) \quad & C_1 + C_2 + C_3 + C_4 = W \\ & C_1 + C_2 - C_3 - C_4 = X \\ & C_1 - C_2 + C_3 - C_4 = Y \\ & C_1 - C_2 - C_3 + C_4 = Z\end{aligned}$$

Il significato di questa trasformazione è immediato: il segnale W rappresenta un segnale omnidirezionale, come se virtualmente nel baricentro delle capsule a-format vi fosse un microfono omnidirezionale. Gli altri segnali (X , Y e Z) rappresentano ciascuno tre microfoni cardioidi virtuali collocati lungo gli assi di una terna cartesiana, e forniscono quindi i valori del campo sonoro proveniente da ciascun asse cartesiano.

2.3 Tecniche di misura della risposta all'impulso

2.3.1 Misura con segnale impulsivo

La tecnica di misura dei coefficienti h della risposta all'impulso è teoricamente semplice: si immette nel sistema la funzione impulsiva ideale, « δ di Dirac», un segnale costituito da un campione avente il valore massimo consentito dalla rappresentazione digitale impiegata (ad esempio +1, nei moderni sistemi «a virgola mobile») seguito solo da numeri nulli.

$$(2.3.1) \quad \begin{array}{|c|c|c|c|c|c|c|c|} \hline 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \hline \end{array}$$

Convolvendo il δ di Dirac si ottengono quindi:

$$(2.3.2) \quad y_1 = 1 \cdot h_1 + 0 \cdot h_2 + 0 \cdot h_3 = h_1$$

$$y_2 = 0 \cdot h_1 + 1 \cdot h_2 + 0 \cdot h_3 = h_2$$

$$y_3 = 0 \cdot h_1 + 0 \cdot h_2 + 1 \cdot h_3 = h_3$$

Ad ogni passo di campionamento si ottiene quindi un coefficiente h . Questo tipo di misurazione, benché teoricamente semplicissima, è praticamente molto difficile da realizzare: infatti, alimentando un altoparlante con il segnale δ , esso dovrebbe essere in grado di produrre un impulso molto breve e di elevatissima potenza (per una buona misurazione occorre superare di almeno 60 dB il rumore di fondo). Una possibile soluzione consiste nell'uso di una sorgente sonora di tipo esplosivo (una pistola caricata a salve, un palloncino di gomma) che però non fornisce un segnale che dura solo un periodo di campionamento, ma arriva a qualche decina di periodi. [22]

Per ovviare questo ostacolo, è possibile convolvere il segnale di risposta dell'ambiente con sé stesso rovesciato sull'asse dei tempi in modo da far diventare primo l'ultimo campione: questa tecnica prende il nome di *time reversal mirror*; ciò porta ad avvicinarsi alla risposta teorica derivante dall'uso di una vera δ di Dirac, ma non al suo raggiungimento: si otterrebbe il risultato ideale solo se lo spettro del segnale impulsivo di eccitazione fosse realmente piatto, ma, poiché, al contrario, esso è solitamente piuttosto irregolare, dopo la convoluzione con il proprio *time reversal mirror* corrispondente, si ottiene una risposta all'impulso il cui andamento spettrale è ancora più marcatamente artefatto. Inoltre, siccome il prodotto di convoluzione gode della proprietà commutativa, se col *time reversal mirror* si potesse ottenere effettivamente la risposta ad una δ di Dirac ideale, basterebbe convolvere il segnale in uscita con il generico segnale in ingresso rovesciato sui tempi per ottenere la risposta all'impulso del sistema, qualunque sia tale segnale di ingresso, ad esempio anche musica o parlato.

Va ricordato che la convoluzione di un segnale con sé stesso rovesciato sull'asse dei tempi fornisce la cosiddetta funzione di autocorrelazione del segnale, mentre convolvere un segnale y con la versione rovesciata sull'asse dei tempi di un diverso segnale x , porta al calcolo della cosiddetta funzione di cross-correlazione fra tali due segnali.

Da tali considerazioni nasce l'idea di deconvolvere la risposta all'impulso a partire da una misura effettuata impiegando come segnale di test un segnale casuale, come un rumore bianco: si supponga di trovare una coppia di segnali tali che il loro prodotto di convoluzione fornisca il δ di Dirac. Si tratta quindi di due segnali per i quali si ha:

$$(2.3.3) \quad x^{-1} \otimes x = \delta$$

Poiché il prodotto di convoluzione, come il prodotto semplice, gode della proprietà commutativa, si ha:

$$(2.3.4) \quad y \otimes x^{-1} = x \otimes h \otimes x^{-1} = h \otimes x \otimes x^{-1} = h \otimes \delta = h$$

Il problema, di tipo computazionale, consiste quindi nel determinare una coppia di segnali x e x^{-1} , il primo dei quali da utilizzare come test nell'ambiente di prova, ed il secondo, chiamato «filtro inverso», da convolvere con l'output del segnale nell'ambiente stesso. Non è semplice determinare tale coppia di segnali, a meno che il segnale di partenza x sia costruito in modo da avere alcune speciali proprietà matematiche, come accade con il segnale MLS o con i segnali sinusoidali tipo sweep.

2.3.2 Segnali particolari: sine sweep

La tecnica del segnale MLS permette di ottenere la risposta all'impulso del sistema elettroacustico mediante algoritmi molto efficienti, ma non consente la separazione del contributo del sistema acustico dalle distorsioni armoniche del sistema elettronico. Tale separazione è invece ottenibile con la tecnica del cosiddetto segnale sweep. Il segnale così definito è composto da una forma d'onda di tipo sinusoidale puro che parte dalle frequenze basse e sale verso l'alto al trascorrere del tempo. Questo segnale presenta un particolare vantaggio: il suo «filtro inverso» x^{-1} è costituito dal segnale di partenza ribaltato nell'asse dei tempi:

- x = segnale di sweep.
- x^{-1} = x rovesciato nell'asse dei tempi.

Pertanto la determinazione numerica di x^{-1} è precisa ed immediata. La facilità della determinazione di x^{-1} comporta necessariamente la perdita dei vantaggi numerici ottenuti dai segnali MLS mediante la trasformata di Hadamard. Tuttavia, se negli anni novanta le possibilità di calcolo numerico, assai limitate, costringevano a sacrificare tecniche analitiche raffinate a vantaggio di metodologie meno precise ma dotate di efficienti algoritmi numerici, lo sviluppo dei processori numerici ha consentito l'implementazione di teorie analitiche molto raffinate.

SWEEP LINEARE: quando la generazione del segnale sinusoidale ha variazione lineare della frequenza nel tempo, i segnali sweep corrispondenti vengono chiamati lineari.

L'andamento della forma d'onda così definita può essere facilmente rappresentata in un diagramma tempo-frequenza, come in Figura 2.3.1:

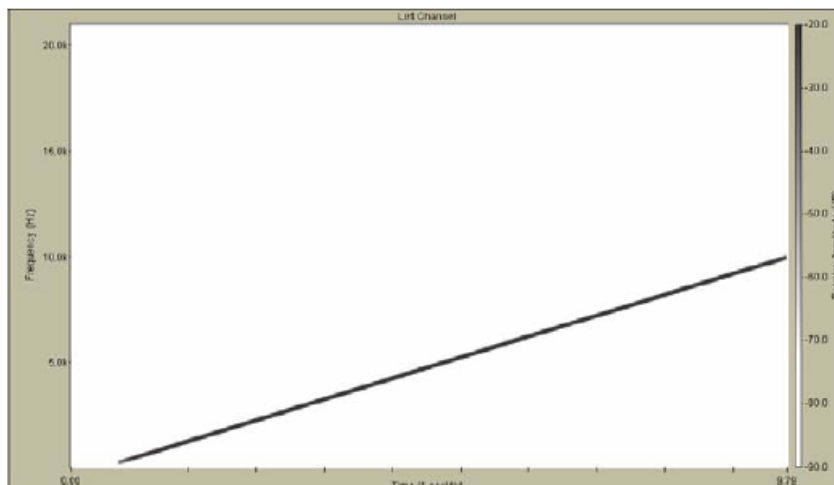


Figura 2.3.1: Rappresentazione di un segnale sweep lineare

Si supponga di applicare come segnale x in ingresso ad un sistema elettroacustico, costituito in modo preponderante da trasduttori elettronici, il segnale *sweep* lineare appena descritto. Per effettuare questa sperimentazione è sufficiente svolgere la misurazione in un ambiente semi-anechoico collocando il microfono molto vicino all'altoparlante. In uscita dal sistema si otterrà un segnale y , evidenziato in Figura 2.3.2: esso sarà stato modificato dalle caratteristiche del sistema acustico, caratterizzato dalla fondamentale dalla componente elettronica e quindi distorto dalle caratteristiche non lineari del sistema elettronico, in particolare dall'altoparlante utilizzato per la diffusione del segnale.

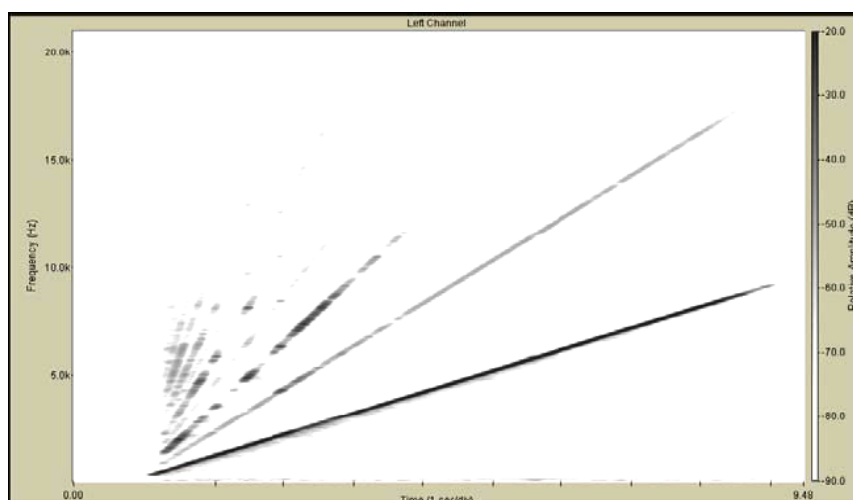


Figura 2.3.2: Segnale sweep lineare in uscita dal sistema elettroacustico

Per procedere con la misurazione sarà necessario determinare il corrispondente «filtro inverso», ossia il segnale x^{-1} , che nel caso dello sweep lineare sarà costituito da una forma d'onda sinusoidale con frequenza decrescente linearmente nel tempo, rappresentata in Figura 2.3.3, ottenuta ribaltando il segnale x lungo l'asse del tempo.

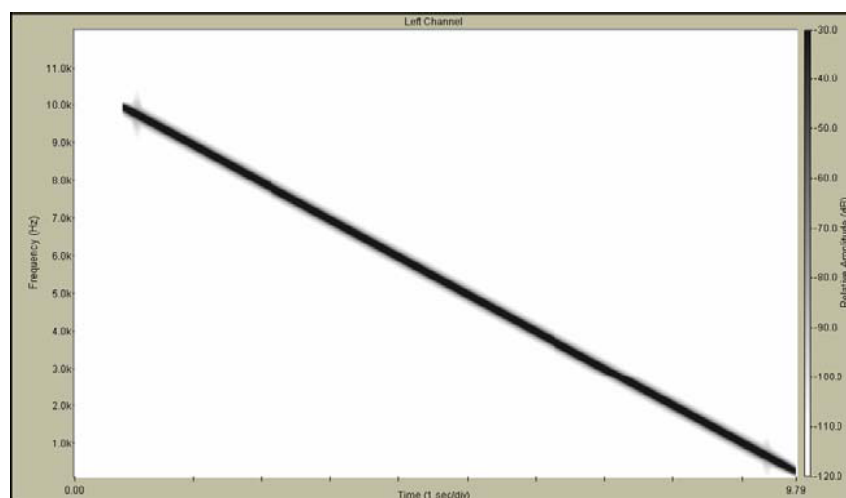


Figura 2.3.3: Segnale sweep lineare in uscita dal sistema elettroacustico

Effettuando quindi la convoluzione tra segnale in uscita y e «filtro inverso» x^{-1} si ottiene la risposta all'impulso del sistema elettroacustico.

SWEEP ESPONENZIALE: un risultato ancora migliore è ottenibile con l'utilizzo di un segnale sweep esponenziale, rappresentato in Figura 2.3.4, nel quale la crescita della frequenza corrispondente alla forma d'onda sinusoidale si sviluppa esponenzialmente con il trascorrere del tempo. In tale maniera, la velocità con cui aumenta la frequenza percepita dal segnale

sweep risulta costante su un asse logaritmico: la frequenza varia nel tempo per ottave, ossia al raddoppio dell'intervallo di tempo la frequenza diventa doppia. Si tratta quindi di un segnale molto più vicino alla normale pratica musicale rispetto allo sweep lineare.

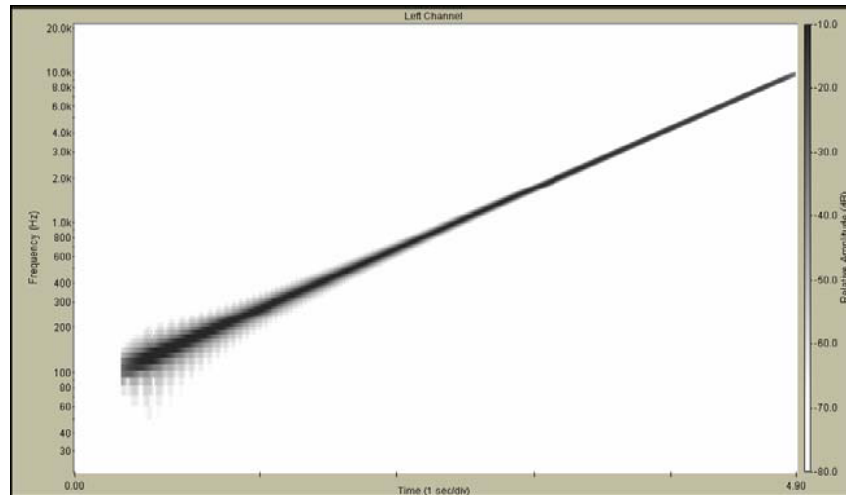


Figura 2.3.4: Rappresentazione nel dominio tempo-frequenza di un segnale sweep esponenziale

Nel caso di sweep esponenziale, la risposta del sistema elettroacustico, ossia il segnale y , assume un andamento diverso dal caso dello sweep lineare. Osservando la Figura 2.3.5 si nota che le distorsioni armoniche prodotte dalle componenti elettroniche mantengono la stessa pendenza sul piano tempo-frequenza (quest'ultima su scala logaritmica) del segnale di ingresso, a differenza dalla Figura 2.3.2.

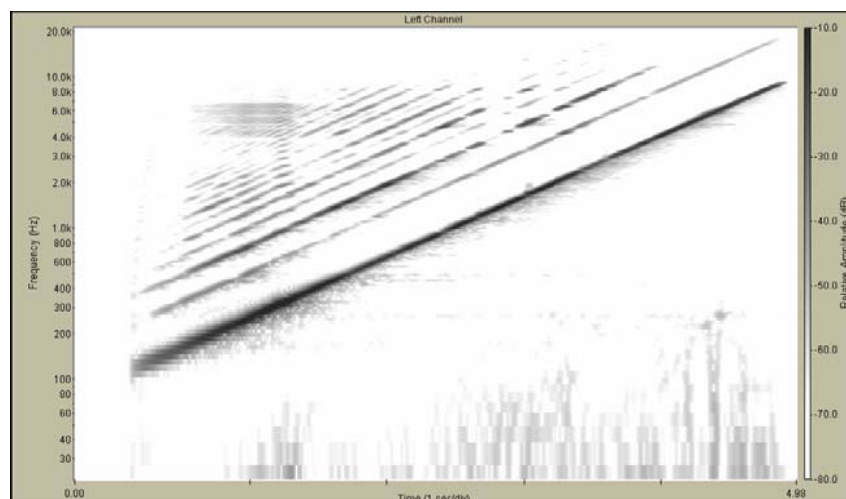


Figura 2.3.5: Rappresentazione nel dominio tempo-frequenza di un segnale sweep esponenziale

Nel caso del segnale *sweep* esponenziale il «filtro inverso» da utilizzare per la deconvoluzione, costituito dal segnale di test originario ribaltato lungo l'asse dei tempi, deve essere modificato: il solo ribaltamento nell'asse dei tempi determinerebbe un pesante filtraggio della risposta in frequenza misurata, in quanto, di per se, il segnale di test a sweep esponenziale possiede uno spettro che non è piatto, quindi simile ad uno spettro rosa invece che ad un rumore bianco. Lo spettro rosa dello *sweep* esponenziale è formato, infatti, da uno spettro il cui livello sonoro decresce proporzionalmente con la frequenza, con pendenza pari a 3 dB/ottava. Il corrispondente «filtro inverso», pertanto, deve contenere uno spettro in grado di compensare l'andamento del segnale di ingresso. Tale compensazione si ottiene applicando un filtraggio delle ampiezze con pendenza positiva di 6 dB/ottava. Normalmente tale filtraggio viene effettuato direttamente durante la generazione del filtro inverso. A seguito del ribaltamento nell'asse dei tempi, visibile in Figura 2.3.6, tale filtraggio appare visivamente come una diminuzione delle ampiezze alle basse frequenze.

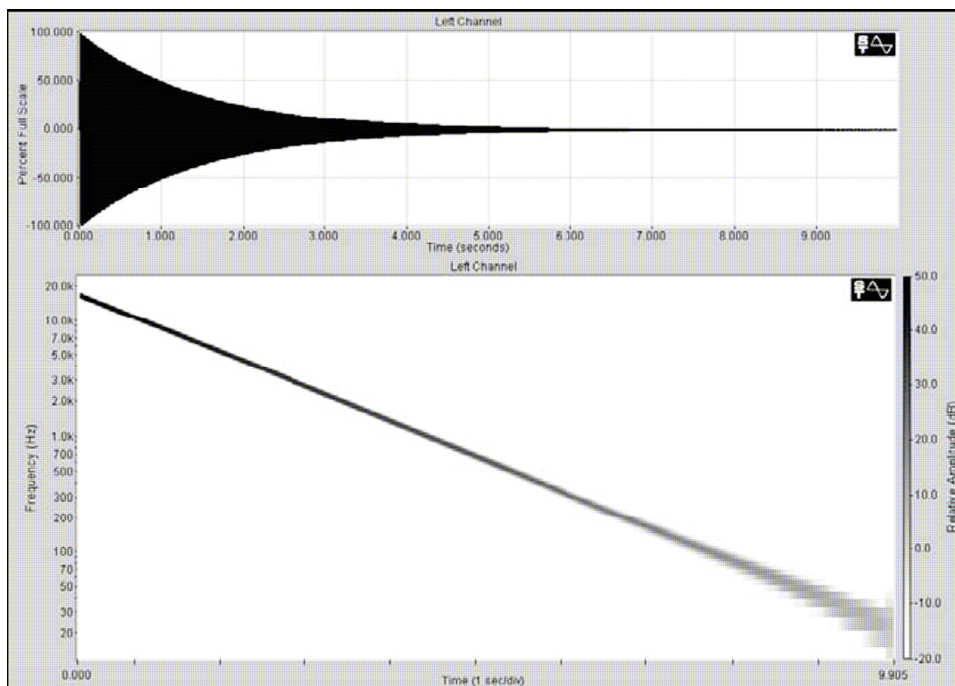


Figura 2.3.6:

«Filtro inverso» del segnale sweep esponenziale: diagramma nel dominio del tempo (a) e nel piano tempo-frequenza (b)

Analogamente a quanto esaminato per il segnale *sweep* lineare, dal prodotto di convoluzione tra il segnale in uscita y e il «filtro inverso» x^{-1} , si ottiene la risposta all'impulso del sistema

elettroacustico. La misurazione effettuata con *sweep* di tipo esponenziale consente non solo di estrarre la risposta all'impulso lineare, corrispondente al sistema acustico, priva di qualsiasi artefatto causato dalle eventuali distorsioni nei trasduttori, ma anche di misurare la risposta non lineare del sistema, quantificando la risposta all'impulso di ciascun ordine armonico.

2.4 Parametri acustici energetici

La descrizione oggettiva dell'acustica di una sala da concerto, di un teatro o di una chiesa è basata sulla conoscenza di parametri fisici misurabili che sono legati ad aspetti percettivi acustici. Un attributo percettivo è una qualità riconoscibile nell'esperienza uditiva globale. La determinazione della qualità acustica all'interno degli ambienti chiusi è un fenomeno correlato con la riverberazione, ed è misurabile per mezzo di numerosi parametri acustici che costituiscono tuttora argomento di ricerca a livello internazionale. Diversi parametri sono ormai unanimemente considerati particolarmente indicativi, secondo quanto stabilito dalla norma ISO 3382:97 - Acoustics -Measurement of the reverberation time of rooms with reference to other acoustical parameters [9].

Tempo di riverberazione (T60)

Il senso della riverberazione è l'attributo più evidente che si percepisce in un ambiente chiuso. Esso è definito come il tempo necessario affinché il livello della pressione sonora in un punto dell'ambiente decada di 60 dB rispetto al suo valore iniziale nel momento in cui è interrotto il funzionamento della sorgente che sosteneva il precedente regime stazionario. Il fenomeno della riverberazione e i suoi effetti qualitativi sulla comunicazione acustica negli ambienti chiusi erano già noti prima che W.C. Sabine (1922), alla fine dell'ottocento, desse una fondazione scientifica alla materia:

$$(2.4.1) \quad T_{60} = 0.16 \left(\frac{V}{A} \right) \text{ [s]} \quad \boxed{A = S \cdot \bar{\alpha}}$$

con α corrisponde al valore medio dei vari coefficienti di assorbimento dei materiali presenti nell'ambiente.

Usualmente, è valutato in base alla pendenza media del decadimento del livello della pressione sonora nel tempo: nella maggior parte dei casi reali il decadimento presenta pendenze medie

doppie o multiple, disattendendo la semplificazione teorica di condizioni di campo sonoro perfettamente diffuso con un decadimento del livello rettilineo a pendenza negativa; tale fenomeno influisce sulla percezione del senso della riverberazione: una coda sonora di durata corrispondente ad una riduzione del livello di 60dB può essere udita in occasione di uno stacco musicale improvviso, mentre nel caso di un passaggio musicale articolato, è percepibile solamente la parte iniziale del decadimento dei picchi della pressione sonora più intensi e la rimanente parte viene mascherata da eventi successivi. Tenendo conto di questo importante fattore percettivo, sono stati definiti altri tipi di tempo di riverberazione basati sull'extrapolazione grafica della prima parte della curva di decadimento. Molti ricercatori si chiesero quale fosse la parte di decadimento più significativa per la percezione degli effetti di riverberazione, proponendo nuovi parametri acustici legati al tempo di riverbero. Schroeder, Atal e Sessler nel 1965 proposero di adottare l'IRT, Initial Reverberation Time o Tempo di Riverberazione Iniziale; questo valore è ottenuto estrapolando la pendenza dei primi 15 dB, partendo da -5 dB, dalla curva di decadimento del livello di pressione sonora a -60 dB: fu giudicato più significativo del T60 e gli fu dato nome di T15. Kürer e Kurze due anni dopo, nel 1967, proposero il T20, che a differenza del T15, si ottiene estrapolando la pendenza da -5 dB a -25 dB della curva di decadimento del livello della pressione sonora a -60 dB (Figura 2.4.1).

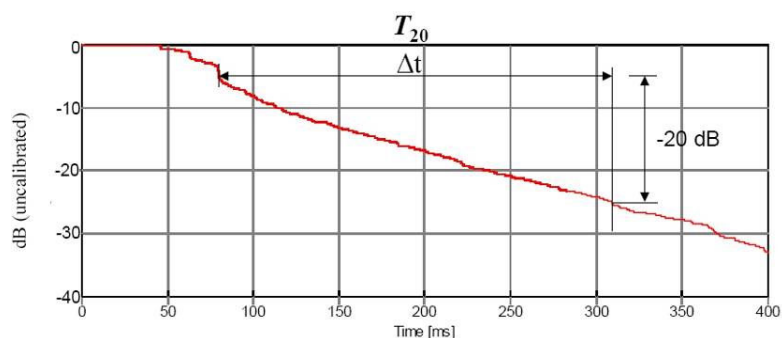


Figura 2.4.1: estrapolazione dei primi 20 dB dalla curva di decadimento del livello di pressione sonora a -60 dB T_{20}

Analogamente gli stessi studiosi adottarono il T30 o T_R , Reverberation Time, valutato interpolando la curva di decadimento tra -5dB e -35dB.

Nel 1968 Jordan definì l'EDT, Early Decay Time, con la differenza che l'intervallo di estrapolazione in questo caso è ristretto ai primi 10 dB partendo da 0 dB.

Early Decay Time (EDT)

L'EDT o Early Decay Time, tra tutti i tempi di riverberazione che sono stati proposti dai ricercatori, è risultato essere quello più correlato alle valutazioni psico-soggettive dell'ascoltatore medio.

Chiamato Tempo di primo decadimento, è correlato con il decadimento iniziale si differenzia dal tempo di riverberazione T_R perché l'intervallo di estrapolazione parte da 0 dB anziché da -5 dB, ed è calcolato nell'intervallo di decadimento 0, -10 dB (Figura 2.4.2).

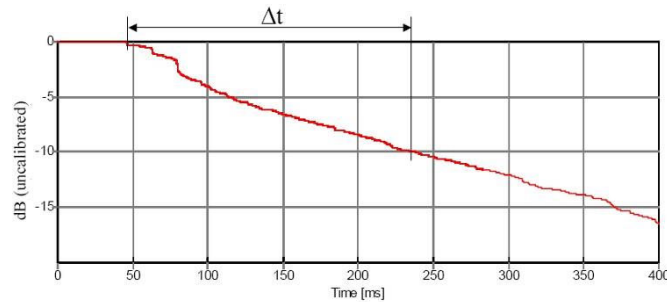


Figura 2.4.2:estrapolazione dei primi 10 dB dalla curva di decadimento del livello di pressione sonora a -60 dB_EDT

Anche questo parametro viene normalmente calcolato secondo l'algoritmo definito da Schroeder.

Definition (D_{50})

Thiele nel 1953, basandosi sugli studi di Haas nel 1951 e di altri ricercatori che avevano confermato che il suono che giunge con breve ritardo rispetto al suono diretto produce un incremento dell'intensità percepita, propose l'Indice di Definizione, come il rapporto tra l'energia nei primi 50 ms della risposta all'impulso e l'energia totale:

$$(2.4.2) \quad D_{50} = \frac{\int_0^{50ms} h^2(\tau) d\tau}{\int_0^{\infty} h^2(\tau) d\tau} \quad [\%]$$

Dove $t=0$ è l'istante in cui il suono diretto giunge nel punto di osservazione. L'Indice di Definizione rappresenta il capostipite delle frazioni energetiche ed è comunemente usato per valutare la percezione nitida del parlato in sala (Figura 2.4.3).

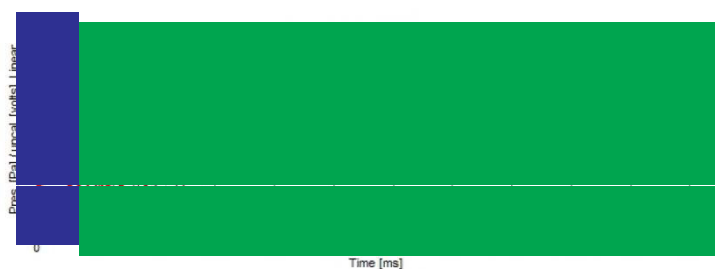


Figura 2.4.3: Indice di Definizione _D

Clarity (C_{50} e C_{80})

Diversi studiosi hanno perseguito l'idea che l'energia in una parte specifica dell'ecogramma energetico, riferita a quella in un'altra parte, sia un buon descrittore fisico di un determinato effetto soggettivo. La figura 2.3.4 mostra l'area sottesa dall'ecogramma energetico dall'istante di arrivo del suono diretto $t=0$ e l'istante successivo a $t=50$ ms, che definisce l'energia utile per la chiarezza del parlato, C_{50} , mentre l'area sottesa tra $t=0$ e $t=80$ ms definisce la quota di energia utile per la chiarezza della musica, C_{80} .

Definito Indice di Chiarezza, introdotto dalla scuola di Dresda nel 1975, fu derivato da studi basati su prove di ascolto di campi sintetici in camera anecoica e si ottiene dal rapporto:

$$(2.4.3) \quad C(t) = 10 \log \frac{\int_0^t h^2(\tau) d\tau}{\int_t^\infty h^2(\tau) d\tau} \quad [dB]$$

in cui t può essere 50 o 80 ms. Esso rappresenta l'energia della prima parte (50 o 80 ms) rispetto alla coda (Figura 2.4.4).

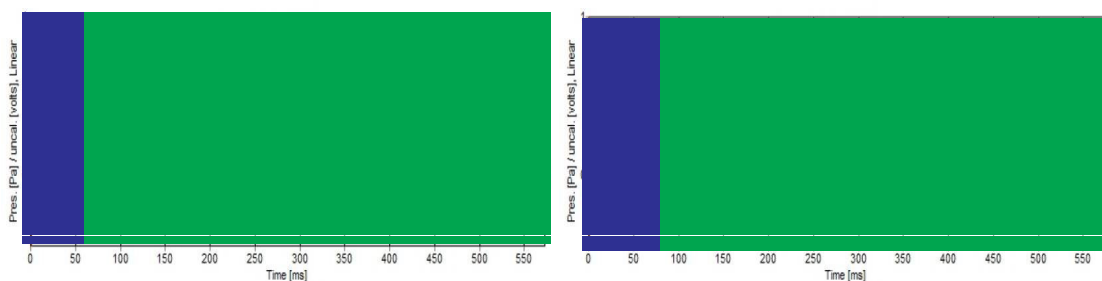


Figura 2.4.4: Indice di Chiarezza _C 50 - C80

La chiarezza, C50, analizza il comportamento dell'ambiente per il parlato, in cui riveste maggior importanza la prima parte della risposta all'impulso, invece C80, si riferisce alla possibilità di percepire nitidamente note suonate sia in successione rapida che contemporaneamente da uno o più strumenti.

Center Time (t_s)

In seguito all'osservazione critica che le frazioni energetiche sono notevolmente sensibili a quelle situazioni in cui un contributo importante di energia prossimo ad un limite di integrazione, a seconda che sia collocata a monte o a valle del limite stesso, determina valori notevolmente diversi dal parametro e che questo non corrisponde al comportamento della sensazione uditiva, sono stati introdotti dei descrittori che pesano gli elementi di energia con opportune funzioni del tempo, come t_s , il Tempo baricentrico.

Ideato da Kürer nel 1969, è definito dalla relazione:

$$(2.4.4) \quad t_s = \frac{\int_0^{\infty} \tau \cdot h^2(\tau) d\tau}{\int_0^{\infty} h^2(\tau) d\tau} \quad [\text{ms}]$$

Esso esprime il baricentro temporale dell'energia contenuta nella risposta all'impulso $h(\tau)$. Va correlato con le sensazioni di chiarezza e nitidezza del segnale sonoro sia della musica che del parlato.

Strenght (G)

Un'ambiente può rinforzare l'intensità della voce e della musica rispetto alla stessa disposizione di sorgenti e ricevitori all'aperto. Studi sulla qualità del suono hanno sottolineato l'importanza dell'intensità con cui si percepisce l'evento musicale, chiamato, Livello di Pressione Sonora o S.P.L.: questo attributo percettivo corrisponde alla scala per cui un suono è giudicato più o meno forte, ovvero debole. L'intensità percepita è correlata, a sua volta, con l'indice della robustezza del suono o Livello di Pressione Sonora Relativo, denominato Strength (G): rappresenta il livello sonoro percepito nel punto di ascolto. Attualmente definito dalla norma ISO 3382 come:

$$(2.4.5) \quad G = 10 \log \frac{\int_0^{\infty} h^2(\tau) d\tau}{\int_0^{\infty} h_{10}^2(\tau) d\tau} \quad [\text{dB}]$$

dove $h(\tau)$ è la risposta all'impulso per una coppia sorgente/ricevitore nell'ambiente e $h_{10}(\tau)$ è la risposta che la stessa sorgente omnidirezionale, senza mutare nulla, farebbe misurare alla distanza di 10 m nello spazio libero. G fu introdotto da Lehmann nel 1976 per definire l'effetto di amplificazione dell'ambiente.

Speech Transmission Index (STI)

L'Intelligibilità della parola all'interno di un teatro, di un auditorium o di una chiesa rappresenta un parametro non direttamente correlato con la produzione musicale. Tuttavia la musica operistica, nonché gli spettacoli di prosa, prevedono la partecipazione di cantanti ed attori, per i quali l'intelligibilità riveste una importanza considerevole. Tra i numerosi parametri riguardanti l'intelligibilità certamente il più importante è l'Indice di trasmissibilità del parlato, STI. Lo STI viene calcolato a partire dalla funzione di trasferimento della modulazione, (Modulation Transfer Function, MTF). Essa è definita dal rapporto tra l'ampiezza della modulazione pervenuta al ricevitore e la corrispondente modulazione generata dalla sorgente (generata da un rumore rosa filtrato) per bande d'ottava nel campo di frequenza compresa tra 125 Hz e 8 kHz, avente una ampiezza modulata ad una frequenza f molto bassa (Figura 2.4.5).

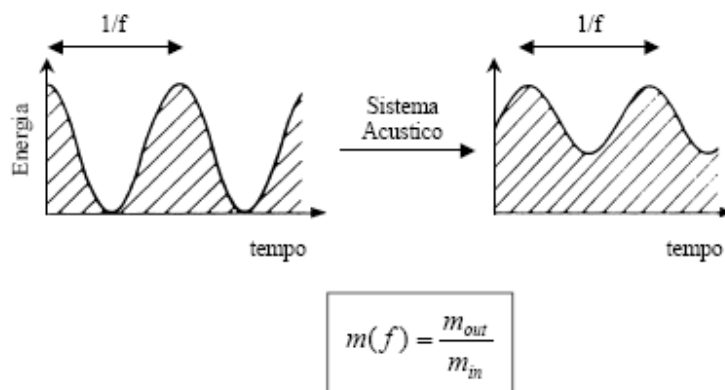


Figura 2.4.5: A sinistra il segnale generato, a destra il segnale percepito.

Al variare della frequenza modulante tra i valori di 0.63 Hz e 12.5 Hz si ottiene un insieme di 98 valori di MTF, corrispondenti a 14 dati per ciascuna delle 7 bande d'ottava. Successivamente i valori vengono mediati in un solo valore, lo STI.

Qualora i calcoli vengano limitati alle sole bande di 500 e 2 kHz, la media risultante viene chiamata Rapid-STI, ossia RASTI. Anche in questo caso è possibile effettuare il calcolo della MTF e conseguentemente dello STI a partire dalla risposta all'impulso (Schröder, 1981), opportunamente filtrata per ciascuna banda d'ottava:

$$(2.4.6) \quad m(F) = \frac{\int_0^{\infty} h_f^2(\tau) \cdot e^{-j2\pi\tau} d\tau}{\int_0^{\infty} h_f^2(\tau) d\tau}$$

Rapid Speech Transmission Index (RASTI)

Indice rapido di trasmissibilità del parlato. Definito da Steeneken e Houtgast nel 1985, viene espresso dalla formula:

$$(2.4.7) \quad RASTI = \frac{\left(\overline{\frac{S}{N}}\right)_{app} + 15}{30}$$

dove il rapporto $\left(\overline{\frac{S}{N}}\right)_{app}$ è calcolato a partire dai valori di MTF (Modulation Transfer Function) relativi a due frequenze della portante (500 Hz e 2 kHz) e complessivamente 9 frequenze di modulazione. RASTI dipende linearmente dal rapporto segnale/rumore, e inversamente dal tempo di riverberazione.

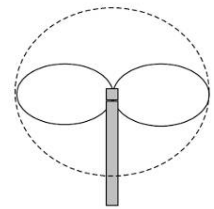
2.5 Parametri acustici per la spazializzazione

La spazialità è un effetto soggettivo causato dalla natura del campo sonoro in un ambiente chiuso. Analizzando la struttura dell'evento sonoro che lo sollecita, l'ascoltatore è in grado di esprimere un giudizio su certe "dimensioni geometriche" dello spazio che lo circonda. La sola risposta all'impulso monoaurale non è sufficiente a definire la percezione spaziale del suono. Poiché l'orecchio umano riesce ad individuare la provenienza di riflessioni discrete solo quando esse sono temporalmente lontane dall'onda diretta e nettamente più intense delle altre riflessioni, tutte le altre riflessioni incoerenti costituiscono una generica sensazione di tridimensionalità del

campo acustico, tanto maggiore quanto le riflessioni provengono dai lati e non dal soffitto. E' quindi necessario integrare i parametri acustici definiti sopra con altri parametri spaziali, in grado di quantificare la spazializzazione del campo sonoro. A partire dal 1952 con Meyer e Khul, che osservarono che il suono giunge all'ascoltatore lungo direzioni laterali, con breve ritardo rispetto al suono frontale, producendo l'espansione di una sorgente puntiforme senza degradare la percezione della sua localizzazione, numerose ricerche a seguire, hanno generato una serie di descrittori oggettivi della spazialità nell'ambito di due gruppi principali: quello delle frazioni di energia laterale e quello dei derivati dalla funzione di correlazione mutua interaurale.

Lateral Efficiency (LE)

Chiamata anche Efficienza laterale, definita da Jordan nel 1981 come segue:



$$(2.5.1) \quad LE = \frac{\int_{25ms}^{80ms} h_{\infty}^2(\tau) \cos^2 \vartheta d\tau}{\int_0^{80ms} h_o^2(\tau) d\tau}$$

dove $h_{\infty}(\tau)$ rappresenta la risposta all'impulso misurata con un microfono a caratteristica di sensibilità angolare di tipo dipolare, chiamato a figura di otto, orientato a sensibilità nulla verso la sorgente, e $h_o(\tau)$ è la risposta all'impulso rilevata nella stessa posizione però con un microfono omnidirezionale. La misura di questo parametro serve per stimare le riflessioni laterali in relazione alle riflessioni che provengono da qualunque direzione.

Lateral fraction (LF)

Barron e Marshall definirono il grado d'impressione spaziale come una funzione lineare crescente della frazione della prima energia, LF o Frazione Laterale, definita in questo modo:

$$(2.5.2) \quad LF = \frac{\int_{5ms}^{80ms} h_{\infty}^2(\tau) \cos^2 \vartheta d\tau}{\int_0^{80ms} h_o^2(\tau) d\tau}$$

Questo parametro esprime il rapporto fra l'energia sonora associata a ciascuna riflessione che giunge all'ascoltatore nell'intervallo di tempo da 5 a 80 ms (pesata secondo il coseno dell'angolo θ) e l'energia totale (comprendente anche l'energia sonora dell'onda diretta) che giunge all'ascoltatore nei primi 80 ms.

Inter- Aural Cross Correlation (IACC)

Coerenza mutua interaurale. Proposta dal gruppo di Gottingen, ossia da Gottlob, nel 1973, è un indice della similarità dei segnali captati dalle due orecchie di un ascoltatore. Definita matematicamente la Funzione di correlazione mutua con l'espressione normalizzata:

$$(2.5.3) \quad IACF_{t_1, t_2}(\tau) = \frac{\int_{t_1}^{t_2} h_L(t) \cdot h_R(t + \tau) dt}{\left(\int_{t_1}^{t_2} h_L^2(t) dt \cdot \int_{t_1}^{t_2} h_R^2(t + \tau) dt \right)^{1/2}}$$

La funzione di correlazione mutua interaurale rappresenta il grado di somiglianza dei segnali sonori raccolti dall'orecchio sinistro, $h_L(t)$ e destro, $h_R(t)$: misura il legame di linearità tra i due segnali al variare del ritardo (τ) in un intervallo di tempo corrispondente a quello impiegato dalle testa umana. Spesso è utilizzato il parametro alternativo (1-IACC), misura delle dissomiglianza interaurale, che è correlato in senso crescente con la spazialità.

La norma ISO 3382 definisce IACC come il valore massimo assunto nell'intervallo ± 1 ms dalla funzione normalizzata di correlazione mutua:

$$(2.5.4) \quad IACC_{t_1, t_2} = \max |IACF_{t_1, t_2}(\tau)| \quad \text{per} \quad -1 \text{ ms} < \tau < 1 \text{ ms}$$

Il calcolo della IACC richiede di ricostruire per ogni punto di ricezione le due risposte all'impulso $h_L(t)$ e $h_R(t)$, cioè di eseguire una misurazione o simulazione binaurale; è necessario quindi acquisire non solo l'intensità e il tempo di ritardo, ma anche la direzione di provenienza di ogni riflessione.

CAPITOLO 3

MISURA DELLA QUALITÀ ACUSTICA

3.1 Modalità di esecuzione delle misure

Negli ultimi anni l'acustica dei luoghi di culto sta acquisendo sempre maggiore rilevanza all'interno della comunità scientifica: numerosi sono, infatti, i ricercatori, che in diverse aree geografiche [1-7] si sono occupati di caratterizzare acusticamente questa particolare tipologia di edifici. Per rendere possibile il confronto tra i diversi valori sperimentali è necessario disporre di un protocollo di misura comune a tutti gli studiosi. Questo aspetto è stato già affrontato per i teatri d'opera storici [8], ma mancano prescrizioni specifiche per gli edifici di culto. Tenendo presente l'elevata variabilità tipologica e, spesso, l'estrema complessità formale che i luoghi di culto presentano, è stato proposto un protocollo di misura che, seguendo le prescrizioni della ISO 3382 [9] e di un lavoro simile applicato ai teatri [8], si propone di fornire in funzione dello scopo dell'analisi sperimentale da condurre indicazioni utili a stabilire posizioni e numero delle sorgenti e dei ricevitori e a definire il tipo della strumentazione da impiegare nella misura [17]. Pur conducendo la ricerca sulla basilica di San Vitale per fini diversi da quello del protocollo [23], quindi discostandosi in parte da tale protocollo, per quanto riguarda il numero di ricevitori, si riporta di seguito, per confronto alla metodologia proposta, le prescrizioni contenute e le modalità di esecuzione delle misure effettuate in San Vitale .

3.1.1 Protocollo di misura per la caratterizzazione acustica delle chiese - Posizioni di misura

In conformità con quanto stabilito dalla norma ISO 3382 [9] i ricevitori devono essere sempre posizionati ad una altezza di 1.2 m dal pavimento, ad una distanza non inferiore a 1/4 (circa 1 m) da qualsiasi superficie riflettente e ad una distanza reciproca non inferiore a 1/2 (circa 2 m). Il numero minimo di ricevitori disposti nell'area di ascolto principale deve essere non inferiore a 6. Tale area può essere convenientemente assunta come la combinazione della più ampia zona coperta da banchi e sedute con l'area che con maggiore probabilità potrebbe essere occupata da persone in piedi. Tenendo conto dell'esame dei risultati sperimentali di precedenti campagne di misura [15] è possibile definire alcune regole di base per la caratterizzazione della griglia dei ricevitori:

- se la chiesa è simmetrica è possibile disporre i ricevitori in una sola metà della chiesa, avendo cura di impiegare non meno di tre ricevitori "di controllo" disposti nella rimanente parte. Ove più del 30% dei parametri acustici (valori medi multibanda definiti dalla ISO 3382) mostrasse differenze superiori alla JND in entrambi i punti quando la sorgente è in A, è raccomandata la disposizione di punti di misura su entrambe le metà della chiesa; [23]
- la distanza massima fra ricevitori deve essere pari ad 1/6 della lunghezza del volume principale destinato ai fedeli, approssimabile con la distanza ingresso-altare (figura 3.1.1). Ciascun ricevitore è in grado di coprire una superficie circolare di raggio R pari ad 1/11 della predetta distanza; [23]
- in ambienti caratterizzati da una larghezza significativa (>15 m) si deve prevedere l'impiego di ricevitori disposti entro 5m dalle pareti riflettenti per tenere conto della variabilità spaziale dei parametri LF e IACC.

Tenendo conto delle regole sopradette la forma della griglia entro cui posizionare i ricevitori, non necessariamente ortogonale, deve essere adattata alla configurazione planimetrica del luogo, fornendo la migliore copertura possibile dell'area di ascolto principale, con l'aggiunta, raccomandabile, dell'impiego di almeno un punto di misura in ogni "volume secondario" facente parte o meno dell'aula principale. Si intende, per "volume secondario", una parte dello spazio interno dell'edificio di culto che, pur non costituendo un volume accoppiato con l'aula principale, è delimitata dalla presenza di una particolare struttura di copertura (volta a crociera, cupola, padiglione poligonale, ecc.), o da strutture verticali (muri, pilastri, colonnati). Sono pertanto da intendersi tali: i bracci del transetto, le cappelle laterali rilevanti per dimensione o impiego, le navate secondarie, il coro o anche singole sezioni di navata individuate da particolari strutture di copertura. Un esempio di disposizione "minima" dei ricevitori conforme con le specifiche sopradette è quella riportata in figura 3.1.2, in cui le distanze fra ricevitori

sono determinate esattamente dal criterio degli $L/6$. In presenza di cupole di grandi dimensioni, specialmente se il punto focale è vicino al pavimento (o meglio alla testa delle persone) vanno posti almeno 6 ricevitori, come illustrato in figura 3.1.2, per determinare possibili irregolarità [16] nella propagazione del campo sonoro. [23]

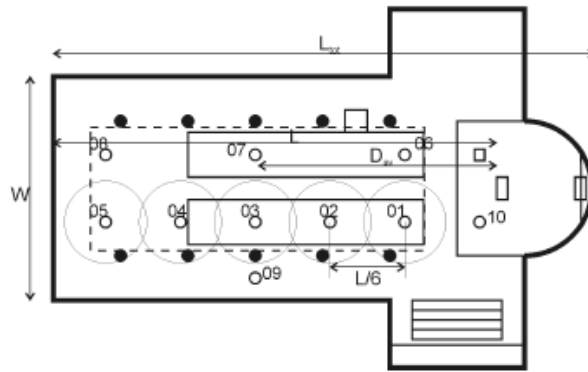


Figura 3.1.1 - Esempio di disposizione "minima" dei ricevitori

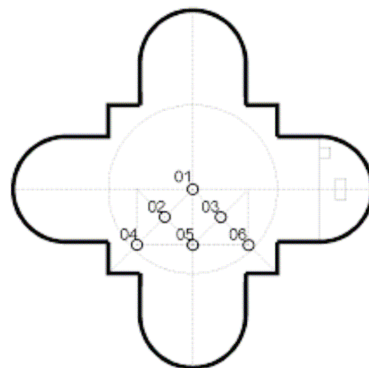


Figura 3.1.2 - Esempio di disposizione dei ricevitori sotto la cupola

In tabella 3.1.1 sono sintetizzate le combinazioni raccomandate fra diverse sorgenti e ricevitori. Ferme restando le considerazioni in merito alle distanze "massime", è possibile adattare la disposizione dei ricevitori alla particolare configurazione planimetrica ottenendo un maggiore grado di sovrapposizione fra le aree di competenza.

Sorgente	Ricevitori nel corpo centrale	Ricevitori nei corpi secondari
S1, altare	tutti + 3 ric. di controllo	Tutti
S2, altare maggiore ^a		
S3, amboni		
S4, pulpito	50% + 2 ric. di controllo	Almeno uno nello stesso volume dove è ubicata la sorgente
S5, coro		
S6, organo		
S7, assemblea	Almeno 2 ricevitori a 10 m dalla sorgente	Tutti
S8, cupola	Almeno 6 ricevitori sotto la cupola	Nessuno
S9..., etc.	Almeno 2	Almeno uno nello stesso volume dove è ubicata la sorgente

^a Nel caso in cui S2 sia utilizzata come sorgente di riferimento al posto S1, allora dovrebbe essere applicata la stessa combinazione per S1

Tabella 3.1.1: Combinazioni consigliate sorgenti-ricevitori

Nelle figure 3.1.3, 3.1.4 e 3.1.5 sono riportati tre esempi di combinazioni di sorgenti - ricevitori per tre tipologie di piante di chiese.

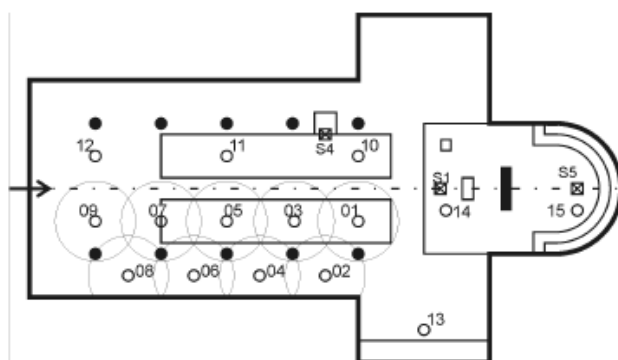


Figura 3.1.3 - Esempio di combinazioni sorgenti-ricevitori

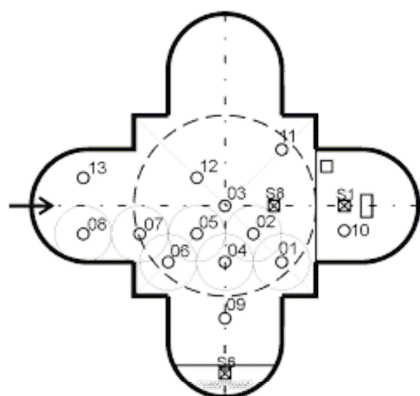


Figura 3.1.4 - Esempio di combinazioni sorgenti-ricevitori

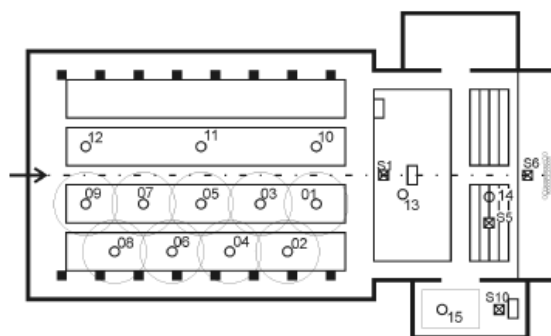


Figura 3.1.5 - Esempio di combinazioni sorgenti-ricevitori

3.1.2 Protocollo di misura per la caratterizzazione acustica delle chiese - Disposizione delle sorgenti

All'interno di una chiesa le sorgenti sonore sono di diversa natura (Figura 3.1.6): il sacerdote, che celebra sul presbiterio; il coro, che può essere collocato in una posizione fissa, posta di solito alle spalle del presbiterio, in prossimità dei fedeli (specie dopo il Concilio Vaticano II) oppure al centro della navata (in alcune chiese medioevali); l'organo, la cui posizione è fortemente variabile da caso a caso; i musicisti, che in genere si dispongono ai piedi dell'altare nel caso di concerti. Per la complessità delle sorgenti sonore, ai fini della caratterizzazione acustica delle chiese si suggerisce di adottare almeno due postazioni per la sorgente sonora, di cui una fissa (di riferimento) ed una scelta in funzione dello scopo principale della rilevazione, auspicando, ove vi sia disponibilità di tempo, l'impiego di un numero maggiore di postazioni [23].

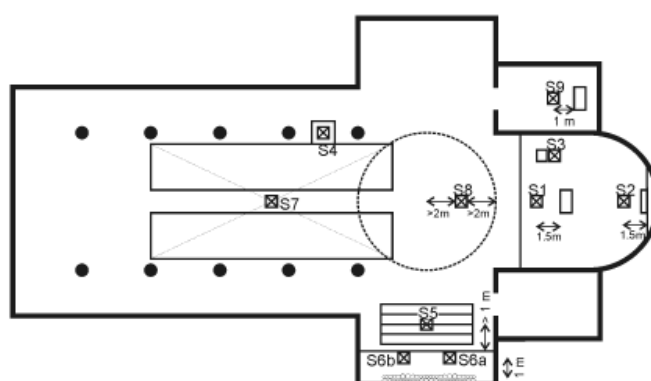


Figura 3.1.6 - Esempio di disposizione delle sorgenti

La postazione della sorgente sonora di riferimento (S1), indispensabile per il confronto fra chiese diverse, dovrà essere collocata preferibilmente di fronte all'altare ad una distanza di 1.5 m da esso e, ove si possano escludere effetti di focalizzazione da parte delle superfici circostanti, posta sull'asse mediano della chiesa. In presenza di superfici concave ravvicinate si raccomanda lo spostamento della sorgente di 1 m dall'asse mediano. In tale posizione la sorgente dovrà essere posta ad una altezza di 1.5 m dalla superficie orizzontale su cui è posto l'altare. La postazione della sorgente presso l'altare maggiore (S2) potrebbe essere impiegata quando questo è stato conservato ed è in una posizione sufficientemente distante dall'altare correntemente in uso. In chiese in cui l'altare usato per la messa è amovibile e presenta una posizione provvisoria la S2 può sostituire la S1 ed essere considerata come sorgente di riferimento a condizione che l'altare non ostacoli la propagazione del suono verso l'assemblea. La postazione della sorgente presso l'ambone (S3), dovrebbe essere individuata nella zona presbiteriale in simmetria con l'ambone principale, ovvero ad una distanza di 1.5 m dall'estremo opposto del presbiterio, in modo da evitare gli effetti di interferenza, che altrimenti si avrebbero fra la sorgente e l'ambone. In tale postazione la sorgente dovrà essere posta ad una altezza di 1.5 m dalla superficie orizzontale su cui poggia. La postazione della sorgente presso il pulpito (S4), dovrebbe essere individuata, a condizione che lo stato di conservazione e di accessibilità lo consentano, all'interno del pulpito, ad un' altezza tale che il baricentro della sorgente sonora superi di 0.50 m l'altezza della balaustra. Sul pulpito la sorgente dovrebbe essere posta il più vicino possibile alla balaustra in modo da simulare la naturale posizione dell'oratore. La sorgente dovrebbe avere una direttività tale da simulare la voce umana [10-13] con caratteristiche da specificarsi nella documentazione di misura. La postazione della sorgente presso il coro (S5), dovrebbe essere individuata preferibilmente al centro della postazione fissa del coro, ovvero al centro dei cori lignei nelle chiese in cui questi siano presenti ed utilizzati, mantenendo una distanza minima di 1.0 m dalle superfici circostanti. In tale posizione la sorgente dovrà essere posta ad una altezza di 1.5 m dalla superficie orizzontale su cui poggia. La postazione della sorgente presso l'organo (S6), dovrebbe essere individuata, per quanto possibile, in prossimità del baricentro delle canne dell'organo (ad una distanza di 1 m). Ove la larghezza delle canne risulti maggiore di 6 m è raccomandabile l'impiego di due postazioni (S6a e S6b) separate da una distanza pari alla metà della larghezza dell'organo. Qualora non sia possibile disporre la sorgente ad una altezza prossima al baricentro delle canne, si raccomanda comunque di porla ad una altezza non inferiore ai 2 m dal pavimento. La postazione della sorgente nella assemblea (S7) potrebbe essere utilizzata qualora i fedeli abbiano un ruolo attivo durante la liturgia o quando l'accoppiamento acustico delle due aree della chiesa sia debole. La sorgente dovrebbe essere

posizionata al centro dell'area più grande occupata dai fedeli ad un'altezza di 1.5 dal suolo. La postazione della sorgente(S8), che si riferisce alla cupola, dovrebbe essere utilizzata in presenza di grandi cupole quando la posizione della sorgente di riferimento (S1) è esterna all'area coperta dalla cupola. La sorgente (S8) dovrebbe essere posizionata preferibilmente sull'asse mediano a 2 m dal centro della cupola, a 2 m dalla proiezione geometrica della cupola sul piano orizzontale ed a 1.5 m dal pavimento. Ulteriori postazioni accessorie (S9, etc.), da intendersi solo come integrative rispetto alle precedenti, potranno essere prese in considerazione qualora alcune parti dello spazio confinato (transetto, navate laterali, cappelle laterali) abbiano profondità o configurazione tali da far ipotizzare un comportamento da "volumi accoppiati" [14], oppure in caso di utilizzazione indipendente di tali spazi secondari. In questi casi le misure saranno eseguite collocando la sorgente in posizione baricentrica al loro interno oppure, nel caso di utilizzazione indipendente, posizionando la sorgente in prossimità delle sorgenti reali ad una distanza di 1 m dalle superfici riflettenti ed ad 1.5 m sul pavimento [23].

3.1.3 Protocollo di misura per la caratterizzazione acustica delle chiese - Apparato di misura.

Il protocollo suggerisce quattro diversi "livelli" di complessità in funzione della finalità della misura, della dotazione di strumenti e del tempo disponibile:

Configurazione base

È finalizzato ad una rapida caratterizzazione di massima del luogo, prioritariamente attraverso il tempo di riverberazione, ed eventualmente (mediante successive elaborazioni) con (alcuni) parametri monoaurali.

- Sorgente sonora. Sorgente elettroacustica o anche una sorgente impulsiva (di segnale impulsivo), intesa come pistola o palloncini, purché conforme con le specifiche di omnidirezionalità richieste dalla norma [9].
- Il campo di frequenze entro cui eseguire la misura (nel caso di utilizzazione di rumore rosa) è quello previsto dalla norma ISO 3382, ovvero da 125 a 4000 Hz in bande di ottava o da 100 a 5000 Hz in bande di terzi di ottava. In casi eccezionali, l'organo, se presente, può essere utilizzato come sorgente aggiuntiva.
- Segnale di test da usare con sorgenti elettroacustiche: impulsi, rumore stazionario interrotto, MLS, sweep, in accordo con la ISO 18322 [17, 18].
- Microfono: omnidirezionale ad incidenza casuale.

-
- Campo di frequenze: da 125 Hz a 4000 Hz in bande di ottava o da 100 Hz a 5000 Hz in terzi di ottava. Un campionamento del segnale di almeno 44.1 kHz a 16 bit è consigliato.
 - Parametri misurabili: Tempi di riverberazione, EDT e, se vengono utilizzati impulsi ed analizzata la risposta all'impulso, parametri mono-aurali. Per calcolare G il livello di potenza sonora della sorgente deve essere misurato in una camera anecoica o riverberante, in accordo con [9]. STI deve essere calcolato considerando anche la misura del rumore di fondo. La catena di misura può anche essere costituita da un microfono omnidirezionale collegato ad un registratore digitale (per effettuare successivamente l'analisi della risposta all'impulso ed il calcolo degli indici di valutazione su un normale computer).

Configurazione media

- Sorgente sonora: omnidirezionale elettroacustica equalizzata. Il campo di frequenze entro cui eseguire le misure: lo stesso della configurazione base.
- Segnale di test da usare con sorgenti elettroacustiche: MLS o sweep, in accordo con la ISO 18322 [17, 18].
- Microfono: omnidirezionale ad incidenza casuale e microfono a figura8.
- Campo di frequenze: lo stesso della configurazione base.
- Parametri misurabili: gli stessi della configurazione base con l'aggiunta di LF e LG.

Configurazione avanzata

È finalizzato alla misura di tutti i parametri monoaurali e binaurali.

- Sorgente sonora: omnidirezionale elettroacustica equalizzata, in accordo con la ISO 3382, con subwoofer addizionale per coprire le frequenze più basse.
- Segnale di test da usare con sorgenti elettroacustiche: impulsi, rumore stazionario interrotto, MLS, sweep, in accordo con la ISO 18322 [17, 18].
- Microfono: omnidirezionale ad incidenza casuale, a figura8 (o B-format), testa del manichino con microfoni binaurali. Altri tipi di microfoni sperimentali (anemometrici, array etc.) possono essere utilizzati purché descritti nella documentazione di misura.
- Campo di frequenze: da 63 Hz a 8000 Hz in bande di ottava o da 50 Hz a 10000 Hz in terzi di ottava. Un campionamento del segnale di almeno 44.1 kHz a 16 bit è consigliato.
- Parametri misurabili: gli stessi della configurazione media con l'aggiunta della IACC.

Configurazione per auralizzazione

È finalizzato ad analisi comprendenti la riproduzione, mediante tecniche di convoluzione, dell'effetto che opportuni segnali sonori (registrati originariamente in condizioni anecoiche), possono avere nell'ambiente in cui è avvenuta la misura.

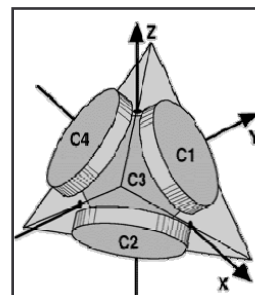
- Sorgente sonora: con le stesse caratteristiche della configurazione avanzata. In ambienti con volumetria superiore ai 500000 m³ è raccomandato l'impiego di una sorgente con un livello di potenza di almeno 100 dB.
- Segnale di test da usare con sorgenti elettroacustiche: Sweep equalizzato ad ampiezza costante [17, 18] è consigliato. Tuttavia è accettato qualsiasi segnale tale da ottenere un rapporto segnale-rumore maggiore di 45 dB su tutte le bande di frequenza esaminate, richieste per la convoluzione delle risposte all'impulso acquisite.
- Microfono: B-format, testa del manichino con microfoni binaurali. Microfoni ambisonic ed ogni microfono sperimentale in cui sia specificata la caratteristica di acquisizione B-format.
- Campo di frequenze: da 63 Hz a 16000 Hz in bande di ottava o da 50 Hz a 20000 Hz in terzi di ottava. Un campionamento del segnale di almeno 48 kHz a 24 bit è consigliato.
- Parametri misurabili: gli stessi della configurazione avanzata. Questo livello in più permette una realistica riproduzione in laboratorio delle condizione di ascolto nelle chiese e consente l'auralizzazione: a) nel caso di utilizzazione del microfono Soundfield per l'ascolto tramite array 2D o 3D di altoparlanti, b) nel caso di registrazione binaurale per l'ascolto in cuffia o tramite al più "stereo dipolo".

3.1.4 Strumentazione utilizzata in San Vitale - Posizioni di misura

I microfoni utilizzati nelle misurazioni acustiche nella Basilica sono stati posizionati in 10 differenti punti, dove si collocavano i fedeli, rispettivamente 7 al piano terra e 2 nel matroneo, in cui si disponevano donne e bambini (vedi Figura 3.1.8):

- una testa artificiale (Neumann): è un'esatta replica della testa umana equipaggiata con due microfoni posti all'interno delle orecchie; creata per differenziare i suoni tra l'orecchio destro e quello sinistro, permette di ascoltare una registrazione eseguita con la testa artificiale tramite cuffie stereo, dove l'ascoltatore riceve un'impressione quasi completamente identica a quella che avrebbe avuto tenendo la sua testa ferma nell'identica posizione della "testa artificiale" durante la registrazione stessa, ovvero la sensazione di essere fisicamente presente alla performance originaria (Figura 3.1.7).

- un microfono Soundfield MKV: costituisce il primo prototipo di microfono tridimensionale utilizzato in acustica architettonica. È composto da quattro capsule sub-cardioidi (o cardioidi) disposte come se fossero i lati di un tetraedro regolare. L'uscita a 4 canali di questo microfono è in A-format e può essere modificata agendo su azimuth,



elevation e dominance, permettono complete rotazioni virtuali del microfono orizzontale (assi X e Y), nel piano meridiano (assi X e W), e nel fronte sonoro (distorsione frontale o posteriore). In sostanza risulta possibile orientare virtualmente il microfono nello spazio, analizzare le componenti del campo acustico provenienti da direzioni particolari, od effettuare operazioni tra varie componenti laterali (ad esempio calcolare la frazione laterale, LF) (Figura 3.1.7).

Le misure sono state condotte attraverso il segnale, di tipo logaritmico, sine sweep, in un intervallo compreso tra i 40 Hz ed i 20 kHz. I segnali microfonici sono stati convertiti in digitali attraverso una scheda audio (Layla), con una risoluzione di 20bits e frequenza di campionamento di 96 kHz, e successivamente elaborati in laboratorio.



Figura 3.1.7: Foto della “Testa artificiale” e del “Soundfield” all’interno di San Vitale.

3.1.5 Strumentazione utilizzata in San Vitale - Disposizione delle sorgenti

SORGENTE SONORA: La norma ISO3382 prevede che la sorgente debba essere di tipo omnidirezionale e fissa alcuni limiti di deviazione massima, come rappresentato in Tabella 3.1.2, che debbono essere misurate in campo libero utilizzando un rumore rosa. Tuttavia si limita ad affermare che la risposta in frequenza debba essere «adeguata» ed emettere un «segnale sufficiente» nel campo di frequenza compresa tra 125 Hz e 4 kHz.

Frequenza, Hz	125	250	500	1k	2k	4k
Deviazione massima, dB	±1	±1	±1	±3	±5	±6

Tabella 3.1.2: Deviazioni massime consentite per un altoparlante omnidirezionale secondo ISO3382

In particolare, in San Vitale, è stata utilizzato un altoparlante omnidirezionale equalizzato, in accordo con la ISO 3382, con subwoofer addizionale per coprire le frequenze più basse, ponendo le sorgenti sonore in 3 punti specifici della Chiesa, S1, S2 e S3, dove si presume si collocassero i cantanti durante le liturgie: nel matroneo al piano superiore, nel coro al piano terra e nell'abside (Figura 3.1.8):

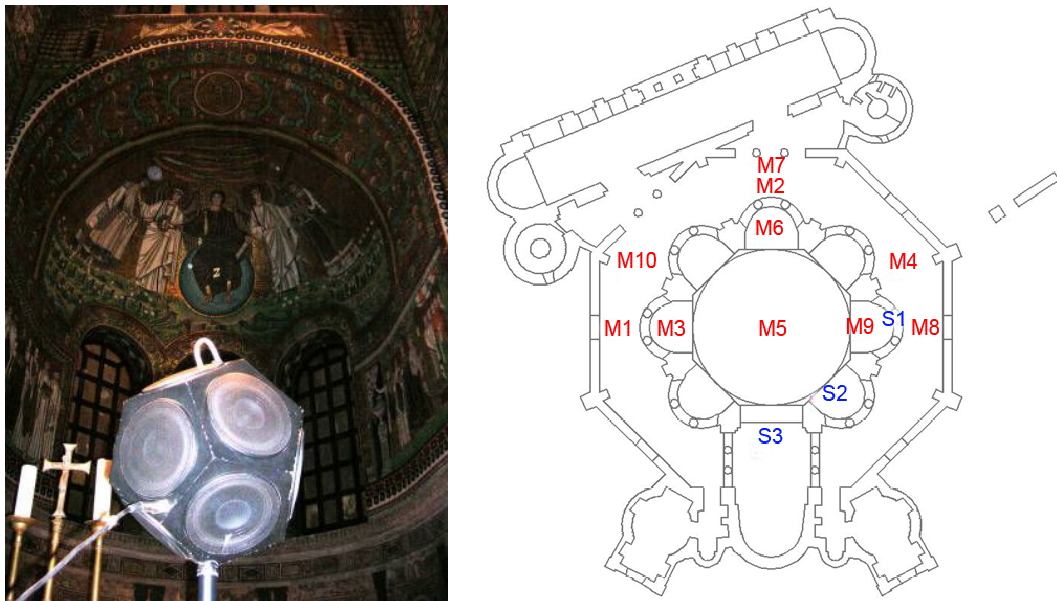


Figura 3.1.8: A sinistra - foto del dodecaedro nel punto S3 sull'altare
A destra - Posizione di sorgenti e ricevitori dei punti di misura

3.1.6 Strumentazione utilizzata in San Vitale - Apparato di misura.

Si è adottato una “configurazione per auralizzazione”, come da protocollo, al fine di riprodurre in laboratorio le condizioni di ascolto originarie della Basilica avvalendosi del processo di auralizzazione per l’ascolto in cuffia o attraverso altoparlanti ravvicinati tipo “stereo dipolo”.

3.2 Valutazione dei parametri acustici

Dopo aver effettuato le registrazioni ed elaborato la risposta all’impulso per ogni traccia registrata, Irs, sono stati calcolati i parametri acustici più significativi: C50, C80, T20, T30, LE, LF, IACC, STI. Un esempio di risposta all’impulso misurata all’interno della chiesa è riportata in Figura 3.2.1:

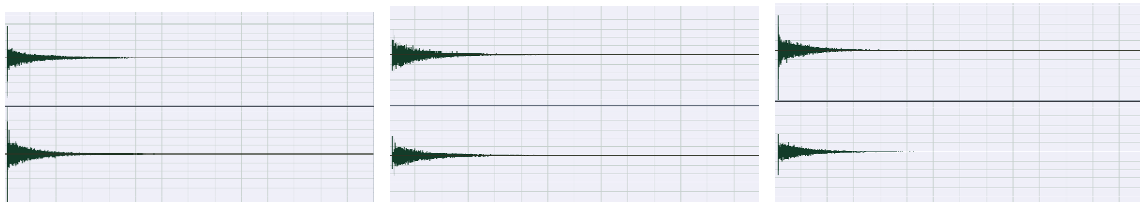


Figura 3.2.1: Esempio di Risposte all'Impulso misurate all'interno della chiesa (WY, XZ e Binaural IRs).

In tabella 3.2.1 sono riportati i principali parametri acustici ottenuti tramite il post-processing di tutte le risposte all'impulso:

Freq. [Hz]	31.5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000	A	Lin
C50 [dB]	-6.31	-8.96	-10.84	-11.12	-9.64	-10.28	-8.86	-6.05	-2.92	2.99	-7.10	-7.05
C80 [dB]	-4.45	-6.05	-8.68	-8.53	-7.50	-7.56	-6.33	-3.65	0.07	6.92	-4.71	-4.70
D50 [%]	20.04	14.17	9.07	8.82	11.82	10.21	13.64	21.45	35.96	64.82	18.36	18.67
Ts [ms]	232.46	371.80	409.25	438.61	434.60	403.21	325.71	214.56	114.77	63.20	278.20	287.95
EDT [s]	4.62	4.90	4.96	5.80	5.86	5.27	4.32	2.89	1.57	0.74	3.80	3.99
T20 [s]	5.53	5.59	5.17	5.58	5.74	5.27	4.39	2.91	1.69	0.74	4.46	4.75
T30 [s]	7.02	5.80	5.02	5.60	5.77	5.35	4.44	2.95	1.78	0.11	4.70	5.00
IACC	0.99	1.00	0.96	0.74	0.39	0.35	0.35	0.23	0.14	0.25	0.25	0.26
LE	0.54	1.12	1.21	0.84	0.82	0.89	0.70	0.68	0.50	0.25	0.66	0.65
LF	0.80	1.72	1.49	1.09	1.10	1.16	0.99	0.93	0.65	0.37	0.91	0.90
LFC	0.44	0.79	0.70	0.60	0.59	0.60	0.54	0.49	0.36	0.25	0.49	0.48

Tabella 3.2.1: Valore medio dei parametri acustici misurati in San Vitale

3.2.1 Valutazione dei parametri acustici energetici

I parametri acustici energetici sono stati ottenuti dal canale W del microfono Soundfield. Nel caso dei parametri acustici energetici, oltre alla rappresentazione in frequenza, è molto indicativa una raffigurazione in pianta (Figure 3.2.2-3.2.3), in grado di evidenziare la loro variabilità all'interno dell'ambiente. In Figura 3.2.2 viene riportata la distribuzione spaziale di T30 per ogni sorgente sonora:

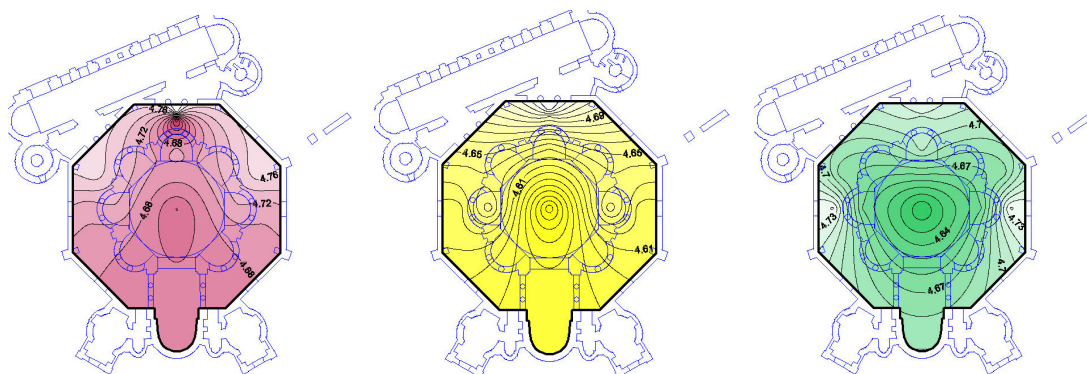


Figura 3.2.2: Distribuzione spaziale di T30 per S1-S2-S3

I valori ottimali di T30 sono riportati in Tabella 3.2.1:

Musica sinfonica	1.8 - 2.6 sec
Opera lirica	1.0 - 1.5 sec
Prosa	0.8 - 1.2 sec

Tabella 3.2.2: Distribuzione spaziale di T30 per S1-S2-S3

Confrontando i valori di T30 riportati nelle mappe acustiche, Figura 3.2.2, con la Tabella 3.2.2, emerge come la chiesa di San Vitale costituisca un tipico esempio di architettura ecclesiastica, caratterizzata da tempi di riverberazione molto lunghi, in media di 5 s.

Considerando i parametri acustici monoaurali come C50, Ts e D, le misure sottolineano una scarsa intelligibilità della chiesa: in Figura 3.2.3 ne è riportato un esempio attraverso la distribuzione spaziale di C50.

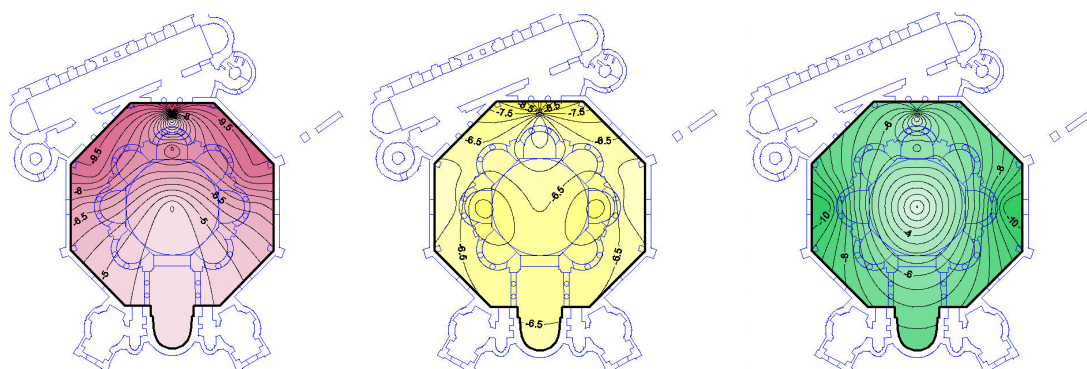


Figura 3.2.3: Distribuzione spaziale della chiarezza C50 per S1-S2-S3

I parametri monoaurali considerano la parte iniziale della risposta all'impulso, la quale risulta molto utile per la percezione della ricchezza del suono, a scapito della coda riverberante che viene ritenuta dannosa: San Vitale, mostrando le peculiari proprietà acustiche dei luoghi sacri, evidenzia una bassa chiarezza, variabile dai -6 dB ai -10 dB (Figura 3.2.3), causata da una lunga coda riverberante della basilica.

3.2.2 Valutazione dei parametri acustici per la spazializzazione

Le misurazioni monoaurali finora analizzate non consentono di quantificare il grado di avvolgimento dell'ascoltatore all'interno di un ambiente: occorre avvalersi di trasduttori microfonici in grado di misurare risposte all'impulso binaurali e *B-format*. La stessa norma ISO3382 prevede la misurazione di alcuni parametri in grado di quantificare la frazione di energia laterale percepita, e precisamente:

- Efficienza Laterale *LE*
- Cross-correlazione inter aurale, Inter-Aural Cross Correlation IACC

La misurazione dell'«efficienza laterale», richiede l'utilizzo di un microfono a «figura-di-otto»: attraverso l'utilizzo del microfono *Soundfield* è possibile ottenere una simile direttività semplicemente facendo impiego del canale Y.

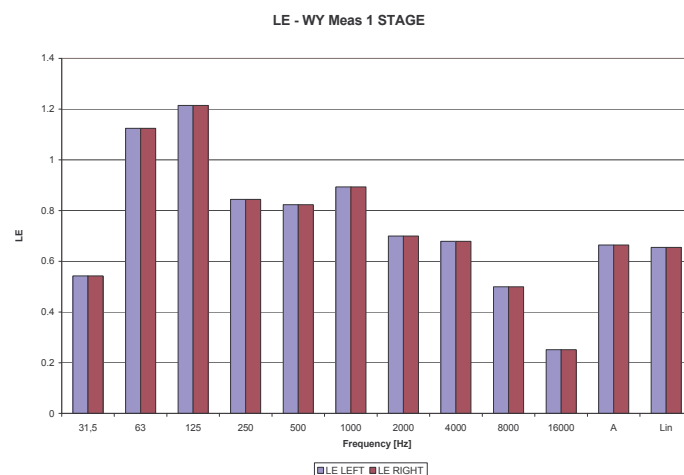


Figura 3.2.4: distribuzione in frequenza di *LE* nel punto di sorgente S1

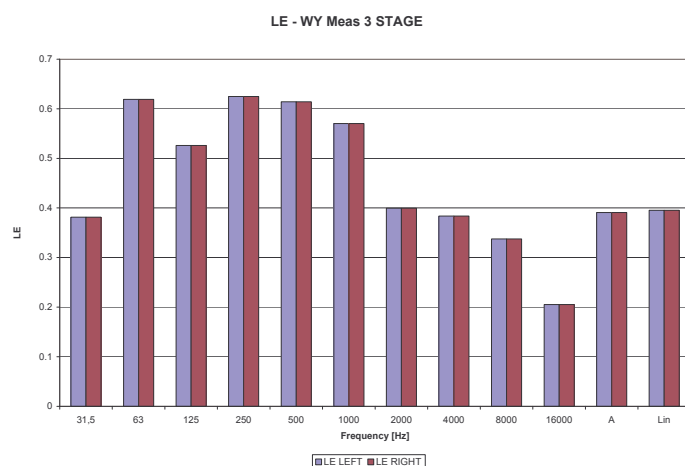


Figura 3.2.5: distribuzione in frequenza di LE nel punto di sorgente S2

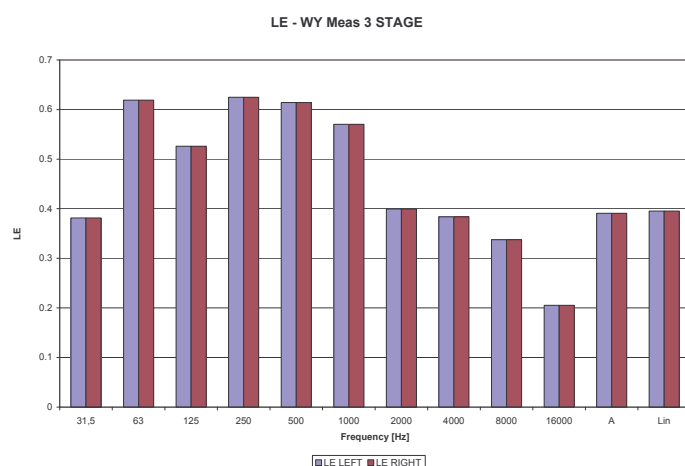


Figura 3.2.6: distribuzione in frequenza di LE nel punto di sorgente S3

La misura di questo parametro serve per quantificare le riflessioni laterali, la frazione di energia sonora utile ai fini della manifestazione della sensazione di spazialità, rispetto alle riflessioni totali che pervengono nel punto di ascolto. Jordan, facendo riferimento a risposte impulsive filtrate nel campo delle frequenze interessanti le bande di ottava centrate sui 500 Hz e 1 kHz, suggerisce come valori ottimali di *LE* superiori a 0.2 - 0.3: i valori di *LE* nelle bande di frequenza di 500 – 1000 Hz, all'interno di San Vitale, pari a 0.85 in media, risultano piuttosto superiori ai valori ottimali, evidenziando come le riflessioni laterali consentano di percepire una forte sensazione di tridimensionalità del campo acustico.

La *IACC*, invece, richiede l'utilizzo di una testa artificiale e viene calcolata rapportando le risposte all'impulso misurate nelle due orecchie secondo l'algoritmo di cross-correlazione tra

due segnali. Nelle figure 3.2.7-3.2.8-3.2.9 sono riportate l'andamento nel dominio delle frequenze del parametro IACC per ogni posizione della sorgente sonora.

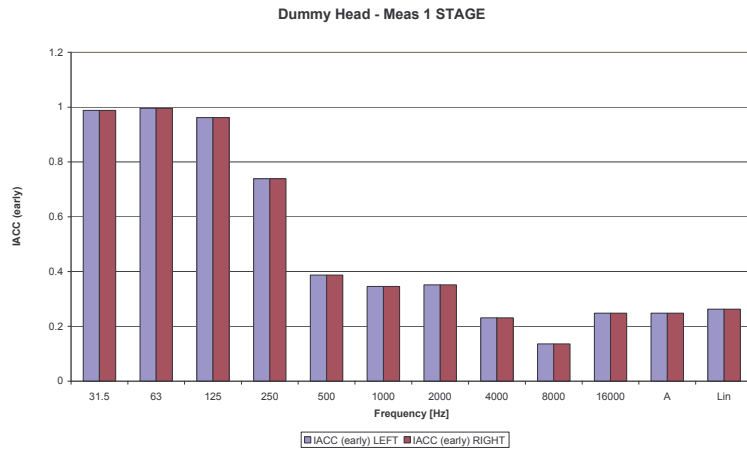


Figura 3.2.7: distribuzione in frequenza di IACC nel punto di sorgente S1

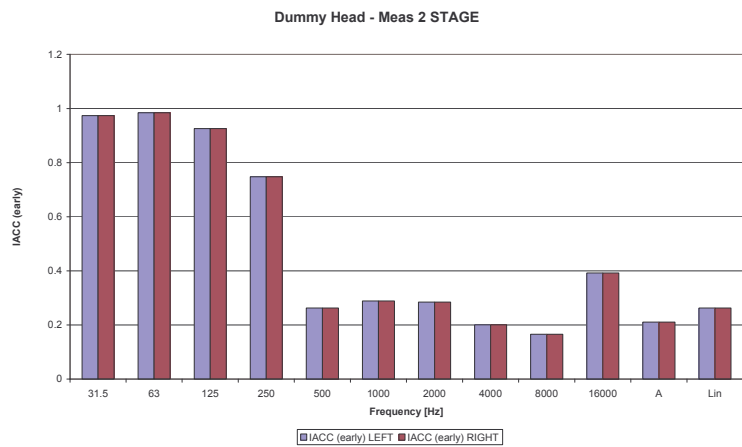


Figura 3.2.8: distribuzione in frequenza di IACC nel punto di sorgente S2

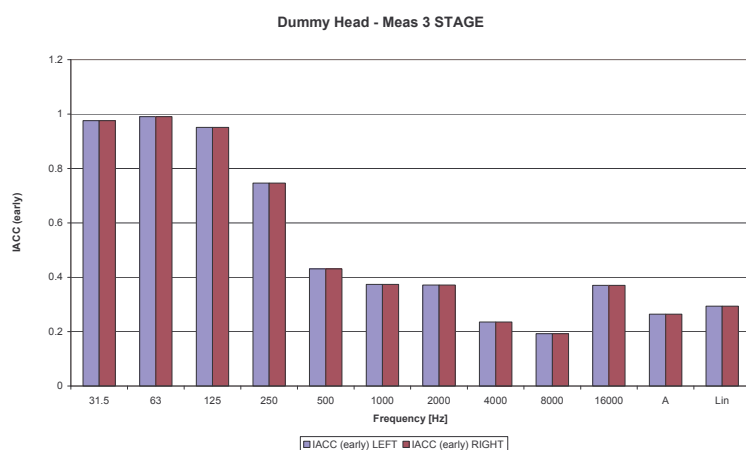


Figura 3.2.9: distribuzione in frequenza di IACC nel punto di sorgente S3

I valori della *IACC* che assicurano una buona sensazione di immersione nel campo acustico si mantengono attorno a 0.4 - 0.5: valori superiori, comunque inferiori o uguali a 1.0, comportano un ascolto privo di spazialità, mentre i valori inferiori, ma maggiori di 0.0, testimoniano un'eccessiva direttività laterale del messaggio sonoro, ugualmente poco gradevole. Le Figure 3.2.7-3.2.8-3.2.9 mostrano che alle basse frequenze, San Vitale, risulta quasi privo di spazialità, alle medie frequenze si raggiungono valori vicino a quelli ottimali, per passare, infine alle alte frequenze dove subentra un'eccessiva direttività laterale del messaggio sonoro.

3.3 Modelli di previsione teorica

3.3.1 Introduzione

La tecnica dei modelli è un supporto spesso utilizzato in molti settori applicativi della fisica tra i quali l'acustica: un modello permette, infatti, di rappresentare in maniera semplificata fenomeni e situazioni fisiche, che altrimenti risultano complessi e di difficile risoluzione. I modelli matematici (contrapposti ai modelli fisici) si basano sulla rappresentazione dei fenomeni mediante equazioni, anziché mediante l'utilizzo della similitudine fisico-geometrica. Nel caso dello studio acustico di grandi ambienti chiusi, la propagazione sonora considerata dalla modellistica numerica, avviene per raggi rettilinei. A seconda di come viene schematizzato il fenomeno, vengono definiti diversi tipi di modello matematico, basati sulle leggi dell'acustica geometrica e utilizzabili per lo studio dell'acustica di grandi ambienti:

- il metodo delle sorgenti immagini;

- il Ray Tracing;
- il Pyramid Tracing.

3.3.2 Metodo delle sorgenti immagine

Il primo ad essere utilizzato fu il metodo delle sorgenti immagine, nome che deriva dal fatto di ipotizzare riflessioni speculari sulle pareti di una stanza da analizzare (Figura 3.3.1).

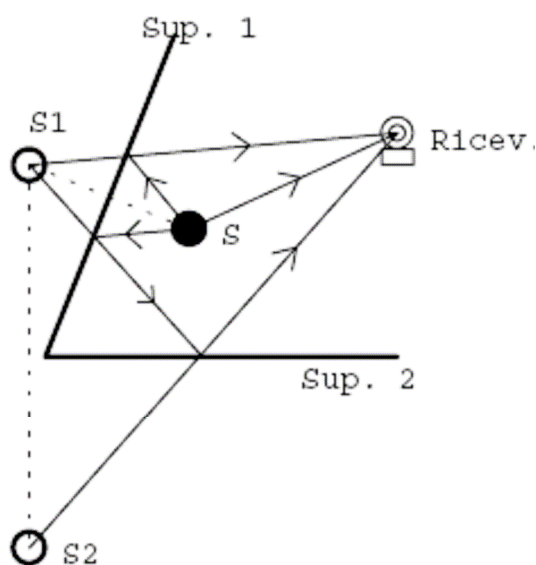


Figura 3.3.1: Sorgenti immagine

Esso è particolarmente efficace in ambienti parallelepipedi, ma può essere usato anche in ambienti a geometria diversa: data una sorgente la si ribalta simmetricamente rispetto alle superfici, quindi si possono creare sorgenti del primo ordine, che specularizzate, a loro volta, producono sorgenti del secondo ordine e così via. Un determinato ricevitore riceve il suono dalla sorgente reale e il suono riflesso delle altre sorgenti immagine. L'estrema semplicità di questo metodo negli ambienti aventi una geometria parallelepipeda, come ad esempio nel campo industriale, fa sì che questa tecnica funzioni egregiamente e consenta di prevedere la risposta all'impulso fino ad ordini di riflessione molto elevati. Sussistono invece dei problemi quando dobbiamo considerare sorgenti immagine d'ordine elevato in presenza di geometrie complicate; infatti, questo metodo, per geometrie generiche, richiede che, per ogni sorgente immagine e per ogni ricevitore considerato, sia fatto un controllo di visibilità tra la sorgente e il ricevitore e questo rende il calcolo molto lento. Inoltre, poiché il numero delle sorgenti immagine cresce esponenzialmente con l'ordine delle stesse, nel caso di geometrie complicate

si può arrivare al massimo alla determinazione dei raggi del quinto ordine e quindi si trascura, nella previsione, la restante coda sonora.

3.3.3 Ray Tracing

Il metodo Ray Tracing, nasce e si sviluppa inizialmente per l'acustica attorno agli anni '70 [30], per poi essere impiegato anche nelle simulazioni ottiche. A partire dalla sorgente sonora, considerata puntiforme, si lanciano una serie di "raggi sonori" in direzioni scelte a caso, con una certa energia iniziale dipendente dalla direttività della sorgente nella particolare direzione considerata; essi rimbalzano sulle superfici perdendo parte della loro energia. Una parte dei raggi giungeranno a colpire un ricevitore non puntiforme: è necessario avere un ricevitore di dimensione finita, perché la probabilità che un raggio colpisca un ricevitore puntiforme è quasi nulla, per questo solitamente si usa un ricevitore sferico (Figura 3.3.2) Tale procedimento è significativo solo se dalla sorgente si emettono molti raggi (decine di migliaia o anche milioni).

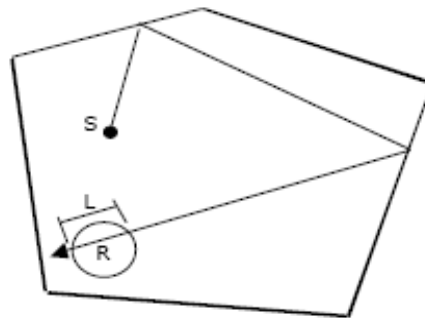


Figura 3.3.2: Schema di generazione dei raggi e d'impatto su un ricevitore sferico

Quando viene colpito da un raggio, un ricevitore può avere incidenza maggiore o minore a seconda di diversi fattori: lo spazio percorso, il numero di riflessioni subite, il modo in cui colpisce il ricevitore. Il parametro che interessa, avendo un ricevitore volumetrico, è la densità d'energia W' , che arriva all'interno del volume:

$$(3.3.1) \quad W' = \frac{P_{wr} \cdot Q_{\theta} \cdot L \cdot \left[\prod_i (1 - \alpha_i) \right]}{N_{raggi} \cdot c \cdot V_{sfera}} \cdot e^{-\gamma x}$$

dove P_{wr} è la potenza sonora emessa dalla sorgente, Q_{θ} rappresenta la direttività nella particolare direzione in cui il raggio iniziale era stato generato, N_{raggi} è il numero di raggi, c è la

velocità del suono, V_{sfera} è il volume della sfera, L la lunghezza del segmento con cui il raggio ha intersecato la sfera e $e^{-\gamma x}$ è un coefficiente di riduzione con la distanza che rappresenta l'assorbimento da parte dell'aria. Questo metodo è molto brillante nelle previsioni.

3.3.4 Tracciatori di piramidi

All'interno del metodo di tracciamento dei fasci divergenti [36] si distinguono due diverse metodologie: il Cone-Tracing (subito abbandonato a favore di una sua diversa implementazione) ed il Pyramid-Tracing. Il metodo Cone-Tracing utilizza raggi a forma di cono, cones-tracing, secondo uno schema ibrido [24] che opera inizialmente in maniera deterministica, ma dopo alcune riflessioni utilizza un metodo statistico per portare a termine la simulazione. Il Cone-Tracing considera il ricevitore come puntiforme, e quando si trova all'interno del cono, il fascio gli trasmette una certa intensità di energia sonora, calcolata con la relazione (3.3.2) come per le sorgenti immagine:

$$(3.3.2) \quad L_p = L_w + 10 \cdot \left(\frac{Q_s \cdot \prod_i (1 - \alpha_i)}{4 \cdot \pi \cdot r^2} \right)$$

Il problema maggiore che si pone con questo metodo è che i coni non coprono completamente una superficie sferica: se sono adiacenti restano delle parti non coperte, se sono sovrapposti, vi sono parti coperte per due volte (Figura 3.3.3).

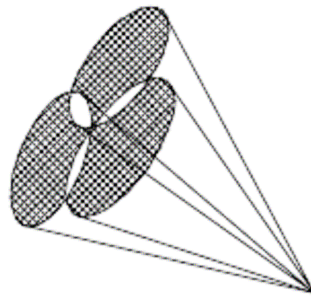


Figura 3.3.3: Risultato della sovrapposizione di coni

La relazione (3.3.3) esprime il numero minimo di raggi necessari per un tracciatore di coni (metodo ibrido) secondo Maercke e Martin [27]:

$$(3.3.3) \quad N_{\min} = 50 \cdot \left(\frac{l_{\max}}{l_{\text{cm}}} \right)^2$$

Se si ipotizza una risposta all'impulso lunga 1 s ed un libero cammino medio l_{cm} di 15 m, si ottiene $N_{\min} = 25689$. Il metodo ibrido è dunque decisamente più veloce, rispetto ai precedenti, ma richiede comunque calcoli di durata non trascurabile, la cui precisione dipende considerevolmente dal numero di raggi lanciati.

Un altro limite, di questo metodo, è che non è in grado di prevedere correttamente l'intera coda riverberante, poichè al crescere delle dimensioni della base di ciascun fascio, rispetto a quello delle superfici di confine, si ha la perdita di un numero progressivamente crescente di sorgenti immagine, giacchè l'intero cono viene redirezionato seguendo la sorte del raggio centrale, come mostrato dalla Figura 3.3.4:

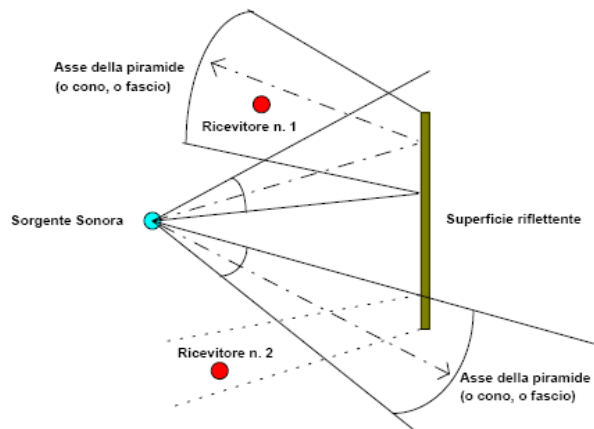


Figura 3.3.4: Perdita delle sorgenti immagini al crescere delle dimensioni della base di ciascun fascio

Il Cone Tracing è stato pertanto abbandonato, ed al suo posto si preferisce impiegare dei fasci di apertura non ben delimitata, in cui l'energia sonora viene fatta decrescere con legge gaussiana allontanandosi dall'asse del fascio: questo problema non sussiste con il Pyramid Tracing, siccome piramidi adiacenti coprono perfettamente la superficie sferica.

Il Pyramid Tracing [25] opera seguendo lo sviluppo della piramide per l'intera durata della sua propagazione, sino a che il tempo di corsa risulta eccedente il limite prefissato per la risposta all'impulso da calcolare. La suddivisione della superficie in triangoli (Figura 3.3.5), avviene utilizzando una versione modificata dell'algoritmo di Tenebaum [29], procedendo alla suddivisione in 8 ottanti della sfera: in questo modo il numero delle piramidi generate può

essere di un numero che sia una potenza di 2 ($8 \cdot 2^N$), inoltre tutte queste hanno la stessa area di base, generando così una sorgente sonora isotropa.

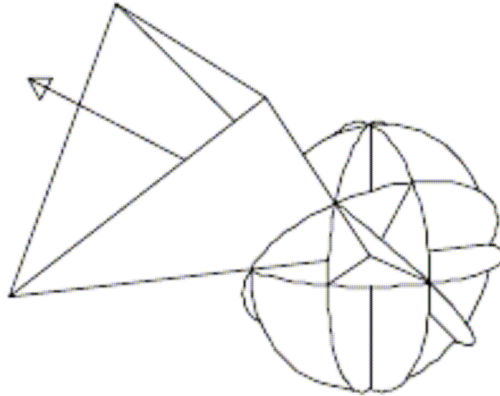


Figura 3.3.5:

Emissione in fasci piramidali divergenti da una sorgente omnidirezionale utilizzando l'algoritmo di Tenenbaum et al.

I vantaggi di questa tecnica sono il ricevitore puntiforme e il numero contenuto di fasci da emettere (si fanno simulazioni discrete già con 2048 piramidi) il tutto a vantaggio della velocità di elaborazione dei dati da parte di un calcolatore. Chiaramente il tempo di calcolo cresce con diretta proporzionalità al numero di piramidi tracciate. Il tracciamento del raggio centrale di ciascuna piramide avviene seguendo le usuali ipotesi dell'acustica geometrica: riflessione speculare all'impatto con una superficie, ubbidendo alla legge di Snell. Dopo ogni riflessione si provvede a costruire la posizione della sorgente immagine rispetto alla superficie impattata, e si prosegue il tracciamento del raggio a partire da tale nuova sorgente virtuale. La verifica dell'impatto sui ricevitori avviene quando uno di essi si trova all'interno di una piramide che si sta tracciando. Questo fatto viene verificato tracciando all'indietro sulla superficie sferica della sorgente immagine la congiungente sorgente-ricevitore, e verificando che tale punto sia interno al triangolo costituito dai tre spigoli della piramide. Al crescere del percorso, la "base" della piramide si allarga progressivamente, e finisce per diventare più grande dell'intero ambiente. In queste condizioni tutti i ricevitori si trovano sempre entro la piramide, e dunque vengono sempre colpiti dai raggi. Questo fatto è decisivo, perché in tal modo la coda riverberante mantiene un sufficiente dettaglio. Pertanto non viene fatta alcuna ipotesi di uniformità statistica del campo sonoro, che può dar luogo a tempi di riverbero variabili da punto a punto, a decadimenti con doppia pendenza, ad echi molto ritardati: il tracciamento delle piramidi viene proseguito fino ad ordini elevatissimi (anche se è possibile limitarlo ad un ordine prefissato), in modo da ricostruire l'intera coda sonora, in ciascun punto ricevitore.

Come in tutti i tracciatori di fasci divergenti, comunque, la coda sonora tende ad essere sottostimata in campo riverberante, poichè al crescere delle dimensioni della base di ciascun fascio aumenta la probabilità di "perdere" una sorgente immagine. E' pertanto necessario effettuare una correzione della coda sonora. La correzione della coda sonora è di tipo moltiplicativo. Essa si basa sul fatto che il numero di impatti su un ricevitore nell'unità di tempo $n(t)$, ottenuti da un tracciatore di fasci divergenti, può essere descritto matematicamente, secondo Maercke/Martin [27], dalla relazione:

$$(3.3.4) \quad n(t) = \frac{4 \cdot \pi \cdot c_0^3 \cdot t^2}{V} \cdot \left(1 - e^{-\frac{l_{cm}^2 \cdot N}{4 \cdot c_0^2 \cdot \beta \cdot t^2}} \right) = \frac{4 \cdot \pi \cdot c_0^3 \cdot t^2}{V} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t_c^2}{t^2}} \right)$$

L'andamento teorico secondo la teoria delle sorgenti immagine è invece costituito semplicemente dal primo fattore della relazione suddetta, senza il termine fra parentesi, e pertanto cresce con il quadrato del tempo. Al tendere all'infinito del tempo t , la relazione fornisce poi un valore teoricamente costante del numero di impatti sul ricevitore nell'unità di tempo:

$$(3.3.5) \quad n(\infty) = \frac{N \cdot c_0 \cdot l_{cm}^2}{V} \cdot \frac{\pi}{4 \cdot \beta}$$

Nelle relazioni precedenti compaiono due parametri dipendenti dalla natura del campo sonoro: il Libero Cammino Medio l_{cm} , ed il coefficiente adimensionale β , che dipende dalla natura più o meno sabiniana" del campo sonoro (in campo perfettamente diffuso risulta $\beta = 0.1$).

Il Tempo Critico t_c , che compare nell'equazione 3.3.4, rappresenta il punto di ideale separazione fra la prima parte della coda sonora, in cui vengono rilevate correttamente tutte le sorgenti immagine, e la parte tardiva in cui il numero di arrivi di energia nell'unità di tempo è costante: esso è infatti definito come il punto di intersezione fra la parabola, corrispondente all'andamento teorico, e la retta orizzontale che rappresenta il numero costante di intercettazioni rappresentato dalla relazione (3.3.5). La figura 3.3.6, illustra una situazione reale, a confronto con le stime teoriche di cui sopra:

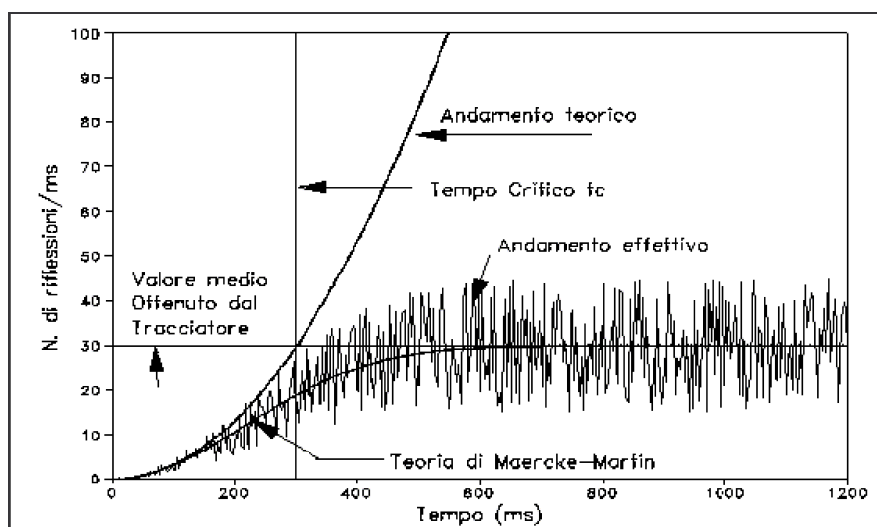


Figura 3.3.6: Andamento del numero di captazioni per unità di tempo

La correzione della coda riverberante viene dunque eseguita semplicemente dividendo l'energia sonora per il termine fra parentesi della relazione (3.3.4), che è sempre minore di 1 e va diminuendo progressivamente al crescere di t .

In pratica la stima di t_c è vincolata alla scelta di un opportuno valore del coefficiente β , scelta che può essere fatta cercando il valore che minimizza la differenza fra la coda sonora esatta, ottenuta con un numero di raggi N molto elevato, e la coda sonora stimata lanciando un ridotto numero di raggi. Una volta effettuata tale “taratura” del valore di β , è possibile prevedere correttamente l'intera coda sonora, in campi non sabiniani, anche utilizzando un numero di piramidi molto ridotto. [35]

L'introduzione della diffusione consente di ottenere risultati coerenti con la realtà sperimentale di ambienti normalmente rifiniti ed arredati, senza essere costretti a disegnare con dettaglio esasperato tutti i più piccoli particolari della geometria in esame. [35]

3.4 Programmi

3.4.1 Ramsete

Il pacchetto Ramsete è stato sviluppato esplicitamente per risolvere tutte le limitazioni sinora contenute nei sistemi di modellazione del campo sonoro in grandi ambienti, che attualmente sono più idonei allo studio dei teatri che degli ambienti industriali.

Ramsete si basa sull'algoritmo di tracciamento di piramidi, in particolare il tracciatore di piramidi implementato consente di tenere conto dell'effetto di diffrazione sul bordo libero delle

schermature o degli ostacoli, e considera pure la quota di energia che passa attraverso le superfici (dotate di Potere Fonoisolante finito). Ramsete, progettato in ambiente Windows, è composto dai seguenti moduli complementari tra loro:

Ramsete Cad (RC)

Ramsete CAD è un vero e proprio CAD per la creazione di geometrie tridimensionali che accetta in ingresso anche disegni realizzati con AutoCAD. Esso consente di lavorare contemporaneamente su più finestre, con vista in pianta, sezioni ed assonometria. Consente di introdurre i principali elementi geometrici: pavimento, pareti, tetti, porte, finestre, ricevitori e sorgenti, cui può essere assegnato un orientamento. Ciò è importante soprattutto per sorgenti direttive, a cui può essere assegnato anche un orientamento. Alla fine il lavoro può essere salvato in un file con l'estensione .ray oppure .dxf.

Attraverso il programma Material Manager si accede ad una libreria in cui si possono scegliere i dati di assorbimento ed isolamento acustico dei materiali nelle 10 bande di frequenza considerate (da 31.5 a 16000 Hz).

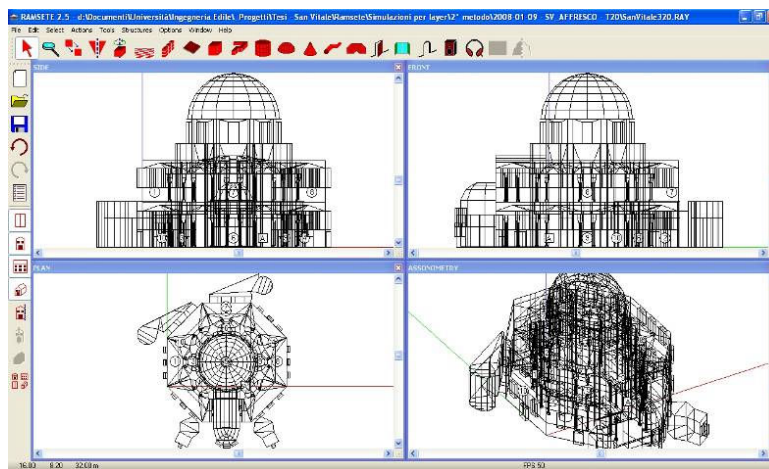


Figura 3.4.1: Modello aperto con RamseteCAD.

Ramsete Trace (RT)

RamseteTrace è l'algoritmo di tracciamento delle piramidi e costituisce il modulo di calcolo vero e proprio. Questo modulo è completamente personalizzabile: in particolare, è possibile impostare il numero di piramidi (*LEVEL*), ovvero i raggi che escono dalla sorgente per simulare la propagazione del suono, il tempo di corsa dei raggi (*TIME*), l'ampiezza temporale,

in s, degli intervalli in cui viene suddivisa la risposta all'impulso (*PRECISION*), il numero di riflessioni che subisce ciascun raggio prima di venire abbandonato (*HISTORY*), il numero di effetti di diffrazione che un raggio sonoro può subire (*DIFFRACTION LEVEL*), dopo quante riflessioni il raggio rimbalza senza seguire la legge ottica (legge di Snell) e assume quindi un percorso casuale (*RANDOMIZE AFTER*) e può scegliere se considerare o trascurare la diffusione (*DIFFUSION*). Una caratteristica molto utile è la possibilità di processare in sequenza più file indipendenti (modalità batch).

Al termine della fase di calcolo, il modulo RamseteTrace genera i seguenti file:

generate_file.____ : contiene, i risultati del tracciamento delle piramidi, ovvero l'insieme delle risposte all'impulso.

generate_file.@_ : contiene, per ogni ricettore, il percorso dei raggi fino all'ordine impostato dall'utente ed il loro preciso tempo di arrivo indipendentemente dalla 'precision' impostata; ciò nel caso sia attivata l'opzione 'Save hits'.

escaped.ray: (se attivato il relativo comando) in cui vengono salvati i raggi usciti dall'involucro.

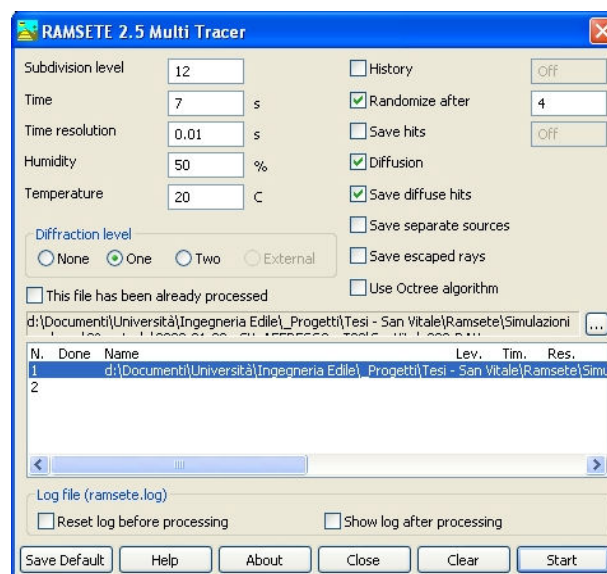


Figura 3.4.2: Schermata di RamseteTrace.

Ramsete View (RV)

Utilizzando come input i file creati da Ramsete Trace, Ramsete View permette la visualizzazione numerica dei risultati ottenuti.

E' un post-processor che consente da un lato di effettuare visualizzazioni tridimensionali prospettiche della geometria disegnata con Ramsete CAD o con AutoCAD, dall'altro di mappare (sia a colori sia con curve isolivello) in pianta o in prospettiva i risultati elaborati per ciascun parametro acustico.

E' inoltre possibile visualizzare:

- risposta all'impulso in ciascun ricevitore, o media della sala;
- risposta integrata con Schroeder (curva di decadimento);
- percorso dei raggi fino all'ordine impostato;
- spettro in ottave in ciascun punto ricevente e complessivo dell'ambiente: tabelle numeriche di tutti i dati (SPL, tempi di riverbero).

Il file contenente l'insieme dei valori di ciascun parametro acustico nelle 10 bande di frequenza considerate, calcolato sulla base del file generato da RamseteTrace, è possibile salvarlo e visualizzarne i risultati in tabelle, copiandoli nella clipboard del sistema ed esportandoli comodamente, per esempio, in Excel.

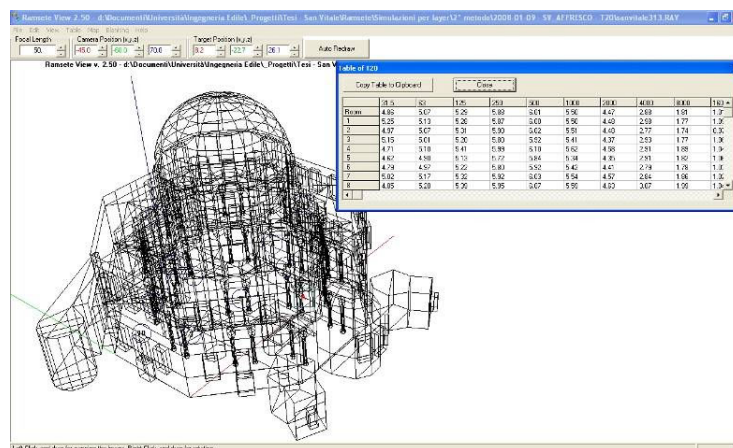


Figura. 3.4.3: Modello aperto con RamseteView e relativa tabella del parametro T20.

3.4.2 Adobe Audition & Aurora

Adobe Audition è un software altamente professionale che ha, come principale obiettivo, quello di offrire un sistema di registrazione audio multitraccia su hard disk (hard disk recording). Originariamente conosciuto come *Cool Edit Pro* e sviluppato dalla *Syntrillium Software*, è stato acquisito dalla Adobe nel maggio del 2003 e integrato nel pacchetto Adobe Creative Suite Production Studio, dedicato alle creazioni multimediali. Aurora invece è una

serie di plugins per Adobe Audition: la risposta d'impulso acustica di una stanza può essere misurata e manipolata per la creazione e la simulazione tridimensionale dello spazio acustico.

In generale, il pacchetto software contenente Adobe Audition e Aurora trasforma un PC a basso costo dotato di una buona scheda audio in un sistema versatile per misurazioni e riproduzioni acustiche, con funzionalità comparabili, o addirittura migliori, di un analizzatore MLS (come MLSSA o TEF), di un Digital Waveform Editor (come Pro Tolls, SAW, SoundForge), di un sistema di qualità sonora binaurale (come Head Acoustic, LMS o Bruel&Kjaer) e di un convolutore DSP real-time (Lake Technology). [9]

Più in dettaglio, AURORA è una collezione di plugins che rende possibile:

- Effettuare una convoluzione rapida tra l'onda e la risposta d'impulso, senza il bisogno di un DSP;
- Creare un segnale per misure IRS (Impulse Response Signal);
- Analizzare una risposta d'impulso in accordo con la ISO 3382, calcolando tutti i parametri oggettivi acustici, come T20, T30, EDT, Ts, C80, C50, D, LE, LF, IACC, STI;
- Eseguire un'analisi di spettro avanzata (in FFT di 1/3 di ottave) del segnale;
- Creare segnali Multiple MSL e Sine Sweep;
- Fare la deconvoluzione della risposta d'impulso dalla risposta misurata nella stanza creata dai segnali sopra citati;
- Creare un filtro inverso di risposta d'impulso.

3.5 Auralizzazione 3D

3.5.1 Introduzione

Le misurazioni sperimentali descritte nei paragrafi precedenti consentono di riprodurre il comportamento acustico dell'ambiente originale, mediante l'utilizzo di cuffie o di altoparlanti. Il processo di riproduzione virtuale del suono di un ambiente chiuso viene denominato «auralizzazione». Tale termine è stato coniato allo scopo di completare quanto già esistente in architettura con il processo di «visualizzazione», ossia di riproduzione virtuale visiva di architetture. L'auralizzazione si basa fundamentalmente sul teorema della convoluzione del segnale anecoico originario con due risposte all'impulso relative alle due orecchie, già descritto nel capitolo 2:

$$(3.5.1) \quad y(\tau) = x(\tau) * h(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} a(\tau) \cdot h(\tau - t) \cdot dt$$

Le risposte all'impulso sono utilizzate come lunghissimi filtri «FIR» (*Finite Impulse Response*) ed applicate a registrazioni asciutte, chiamate «anecoiche» [39], di musica o di parlato. La convoluzione è una tecnica di filtraggio molto efficiente, in particolare, a seguito dell'evoluzione verificatasi recentemente nelle architetture di gestione della memoria dei processori per calcolatori moderni. Oggi la tecnica dell'auralizzazione arriva a riprodurre la tridimensionalità del campo sonoro, le componenti laterali, l'ampiezza del fronte sonoro percepito.

3.5.2 Costruzione del modello geometrico

Per l'esecuzione delle simulazioni acustiche della Basilica di San Vitale a Ravenna è stato utilizzato il tracciatore di piramidi precedentemente descritto, Ramsete, funzionante su PC dotati di sistema operativo a 32 bit. Tale sistema di previsione del campo sonoro, "Ramsete", composto da diversi moduli, ha permesso di valutare la risposta della chiesa, con i dettagli costruttivi di seguito indicati, al suono proveniente da tre collocazioni della sorgente, posizionata rispettivamente nell'abside, al piano terra dove si collocava il coro e al piano superiore nel matroneo. Sono state impiegate 2300 3Dfaces con tempi di calcolo di circa un minuto.

Per il processo di auralizzazione è necessario, come prima fase del lavoro, creare un modello 3D dell'ambiente da studiare, il più simile possibile a quello originale, contenente solo entità tridimensionali 3Dface, benché semplificato, per quanto sia possibile, per evitare dettagli non acusticamente rilevanti che appesantirebbero l'elaborazione successiva. I materiali che compongono il modello vengono suddivisi in layers, in funzione della tipologia di materiale, applicando ad ognuno di essi il proprio coefficiente di assorbimento specifico per ogni frequenza. Dopo di che, si attribuisce alle sorgenti sonore, poste all'interno del modello, il corretto spettro di emissione e direttività.

3.5.3 La taratura del modello

La fase di taratura è centrale per garantire l'affidabilità dei risultati. Essa è preferibilmente basata su misurazioni all'interno dell'ambiente oggetto di studio nello stato di fatto, come è avvenuto per il caso di San Vitale. La taratura deve essere effettuata sui valori dei descrittori

acustici più significativi, con una tolleranza di accettabilità definita in funzione dei valori della minima differenza percettibile soggettivamente, JND (Tabella 3.5.1): al di sotto di questi la differenza tra valori misurati e quelli simulati non è rilevata dall'ascoltatore medio.

Descrittore acustico	Denominazione	Minima differenza percettibile
T30 (s)	Tempo di riverberazione	5%
EDT (s)	Tempo di primo decadimento	5%
D (%)	Definizione	5%
C80/C50 (dB)	Chiarezza	1 dB
Ts (ms)	Tempo baricentrico	10 ms
G (dB)	Sound Strenght	1 dB
LE, LFC (%)	Frazione laterale	5%
IACC	Interaural Cross Correlation Coeff.	0.05
STI	Speech transmission index	0.015

Tabella 3.5.1: JND_ Just Noticeable Difference

Lo scopo della taratura è quello di far convergere i valori dei parametri acustici simulati su quelli misurati: per ambienti semplici è facile ottenere la convergenza dei parametri semplicemente adottando i materiali di default inseriti nel database del programma o studiando i materiali in laboratorio, ma per ambienti complessi, come per la chiesa di San Vitale, ciò non è possibile. Per questo motivo si segue una procedura di iterazione “per tentativi”: si attribuisce ad ogni layer del modello un coefficiente di assorbimento α_i , specifico per ogni banda di frequenza, partendo da valori presi dal database di riferimento e modificandoli, via via, fino ad ottenere la convergenza dei parametri acustici con quelli misurati nella chiesa. Tutti i coefficienti di ogni materiale vengono salvati in un file, chiamato “*Ramsete.mat*”, utilizzato da *RamseteTrace* per la successiva elaborazione. Di seguito sono mostrati alcuni esempi di materiali presi dal database di riferimento:

Frequenza	31.5Hz	63Hz	125Hz	250Hz	500Hz	1KHz	2KHz	4KHz	8KHz	16KHz
Intonaco liscio	0.010	0.020	0.020	0.020	0.030	0.040	0.040	0.030	0.020	0.020
Finestra vetro	0.210	0.420	0.350	0.250	0.180	0.120	0.070	0.040	0.030	0.030

Tabella 3.5.2: Esempio di coefficienti di assorbimento presenti nel database di Ramsete

Il programma *RamseteTrace*, acquisito il file *Ramsete.mat*, crea un file con le risposte all'impulso simulate, da cui *RamseteView* è in grado di ricavare tutti i parametri acustici. Partendo dal materiale più significativo, ovvero quello con maggior superficie riflettente, si iniziano ad aumentare o diminuire tutti i coefficienti di assorbimento α_i in base ai risultati ottenuti, cercando di minimizzare lo scarto tra i parametri simulati e quelli misurati. Si arriverà ad un punto in cui variando nuovamente i coefficienti α di ogni banda la soluzione peggiora: ciò significa che si sono ottenuti i coefficienti più vicini al comportamento reale di assorbimento per quel materiale. Successivamente, si prende come riferimento il secondo materiale, in ordine di importanza come superficie riflettente e sempre attraverso un processo per tentativi sul coefficiente α di quel materiale, si procede l'operazione di taratura, così via fino a riuscire ad ottenere la convergenza migliore, la quale non consente, normalmente, la convergenza perfetta.

Materiale	Superficie [m²]
Affresco	2866
Mattoni	2763
Pavimento PT	1295
Intonaco	999
Marmo	597
Pavimento P1	470
Mosaico	455
Vetro	306
Coperture	188
Pietra	132
Legno	30

Tabella 3.5.3: Superficie dei materiali presenti nel modello usato per la simulazione

3.5.4 Risultati ottenuti

Prima di arrivare alla soluzione finale, sono state eseguite 292 iterazioni a motivo della complessità architettonica della basilica, in termini di superfici e varietà di materiali le costituiscono:

	<i>Freq [Hz]</i>	31.5	63	125	250	500	1000	2000	4000.	8000	16000	<i>Lin</i>	<i>A</i>
T20	T20 di rif.	5.08	4.84	5.05	5.60	5.73	5.25	4.26	2.75	1.72	0.75	4.47	4.75
	T20 simul.	4.50	6.47	5.15	5.92	6.69	6.51	5.07	3.85	1.81	1.15	6.34	6.25
	Scarto	0.58	-1.63	-0.10	-0.32	-0.96	-1.26	-0.81	-1.10	-0.09	-0.40	-1.87	-1.50

	<i>JND</i>			OK						OK			
T30	T30 di rif.	6.29	4.98	5.05	5.67	5.75	5.20	4.24	2.81	1.78	0.13	4.65	4.95
	T30 simul.	5.58	6.26	4.96	5.80	6.55	6.36	4.93	3.86	1.86	1.19	6.20	6.17
	Scarto	0.71	-1.28	0.09	-0.13	-0.81	-1.16	-0.69	-1.05	-0.08	-1.06	-1.55	-1.23
	<i>JND</i>			OK	OK					OK			
C50	C50 di rif.	-2.99	-10.30	-7.83	-8.40	-9.95	-9.39	-7.51	-5.92	-2.17	-1.05	-6.63	-6.53
	C50 simul.	-2.97	-8.71	-7.04	-7.97	-8.96	-8.78	-7.06	-5.37	-1.87	-0.18	-7.09	-6.99
	Scarto	-0.02	-1.59	-0.79	-0.43	-0.99	-0.61	-0.45	-0.55	-0.30	-0.87	0.46	0.46
	<i>JND</i>	OK		OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
C80	C80 di rif.	-1.40	-6.95	-5.97	-6.48	-7.75	-7.31	-5.56	-3.59	0.36	1.86	-4.60	-4.55
	C80 simul.	-0.45	-6.73	-4.97	-5.97	-7.00	-6.82	-5.00	-3.15	1.11	2.99	-5.05	-4.94
	Scarto	-0.95	-0.22	-1.00	-0.51	-0.75	-0.49	-0.56	-0.44	-0.75	-1.13	0.45	0.39
	<i>JND</i>	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK		OK	OK
D50	D50 di rif.	34.05	11.31	16.18	13.11	9.79	11.15	15.67	21.47	38.52	51.54	18.49	18.81
	D50 simul.	33.54	11.86	16.52	13.76	11.28	11.70	16.45	22.51	39.40	48.97	16.36	16.66
	Scarto	0.51	-0.55	-0.34	-0.65	-1.49	-0.55	-0.78	-1.04	-0.88	2.57	2.13	2.15
	<i>JND</i>	OK	OK	OK	OK		OK	OK	OK	OK	OK		

Tabella 3.5.4:

Valori dei più importanti parametri acustici a confronto con quelli misurati, nella soluzione ottimale ottenuta.

Dalla tabella 3.5.4 si nota come i valori dei parametri monoaurali rientrano all'interno del JND, mentre, per i tempi di riverbero non per tutto il campo delle frequenze questo avviene.

La scritta OK in blu indica se il valore del parametro simulato rientra all'interno del JND, che definisce per ogni parametro un range di valori all'interno dei quali il parametro può essere ritenuto valido, in quanto il nostro apparato uditivo non riesce ad apprezzarne la differenza. Questa soluzione è stata ottenuta con i seguenti valori dei coefficienti di assorbimento α :

Materiale \ Freq [Hz]	31.5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
Affresco	0.355	0.106	0.259	0.216	0.178	0.152	0.230	0.359	0.994	0.433
Coperture	0.002	0.002	0.004	0.005	0.005	0.005	0.006	0.007	0.008	0.009
Intonaco	0.320	0.012	0.020	0.028	0.001	0.018	0.039	0.030	0.020	0.022
Legno	0.900	0.900	0.200	0.050	0.030	0.010	0.010	0.010	0.900	0.900
Marmo	0.001	0.005	0.011	0.011	0.011	0.020	0.020	0.020	0.030	0.026
Mattoni	0.000	0.075	0.050	0.040	0.041	0.041	0.050	0.049	0.050	0.060
Mosaico	0.005	0.004	0.007	0.012	0.012	0.020	0.020	0.021	0.030	0.029
Pavimento PT	0.528	0.001	0.003	0.004	0.004	0.016	0.012	0.036	0.124	0.088
Pavimento P1	0.030	0.040	0.034	0.030	0.022	0.040	0.040	0.037	0.041	0.050
Pietra	0.005	0.005	0.010	0.010	0.010	0.020	0.020	0.020	0.030	0.030
Vetro	0.060	0.120	0.100	0.040	0.030	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020

Tabella 3.5.5: Coefficienti di assorbimento dei materiali della soluzione ottimale.

Come si vede dalla tabella 3.5.4, la soluzione che porta alla minimizzazione degli scarti per i parametri legati alla chiarezza, non produce il medesimo effetto sui tempi di riverbero. Allora, si è provato a variare i coefficienti di assorbimento α in modo da far convergere principalmente i tempi di riverbero T20 e T30. Di seguito i risultati ottenuti:

	Freq [Hz]	31.5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000	Lin	A
T20	T20 di rif.	5.08	4.84	5.05	5.60	5.73	5.25	4.26	2.75	1.72	0.75	4.47	4.75
	Room	4.86	5.07	5.29	5.88	6.01	5.5	4.47	2.88	1.81	1.01	5.62	5.51
	Scarto	0.22	-0.23	-0.24	-0.28	-0.28	-0.25	-0.21	-0.13	-0.09	-0.26	-1.15	-0.76
		OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK			
T30	T30 di rif.	6.29	4.98	5.05	5.67	5.75	5.20	4.24	2.81	1.78	0.13	4.65	4.95
	Room	5.57	4.71	5.09	5.76	5.87	5.39	4.44	3.33	1.87	1.06	5.48	5.44
	Scarto	0.72	0.27	-0.04	-0.09	-0.13	-0.19	-0.20	-0.52	-0.09	-0.93	-0.83	-0.50
				OK	OK	OK	OK	OK		OK			
C50	C50 di rif.	-2.99	-10.30	-7.83	-8.40	-9.95	-9.39	-7.51	-5.92	-2.17	-1.05	-6.63	-6.53
	Room	-3.9	-6.92	-7.26	-7.92	-8.13	-7.52	-6.06	-3.55	-1.88	0.58	-6.33	-5.95
	Scarto	0.91	-3.38	-0.57	-0.48	-1.82	-1.87	-1.45	-2.37	-0.29	-1.63	-0.30	-0.58
		OK		OK	OK					OK		OK	OK
C80	C80 di rif.	-1.40	-6.95	-5.97	-6.48	-7.75	-7.31	-5.56	-3.59	0.36	1.86	-4.60	-4.55
	Room	-1.53	-4.82	-5.2	-5.91	-6.13	-5.49	-3.91	-0.97	1.09	4.29	-4.22	-3.78
	Scarto	0.13	-2.13	-0.77	-0.57	-1.62	-1.82	-1.65	-2.62	-0.73	-2.43	-0.38	-0.77
		OK		OK	OK					OK		OK	OK
D50	D50 di rif.	34.05	11.31	16.18	13.11	9.79	11.15	15.67	21.47	38.52	51.54	18.49	18.81
	Room	28.94	16.89	15.84	13.91	13.33	15.04	19.86	30.62	39.35	53.35	18.88	20.28
	Scarto	5.11	-5.58	0.34	-0.80	-3.54	-3.89	-4.19	-9.15	-0.83	-1.81	-0.39	-1.47
				OK						OK	OK	OK	
EDT	EDT di rif.	4.06	4.17	4.61	5.56	5.76	5.36	4.29	2.80	1.65	11.95	3.93	4.12
	Room	2.92	5.19	5.57	6.47	6.77	5.89	4.17	2.32	1.53	0.96	5.44	4.99
	Scarto	1.14	-1.02	-0.96	-0.91	-1.01	-0.53	0.12	0.48	0.12	10.99	-1.51	-0.87
								OK					

Tabella 3.5.6:

Valori dei più importanti parametri acustici nella soluzione ottenuta facendo convergere i tempi di riverbero.

Dalla tabella 3.5.6 si osserva come convergendo i tempi di riverbero peggiorano i valori della chiarezza, pur ottenendo una soluzione di maggiore convergenza con più parametri acustici misurati.

3.5.5 Simulare la risposta all'impulso

Una volta tarato il modello e trovato i coefficienti di assorbimento α ottimali, è possibile attraverso Ramsete, simulare la risposta all'impulso di ogni punto della chiesa. Lo scopo di questa operazione è quello di ottenere le risposte all'impulso di punti non misurati o inaccessibili per fare le misurazioni. Per poter simulare una risposta all'impulso è necessario, una volta inserito nel modello 3D un “receiver” (ricevitore) nel punto di misura considerato, eseguire nuovamente l'operazione di calcolo con *RamseteTrace*. Una volta terminata la fase di calcolo si usa un tool di Ramsete chiamato *rams2wav*, che permette di trasformare i dati di Ramsete in una forma d'onda con estensione *.wav* riproducibile con *Adobe Audition*: *Rams2wav* richiede in ingresso il file generato da *RamseteTrace*, il file contenente i settaggi usati (*ramsete.ini*), e chiede di specificare di quale *receiver* calcolare la risposta all'impulso.

Una volta simulata la risposta all'impulso, con *Aurora* è possibile eseguire la convoluzione con un brano anecoico, ottenendo, in tal modo, una vera realtà virtuale acustica, che riproduce realisticamente la sensazione acustica prodotta dall'ambiente effettivo.

A questo punto è possibile confrontare i risultati ottenuti non più tramite parametri matematici, ma ascoltando la risposta all'impulso simulata e quella misurata, e valutando sensorialmente se la differenza tra le due sia accettabile.

3.5.6 Registrazione anecoica

Al fine di riprodurre le caratteristiche acustiche della Basilica di San Vitale e grazie alla collaborazione con la facoltà di Archeologia dell'Università di Southampton (UK), è stato registrato un canto per sola voce, che caratterizzava la liturgia ravennate, risalente al V sec.d.C., intitolato “*Lux de luce Deus tenebris illuxit Avern*” in una camera anecoica presso “The Institute of Sound and Vibration (ISVR)”. Una volta registrato questo canto in camera anecoica, è stato possibile aggiungere l'effetto dello specifico spazio acustico, in questo caso la basilica di San Vitale, mediante un opportuno filtraggio numerico di tali segnali anecoici. In tal modo è stata ricreata con grande realismo la sensazione di ascolto che si avrebbe nella chiesa stessa, senza la necessità di doverlo registrare di nuovo nel medesimo ambiente [39].



Figura 3.5.1: Registrazione vocale in camera anecoica all'Istituto ISVR di Southampton (UK).

Il canto anecoico è stato convoluto con la risposta all'impulso misurata nella chiesa e con quella simulata, e successivamente ascoltate e messe a confronto.

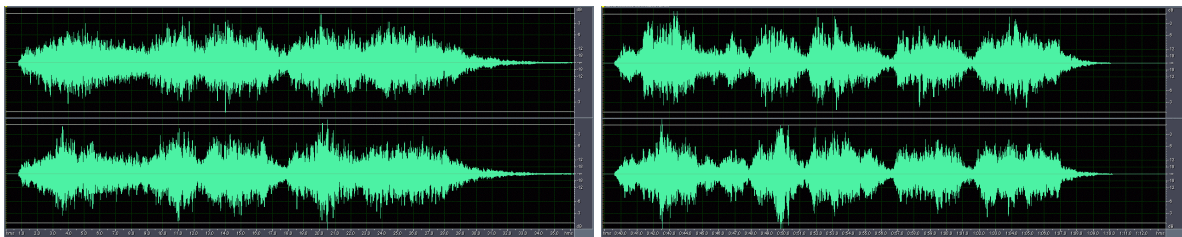


Figura 3.5.2: Canto anecoico convoluto con l'IR misurata (a sinistra) e con l'IR simulata (a destra).

Ascoltando la risposta all'impulso simulata e misurata, e successivamente il canto anecoico convoluto con entrambe, si nota come i risultati ottenuti, sempre tenendo conto delle approssimazioni adottate e della grande complessità del problema, siano molto simili e quindi il modello tarato con Ramsete approssimi correttamente la realtà.

3.6 Riproduzione del segnale auralizzato

3.6.1 Introduzione

Storicamente la tecnica dell'auralizzazione deriva da quella, usata ormai da oltre 30 anni, di registrazione stereofonica mediante microfoni binaurali collocati su una testa artificiale [37, 38]. Tale tecnica consisteva nella registrazione di rappresentazioni musicali nei teatri, che potevano venire ascoltate con grande fedeltà mediante riproduzione in cuffia. Ci si rese conto, in seguito, che era possibile separare la registrazione dell'evento artistico dalla sua

riproduzione in un particolare ambiente, mediante una preventiva registrazione del brano musicale in camera anecoica, ed aggiungere, successivamente, l'effetto dello spazio acustico, oggetto di studio, mediante un opportuno filtraggio numerico di tali segnali anecoici. Inizialmente il metodo, prevedeva l'utilizzo di risposte all'impulso binaurali come filtri numerici per l'auralizzazione, risultando idoneo solo alla riproduzione in cuffia, per poi, in questi ultimi anni, evolversi in modo significativo; oggi è possibile realizzare filtri numerici idonei alla riproduzione del segnale auralizzato su una normale coppia di altoparlanti stereo, meglio se posti a breve distanza fra loro: auralizzazione 3D mediante la tecnica dello stereo dipolo [40].

Alla base di tutti questi effetti, vi è la semplice formulazione matematica basata sulla convoluzione fra i segnali anecoici ed i filtri numerici o risposte all'impulso. Sono disponibili, in ordine di complessità crescente, i seguenti dispositivi di riproduzione:

- Cuffie stereofoniche
- Riproduzione su altoparlanti con cross-talk cancellation (Stereo Dipole)
- Doppio Stereo Dipole
- Ambisonics: sistema con 4 canali di trasmissione (B-format), proiettati su un array di 8-24 altoparlanti (3D)
- Ambiophonics: sistema che combina uno o due Stereo-dipoles con un sistema "surround" tipo Ambisonics

3.6.2 Auralizzazione binaurale in cuffia

Per l'effettuazione dell'auralizzazione con ascolto in cuffia è sufficiente disporre di risposte all'impulso binaurali, ottenute collocando la testa artificiale nei punti dove si vuole ottenere la misura acustica dell'ambiente, e disponendo l'altoparlante omnidirezionale nelle posizioni di sorgente: la traccia audio di ciascuna sorgente sonora, sia essa voce o musica, sarà convoluta con la risposta all'impulso binaurale corrispondente alla posizione da essa occupata. E' necessario, infine, che la risposta della cuffia venga equalizzata digitalmente.



Figura 3.6.1: Configurazione "Cuffia Stereofonica"

3.6.3 Auralizzazione binaurale tramite altoparlanti stereo (stereo dipolo)

Questa tecnica utilizza 2 canali per la riproduzione e si basa sulla cross talk cancellation: un metodo per la riproduzione di registrazioni binaurali attraverso diffusori acustici. Si utilizzano risposte all'impulso e registrazioni binaurali, assegnando ad ogni orecchio il segnale corrispondente, creando così l'impressione di trovarsi sulla scena dell'evento sonoro registrato. Inizialmente per la riproduzione erano utilizzati degli auricolari, in modo che il segnale left arrivasse all'orecchio sinistro mentre il segnale right a quello destro. Nonostante l'efficace del sistema, l'utilizzo di auricolari, rendeva la ricostruzione sonora poco confortevole dal punto di vista psicoacustico. Si iniziò così a sperimentare lo stereo dipolo, che prevede l'utilizzo di loudspeakers anziché auricolari.



Figura 3.6.2: Configurazione "Stereo Dipole"

Una registrazione binaurale o una auralizzazione ad essa equivalente non può venire riprodotta come tale su una normale coppia di altoparlanti stereo, per due motivi:

1) il segnale proveniente dall'altoparlante sinistro finisce anche sull'orecchio destro, e viceversa; 2) il segnale binaurale contiene già le risposte in frequenza dell'orecchio esterno, che verrebbero in tal modo riapplicate una seconda volta.

La Figura 3.6.3 mostra ciò che accade quando una coppia di altoparlanti è posta di fronte ad un ascoltatore: il segnale proveniente da ciascun altoparlante raggiunge entrambe le orecchie, cosicché all'ingresso del canale uditivo i canali destro e sinistro arrivano mixati.

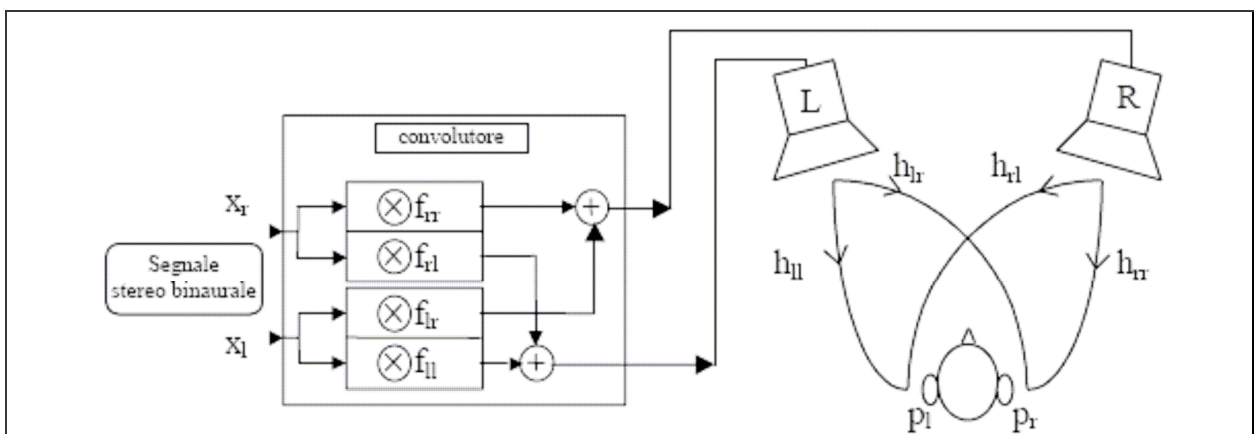


Figura 3.6.3: Percorso dei segnali che giungono alle orecchie attraverso gli altoparlanti

In più la funzione di trasferimento relativa alla testa HRTF (Head Related Transfer Functions) è già compresa nelle risposte all'impulso usate per la convoluzione binaurale, ma il segnale che arriva dagli altoparlanti interferisce nuovamente con la testa dell'ascoltatore, e in questo modo il filtraggio dovuto alla testa viene operato due volte.

Per queste ragioni, è necessario usare un algoritmo che trasformi nuovamente i segnali che arrivano alle orecchie, in modo che sull'orecchio sinistro arrivi solo x_l e sull'orecchio destro arrivi esclusivamente x_r . Se sono state misurate le quattro risposte all'impulso fra gli altoparlanti e le orecchie (denominate rispettivamente h_{ll} , h_{lr} , h_{rl} ed h_{rr}), è possibile calcolare facilmente le quattro risposte all'impulso "inverse", denominate f_{ll} , f_{lr} , f_{rl} e f_{rr} , capaci di operare l'opportuno pre-filtraggio. Matematicamente parlando ciò comporta risolvere un sistema di 4 equazioni in 4 incognite (3.6.1):

$$(3.6.1) \quad \begin{cases} f_{ll} = (h_{rr}) \otimes \text{InvDen} \\ f_{lr} = (-h_{lr}) \otimes \text{InvDen} \\ f_{rl} = (-h_{rl}) \otimes \text{InvDen} \\ f_{rr} = (h_{ll}) \otimes \text{InvDen} \\ \text{InvDen} = \text{InvDen}(h_{ll} \otimes h_{rr} - h_{lr} \otimes h_{rl}) \end{cases}$$

Occorre, quindi, misurare le quattro risposte all'impulso relative agli altoparlanti e alla testa dell'ascoltatore, il cui effetto è così completamente eliminato dal segnale audio da riprodurre: ciò significa che, così facendo, viene eliminato non solo il cross-talk [40, 41], ma anche qualsiasi altro filtraggio indesiderato dovuto alla risposta in frequenza degli altoparlanti. In più, viene eliminata anche la funzione di trasferimento relativa alla testa, evitando il doppio filtraggio esaminato precedentemente. E' opportuno, a tal proposito, che venga utilizzata la stessa testa artificiale già impiegata per la misura delle risposte all'impulso nell'ambiente, in modo che anche la particolare scelta della testa binaurale non influisca sul risultato.

Anche se in base alla teoria su esposta la posizione dei due altoparlanti è ininfluenza sul risultato, in pratica si verifica che esiste una posizione ottimale. Essa però non coincide con il classico "triangolo stereo" suggerito per l'ascolto delle normali incisioni, in cui gli altoparlanti sono collocati in posizioni situate a +/- 30° rispetto all'asse longitudinale della testa dell'ascoltatore. Kirkeby [40] scoprì che una configurazione con 10° di apertura rispetto all'asse dell'ascoltatore, minimizza gli effetti di cross-talk e accresce l'area in cui la

cancellazione ha effetto, permettendo maggiori movimenti del capo: disposizione "stereo dipole" (Figura 3.6.4):

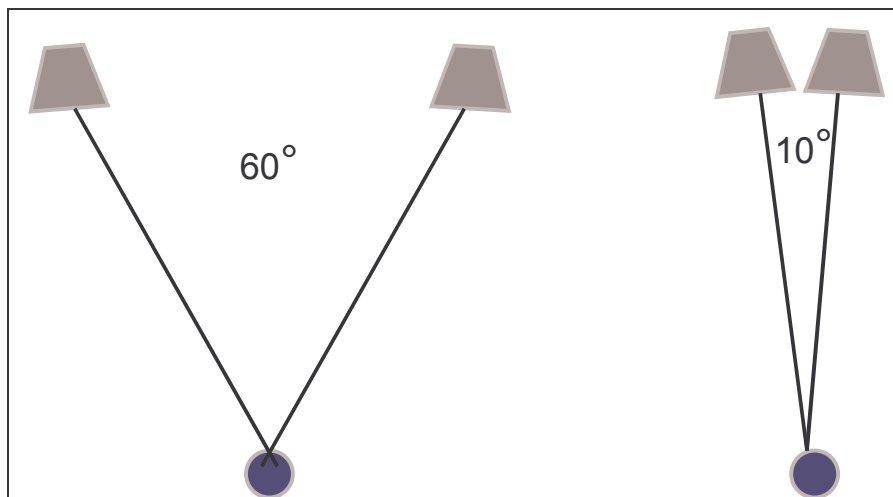


Figura 3.6.4: Configurazione stereo standard (sinistra) e "stereo dipole" (destra)

Per applicare questa tecnica di cancellazione occorre inoltre che l'ambiente di ascolto sia acusticamente trattato: gli effetti delle riflessioni non risultano controllabili e quindi non risultano cancellabili oltre un certo ordine. Lo stereo dipolo prevede di applicare la cancellazione di cross-talk a due altoparlanti posti molto vicini l'uno all'altro al fine di creare un dipolo acustico vicino ad un mono-polo, in cui gli effetti della cancellazione siano maggiormente controllabili. Il processo di creazione dello stereo dipolo prevede l'acquisizione di risposte all'impulso binaurali (nel nostro caso, tramite dummy head -Neumann Ku100), inversione della matrice delle risposte binaurali e cross-convoluzione del segnale binaurale con la rete di filtri inversi.

Uno dei principali vantaggi dello stereo dipolo rispetto alle cuffie è la sua capacità di generare un'immagine sonora localizzata frontalmente senza perdere informazioni sui contributi laterali (contrariamente allo stereo normale). Questo permette di ottenere una sensazione molto più naturale durante l'ascolto rispetto a quella delle cuffie in cui il suono viene percepito come se stesse provenendo dal centro della testa, o rispetto al classico stereo dove il suono risulta molto frontale. All'occorrenza, comunque, è estremamente facile riportare un segnale filtrato per la riproduzione su "stereo dipole" al formato binaurale originario, riconvolvendolo con il set di quattro risposte all'impulso (h_{ll} , h_{lr} , h_{rl} ed h_{rr}) che erano servite come base per il calcolo dei filtri inversi. Lo "stereo dipole" consente di "riciclare" il vasto repertorio di risposte all'impulso

binaurali già esistente, purché sia ancora disponibile la testa artificiale impiegata per la loro registrazione. La tecnica di riproduzione scelta per l'auralizzazione di San Vitale è proprio lo stereo dipolo, che richiede l'inserimento nel file video, l'audio bicanale, adatto alle due casse con le quali può essere visto, ad esempio nella sala d'ascolto, Arlecchino - Facoltà di Ingegneria di Bologna -, misurando ed inserendo, preliminarmente, il settaggio dei cross-talk delle casse della sala, nel video, in modo che il rendering sia perfettamente fedele.

3.6.4 Doppio Stereo Dipolo

Il doppio stereo dipolo, rispetto al singolo stereo dipolo precedentemente descritto, aggiunge una coppia di diffusori dietro all'ascoltatore. In questo modo la pressione all'orecchio indotta dai due stereo dipoli (front e rear), in condizioni ideali - la testa dell'ascoltatore posizionata nello stesso punto della *dummy head* in cui sono state eseguite le misure, l'ascoltatore perfettamente fermo, strumentazione di riproduzione ideale - dovrebbe essere esattamente la stessa; nelle reali condizioni lo stereo dipolo doppio conferisce al suono che arriva dal retro gli stessi vantaggi, precedentemente descritti, che il singolo stereo dipolo dà per il suono frontale. Ciò significa che sarà più realistico in situazioni in cui il suono posteriore è particolarmente importante, come ad esempio in una chiesa o in un teatro (forti riflessioni posteriori).

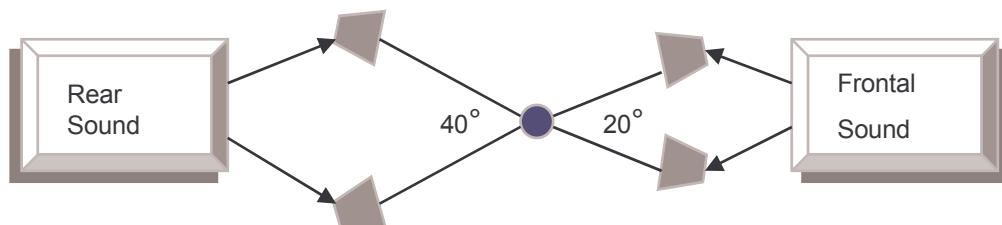
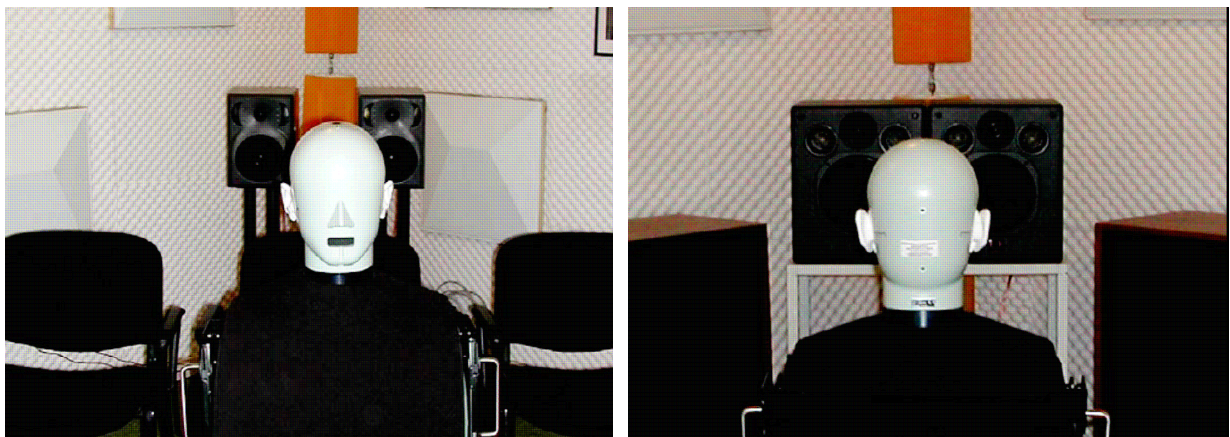


Figura 3.6.5: Configurazione "double stereo dipole"

3.6.5 Auralizzazione con tecnica b-format (ambisonics)

Se il rilevamento della risposta all'impulso nell'ambiente era stato effettuato mediante un microfono Soundfield (o equivalente) [42], si hanno a disposizione risposte all'impulso di tipo B-format, costituite da un segnale omnidirezionale (W) corrispondente alla pressione acustica, e dai tre segnali provenienti dai microfoni a figura di 8 (XYZ), corrispondenti alle componenti cartesiane della velocità di oscillazione delle particelle d'aria. La seguente figura illustra il significato fisico del segnale B-format ottenuto dal microfono tridimensionale Soundfield.

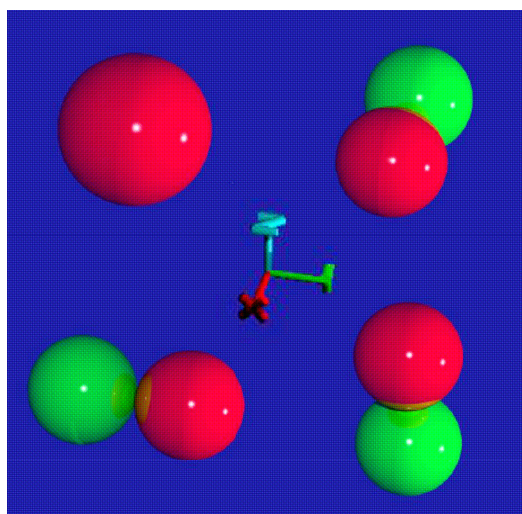


Figura 3.6.6: Diagrammi di direttività delle 4 componenti del segnale B-format

Come nei casi precedenti, è possibile ricostruire una “registrazione virtuale” in formato B-format convolvendo opportuni segnali anecoici (canto e/o musica) con le risposte all'impulso B-format ottenute con diverse posizioni della sorgente, e mixando fra loro i risultati di tali convoluzioni. Il segnale B-format così ottenuto è sostanzialmente indistinguibile da una registrazione effettuata dal vivo nello stesso posto d'ascolto dello stesso ambiente misurato. L'aspetto interessante di questa metodica è la possibilità di impiegare, per la riproduzione del segnale B-format, un sistema di altoparlanti configurato secondo la metodica Ambisonics. Si tratta di circondare un idoneo volume di ascolto con un adeguato numero di altoparlanti disposti uniformemente: la configurazione più semplice è quella di un cubo, con 8 altoparlanti identici posti nei vertici dello stesso. Dal segnale B-format è agevole ricalcolare i segnali da inviare agli 8 altoparlanti. Utilizzando la numerazione degli stessi riportata nella seguente Figura 3.6.7, e le tradizionali convenzioni sulla orientazione degli assi X, Y e Z, si ottiene questo assieme di relazioni per ricostruire i segnali di alimentazione degli 8 altoparlanti:

$$\begin{aligned}
 (3.6.2) \quad & F_1=W+X+Y+Z & F_5=W+X+Y-Z \\
 & F_2=W-X+Y+Z & F_6=W-X+Y-Z \\
 & F_3=W-X-Y+Z & F_7=W-X-Y-Z \\
 & F_4=W+X-Y+Z & F_8=W+X-Y-Z
 \end{aligned}$$

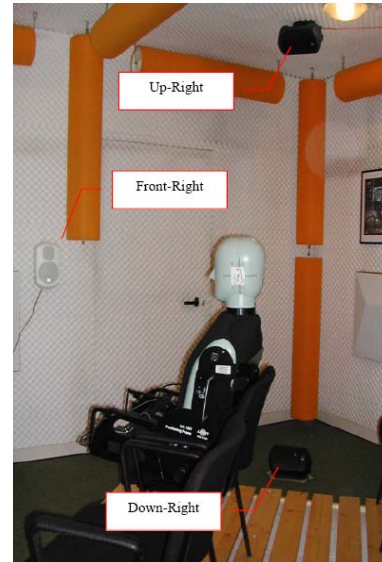
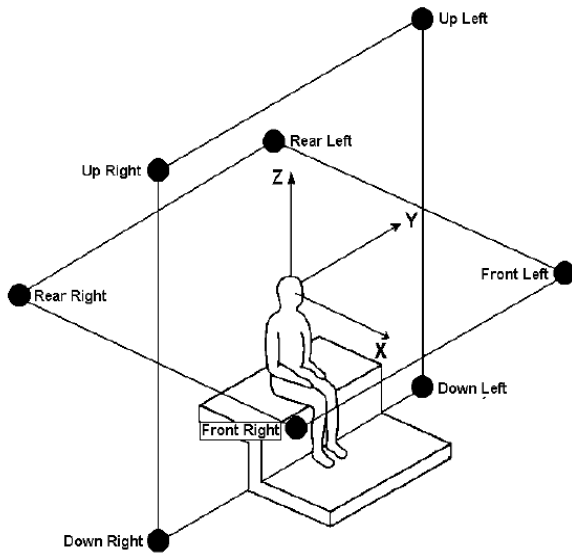


Figura 3.6.7: Geometria del sistema di riproduzione Ambisonics 3D ad 8 altoparlanti

Il principale vantaggio della riproduzione Ambisonics risiede nel fatto che l'ascolto tridimensionale diviene possibile per gruppi di ascoltatori anche numerosi (dipendentemente dal numero di altoparlanti e dalle caratteristiche del locale di ascolto), pur mantenendo sempre un'elevata compattezza dell'informazione [43].

3.6.6 Ambiophonics

Il metodo *Ambiophonics* [44], rappresenta una soluzione ibrida, tesa ad unire i pregi corrispondenti a due sistemi di base: la riproduzione con cancellazione del *crosstalk* di tracce binaurali mediante altoparlanti ravvicinati tipo «stereo dipolo» e il surround tridimensionale ottenuto dalla convoluzione di microfoni virtuali orientati in corrispondenza agli altoparlanti.

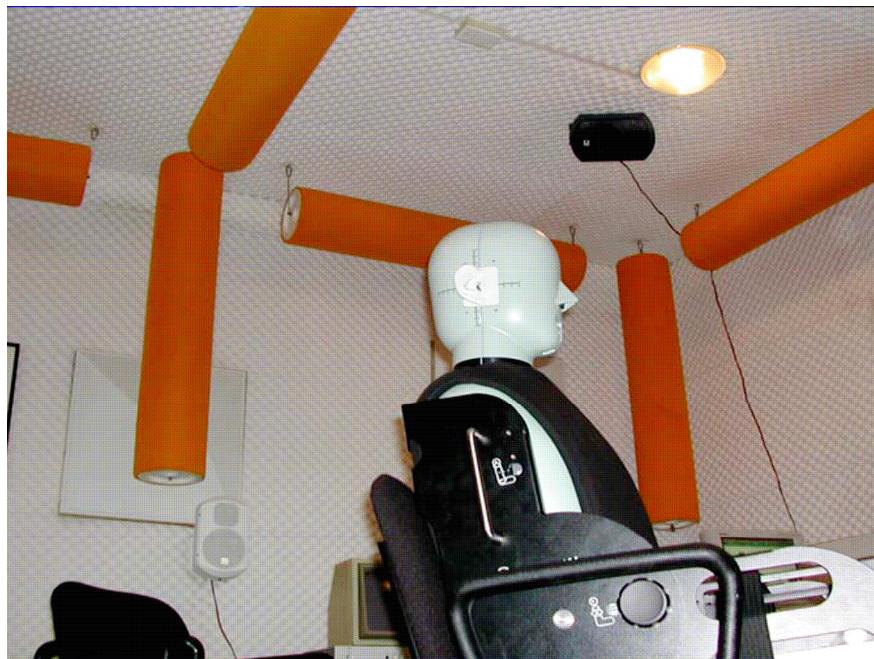


Figura 3.6.8: Configurazione "Ambiophonic"

Gli altoparlanti stereo-dipolo devono fornire solo il suono diretto e le prime riflessioni provenienti dal palcoscenico, mentre gli altri altoparlanti *Ambisonics* devono fornire le ulteriori riflessioni e la riverberazione. Ciò significa che le risposte all'impulso necessitano di essere opportunamente modificate: le risposte binaurali, che sono utilizzate nello stereo dipolo, devono essere dolcemente tagliate dopo il suono diretto; dall'altro lato le risposte all'impulso

B-format, da cui si ricavano i canali *surround*, devono essere private del suono diretto. L'operazione di filtraggio dei due gruppi di risposte all'impulso rappresenta un punto delicato, dacché possono causare un infelice mescolamento dei due sistemi di base o possono introdurre ritardi artificiali che alterano la distanza temporale tra il suono diretto e la susseguente riverberazione.

CAPITOLO 4

TEORIA DELL'ILLUMINOTECNICA

4.1 Brevi cenni di Fotometria ed Illuminotecnica

Lo studio della luce ha avuto costante interesse e approfondimento nel corso dei secoli: nell'Antica Grecia, in epoca Medievale, fino alla nascita della fisica moderna con Galileo, agli sviluppi della fisica contemporanea, fino alle attuali applicazioni di simulazione virtuale della realtà. Che cosa è dunque la luce? Storicamente si è cercato di dare alle osservazioni empiriche dei fenomeni ottici una risposta fisica, quantitativa e misurabile.

Dal XVI al XX secolo i due approcci teorici principali sono stati:

- luce come particelle
- luce come onde

PARTICELLA: corpuscolo, elemento di piccolissime dimensioni ma con intatte le caratteristiche di solidità e localizzazione. Le principali caratteristiche di questa teoria sono:

- una "particella" occupa una posizione dello spazio ben definita;
- la particella muovendosi percorre una traiettoria con velocità che, in linea di principio, può essere conosciuta istante per istante;
- se la particella urta un ostacolo può rimbalzare più o meno deviata o penetrare più o meno profondamente o addirittura rompersi se l'urto è abbastanza violento, ma mai compenetrarsi.

ONDA: un'onda è caratterizzata da fluidità e delocalizzazione.

- un'onda non occupa una posizione precisa dello spazio ma è più o meno estesa o, in termini tecnici 'delocalizzata';
- la sua estensione può variare nel tempo (basta pensare alle onde concentriche);
- non si può parlare rigorosamente di velocità dell'onda perché parti diverse possono avere velocità diverse;
- due onde possono sovrapporsi;
- quando un'onda incontra un ostacolo si osserva che i punti di contatto diventano 'sorgenti' di altre onde.

Sono stati compiuti numerosi studi sia della luce come particella, in particolar modo da Newton, che come onda, fino ad arrivare alle equazioni, su cui poggia la teoria moderna dell'illuminotecnica, di Maxwell.

Fenomeni ottici	Luce come particelle	Luce come onde	
		Etere	Vuoto
Riflessione	Newton	Hooke-Huygens	Maxwell
Rifrazione	Newton	Hooke-Huygens	Maxwell
Formazione di ombre	Newton	Hooke-Huygens	Maxwell
Diffrazione		Young-Fresnel	Maxwell
Interferenza		Young-Fresnel	Maxwell
Polarizzazione			Maxwell

Tabella 4.1.1: Studio della luce come particella e come onda

Le equazioni di Maxwell descrivono il legame tra oscillazioni di campo elettrico e campo elettromagnetico, la propagazione della luce sia legata alla propagazione di questi campi e gli aspetti fondamentali del fenomeno della propagazione delle onde elettromagnetiche. Attraverso le equazioni di Maxwell è possibile dimostrare che i campi elettromagnetici si propagano come onde.

$$(4.1.1) \quad v = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon \cdot \mu}}$$

L'equazione 4.1.3 è la formula della velocità di propagazione di un'onda in un mezzo con costante dielettrica ε e permeabilità magnetica μ . Nel caso di propagazione nel vuoto la formula della velocità diventa:

$$(4.1.2) \quad c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \cdot \mu_0}}$$

sostituendo i valori sperimentali si ottiene $c=2.9979 \cdot 10^8$ m/s, valore della velocità della luce nel vuoto: la luce, in tal modo, può essere considerata un'onda elettromagnetica.

La luce si propaga nel vuoto in forma di onde elettromagnetiche o fotoni, alla velocità di circa 300.000 km/s. Le onde elettromagnetiche sono classificate in base alle loro frequenze caratteristiche all'interno dello spettro elettromagnetico (Tabella 4.1.2).

Denominazione	Sigla	Frequenza	Lunghezza d'onda	
Frequenze Estremamente Basse	ELF	0 - 3kHz	> 100 km	
Frequenze Bassissime	VLF	3 - 30kHz	100 - 10 km	
Radiofrequenze	Basse Frequenze (Onde Lunghe)	LF	30 - 300kHz	10 - 1 km
	Medie Frequenze (Onde Medie)	MF	300kHz - 3MHz	1 km - 100 m
	Alte Frequenza	HF	3 - 30MHz	100 - 10 m
	Frequenze Altissime (Onde Metriche)	VHF	30 - 300MHz	10 - 1 m
Microonde	Onde Decimetriche	UHF	300MHz - 3GHz	1 m - 10 cm
	Onde Centimetriche	SHF	3 - 30GHz	10 - 1 cm
	Onde Millimetriche	EHF	30 - 300GHz	1 cm - 1 mm
Infrarosso	IR	0,3 - 385THz	1000 - 0,78 mm	
Luce Visibile		385 - 750THz	780 - 400 nm	
Ultravioletto	UV	750 - 3000THz	400 - 100 nm	
Radiazioni Ionizzanti	X	> 3000THz	< 100 nm	

Tabella 4.1.2: Campo di variabilità in frequenza e in lunghezza d'onda delle onde elettromagnetiche

Le onde elettromagnetiche possono avere una lunghezza d'onda che va dal milionesimo di millimetro sino a decine di metri, ma solamente una piccola parte viene trasformata dal sistema visivo in sensazione luminosa. Le onde radio, i raggi X e Gamma, i raggi cosmici sono anch'esse radiazioni elettromagnetiche, della stessa natura della luce, ma non producono alcuna sensazione visiva sul nostro occhio (Figura 4.1.1).

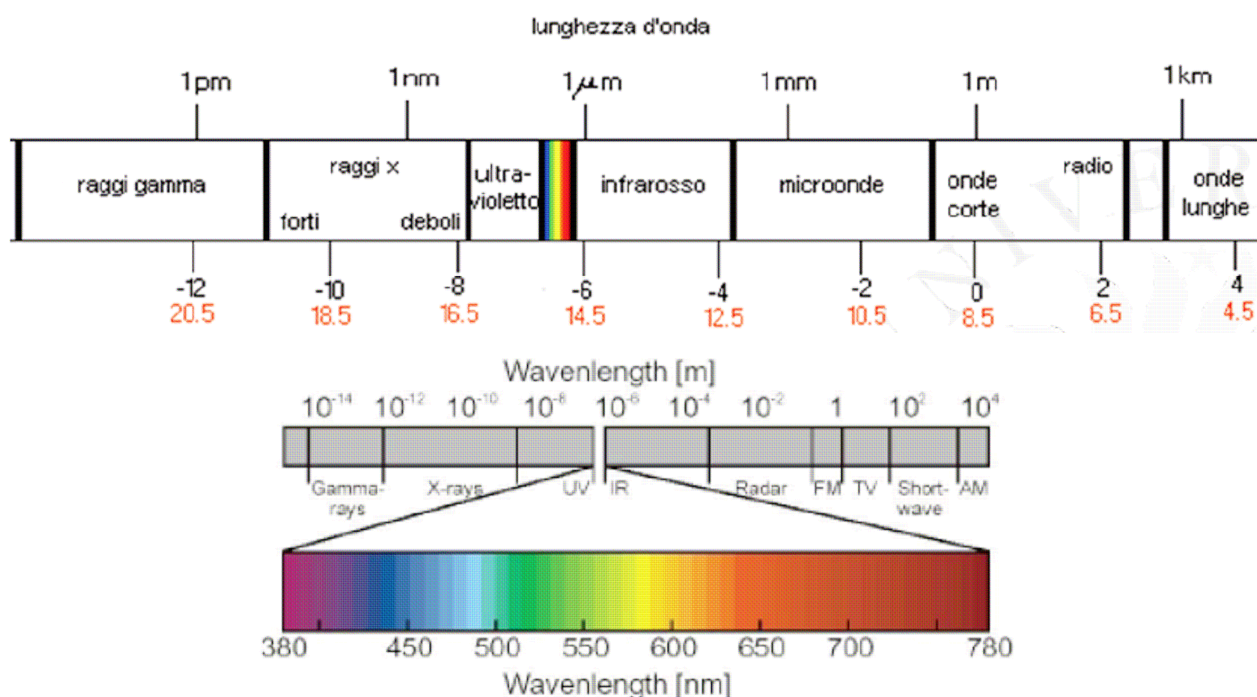


Figura 4.1.1: Spettro visibile dall'occhio umano

Le radiazioni elettromagnetiche sono caratterizzate da tre parametri:

- velocità di propagazione nel vuoto;
- lunghezza d'onda, ossia lo spazio percorso da un'onda per compiere un'oscillazione completa;
- frequenza, ossia il numero di oscillazioni nell'unità di tempo.

Il primo è un dato costante per tutte le radiazioni, gli altri due sono variabili. Lo spettro delle radiazioni visibili non ha dei limiti ben precisi, in quanto la sensibilità dell'occhio umano varia da individuo a individuo. Per questo motivo la sua estensione è stata fissata, per convenzione, nell'intervallo che va da 380 a 780 nm (1 nm (nanometro) = 1/1.000.000 m), confinato a sinistra dalle radiazioni ultraviolette (lunghezza d'onda inferiore a 380 nm) e a destra dalle radiazioni infrarosse (lunghezza d'onda superiore a 780 nm). Lo spettro delle radiazioni visibili può essere a sua volta suddiviso in sei bande principali, ciascuna corrispondente ad una determinata sensazione cromatica:

380 - 436 nm: viola

436 - 495 nm: blu

495 - 566 nm: verde

566 - 589 nm: giallo

589 - 627 nm: arancio

627 - 780 nm: rosso

4.2 Le sorgenti di luce naturale

Quella che viene identificata come luce naturale è l'effetto prodotto sull'occhio umano dall'emissione visibile del sole. Il sole, che può essere assimilato ad un corpo nero, un assorbitore ed emettitore ideale, caratterizzato da una temperatura superficiale apparente di circa 5780 K, che emette nello spazio circostante una quantità di energia raggiante elevatissima (apri a $3.88 \cdot 10^{26}$ W) in un intervallo di lunghezze d'onda compreso fra 0.2 e 3 μm . Di tale energia, soltanto una minima parte, relativa al campo di immissione compreso fra 0.4 e 0.8 μm , viene percepita dall'occhio umano come luce. Il sole al pari di una sorgente ad incandescenza, anch'esso assimilabile ad un corpo nero, è dunque una sorgente luminosa la cui emissione può essere caratterizzata attraverso le grandezze fisiche che, in campo illuminotecnica, ne descrivono la quantità e qualità cromatica: flusso luminoso, in relazione alla quantità, e spettro di emissione, in relazione alla qualità.

Il flusso luminoso, rappresenta l'effetto che ha sull'occhio l'emissione complessiva della sorgente o, in altre parole, l'entità dell'impressione luminosa prodotta dalla radiazione emessa dalla sorgente.

Lo spettro rappresenta la distribuzione del flusso luminoso per le lunghezze d'onda che sono responsabili delle differenti sensazioni cromatiche: dallo spettro di una sorgente è possibile dunque sapere quanta parte del flusso luminoso complessivo viene emessa negli azzurri, nei verdi, nei gialli e così via, fino a formarsi un'idea precisa dell'effetto cromatico che l'insieme di tale distribuzione determina sull'occhio umano. In ultima analisi lo spettro dell'emissione luminosa descrive dettagliatamente quello che viene genericamente chiamato colore della luce.

Caratteristiche quantitative e qualitative della luce vengono in ogni caso percepite sinteticamente dall'occhio umano che pesa in modo differente le diverse radiazioni monocromatiche. L'elemento sensibile dell'occhio, cioè i fotoricettori che compongono la retina, sono infatti stimolati in modo rilevante dalle lunghezze d'onda centrali della banda del visibile e, invece, in modo molto blando dalle lunghezze d'onda prossime agli estremi di tale banda.

L'andamento del peso che l'occhio attribuisce alle differenti lunghezze d'onda della radiazione è descritto da una particolare curva detta **curva della visione fotopica** (visione diurna). Tale curva, riportata in Figura 4.2.1, rappresenta l'andamento che assumono i valori del cosiddetto **fattore di visibilità relativo $V(\lambda)$** alle differenti lunghezze d'onda - CIE1986 [46].

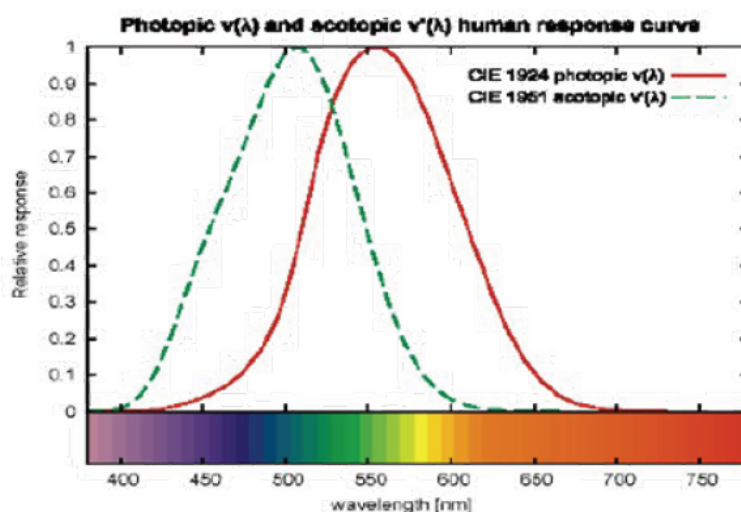


Figura 4.2.1: Fattore di visibilità relativa all'occhio umano $V(\lambda)$

Tale fattore di visibilità è un coefficiente adimensionale compreso fra 0 e 1, che rappresenta in percentuale il peso che l'occhio umano assegna a ciascuna lunghezza d'onda della radiazione nella banda del visibile. Questa pesatura mostra come l'occhio sia stimolato in modo rilevante dalle lunghezze d'onda centrale del campo visibile e molto poco da quelle prossime agli estremi. In altre parole si può dire che, a parità di illuminazione, i colori che appartengono alla zona centrale della banda (verdi, gialli e arancioni) siano ben visibili per l'occhio mentre i blu e i rossi risultano molto meno visibili. Pesando pertanto la potenza specifica della radiazione monocromatica (flusso di energia per unità di area misurato in watt) con il fattore di visibilità, e convertendo tale prodotto nell'opportuna unità di misura, si ottiene il valore di illuminamento monocromatico (flusso luminoso monocromatico per unità di area misurato in lux) che si genera sull'occhio umano. Nella figura 4.2.2 sono rappresentati gli spettri della radiazione solare globale e del flusso luminoso che essa genera:

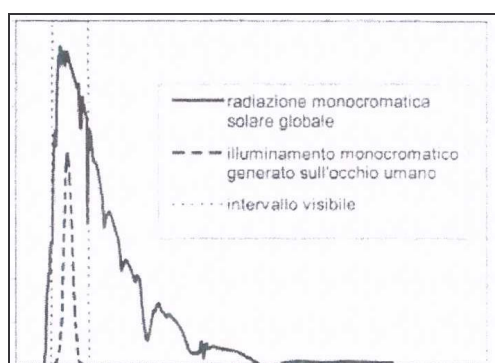


Figura 4.2.2: Spettri della radiazione solare e della corrispondente radiazione visibile

La potenza specifica della radiazione solare globale, è rappresentata dall'area sottesa dalla curva continua cioè dalla somma dei singoli contributi delle radiazioni monocromatiche che si leggono sull'asse delle ordinate espressi nell'unità di misura $W/(m^2\mu m)$. L'illuminamento generato da tale radiazione è invece rappresentato dall'area sottesa dalla curva tratteggiata, cioè dalla somma dei singoli illuminamenti monocromatici che, calcolati secondo la relazione sopra descritta, si leggono sull'asse delle ordinate espressi nell'unità di misura $klumen/(m^2 \mu m)$. Quando, come avviene nella quasi totalità dei casi pratici, l'emissione della sorgente luminosa si distribuisce su più lunghezze d'onda, il valore dell'illuminamento che si genera sull'occhio umano corrisponde alla somma degli illuminamenti monocromatici generati da ogni singola lunghezza d'onda. In altri termini esso è dato dall'integrale, rispetto alla lunghezza d'onda, del prodotto della potenza specifica de radiazione monocromatica per il fattore di visibilità. Poiché l'andamento di tale prodotto rispetto alla lunghezza d'onda è a sua volta rappresentabile con una curva, l'illuminamento complessivo che si genera sull'occhio è quindi proporzionale all'area sottostante a tale curva. Questa constatazione permette di comprendere molto facilmente quanto si è detto fin qui, facendo riferimento alla rappresentazione grafica di figura 4.2.2, dove lo spettro della potenza specifica del sole è descritto dalla linea continua, mentre l'illuminamento che essa produce da quella tratteggiata. Per quanto riguarda l'emissione del Sole fuori dell'atmosfera terrestre, flusso luminoso e distribuzione spettrale risultano, pressoché, costanti. Alla distanza media Sole-Terra, l'irradianza solare è pari a $1353 W/m^2$ (costante solare), cui corrisponde un illuminamento (flusso luminoso per unità di superficie) di 133800 lux. Fuori dell'atmosfera e rispetto ad ogni luogo della Terra, inoltre, l'emissione solare ha una direzione precisa della quale ci si può fare un'idea immaginando la luce solare come costituita da un fascio di raggi paralleli (radiazione collimata). Tuttavia, nell'attraversare l'atmosfera della Terra, la radiazione solare viene in parte *assorbita* dai gas costituenti l'atmosfera stessa (vapore acque, ozono, anidride carbonica), e in parte *diffusa* (fenomeno dello scattering): le particelle di polvere e le gocce sospese (tipiche delle zone industriali), infatti, deviano verso una moltitudine di direzioni, attraverso fenomeni di rifrazione e diffrazione, una quota, variabile in funzione della composizione dell'atmosfera, della radiazione proveniente direttamente dal sole. Questa porzione di flusso, deviata una prima volta dai gas atmosferici e dalle particelle, incontra poi altre molecole e altre particelle sospese che a loro volta la deviano tutt'intorno e così via: risulta pertanto generato un campo di *luce diffusa* che è quello che viene identificato correntemente con il termine di luce del cielo. In seguito a questo molteplice fenomeno di riflessione e diffusione il cielo, ovvero l'atmosfera della Terra, diviene una seconda sorgente di luce che è caratterizzata da flusso e spettro propri. La luce che giunge infine sulla superficie della Terra risulta dunque dalla somma della luce diffusa dal cielo, che giunge da ogni punto della volta celeste, e dalla quota di luce solare che non è stata deviata e

che conserva spettro e direzione originari (direzione di provenienza con centro nel Sole): la quantità di radiazione, rispetto ai 1353 W/m^2 incidenti sul bordo esterno dell'atmosfera, risulta attenuata in funzione della massa d'aria attraversata [45].

4.2.1 Quantità e qualità dell'illuminazione naturale all'interno degli spazi confinati

Ai fini della quantità e qualità dell'illuminazione naturale degli spazi confinati, occorre evidenziare come la luce del sole e quella proveniente dalla volta celeste (cielo) siano entrambe di grande importanza, pur differendo profondamente fra loro [45]:

- la luce del sole (componente diretta) è una luce bianca più calda (temperatura di colore pari a 5500 K), concentrata e quindi con una luminanza elevatissima, che produce contrasti molto marcati, provocando dei disturbi alla visione (abbagliamento e discomfort visivo); occupando un'area visiva ridotta (il Sole è una sorgente puntiforme posta a distanza infinita dalla Terra), tale luce è inoltre caratterizzata da una spiccata direzionalità e determina per questo una percezione spaziale degli oggetti (effetto di modellato) non ottimale, essendo questi percepiti con una luminosità eccessivamente asimmetrica, molto forte da una parte e molto debole dalla parte opposta, che impedisce di coglierne appieno la tridimensionalità
- la luce proveniente dal cielo (componente diffusa) è una luce bianca più fredda (infatti il cielo è di colore azzurro — la temperatura di colore è di 6500 K circa), con una luminanza relativamente contenuta, essendo distribuita su un'area estesa (l'intera volta celeste); essendo una luce diffusa, risulta molto uniforme (l'effetto complessivo è simile a quello di una illuminazione soffusa di tipo indiretto) e produce quindi contrasti poco marcati fra diverse parti di un locale, così come fra l'interno e l'esterno. La percezione degli oggetti che ne deriva risulta un po' piatta, per la mancanza di effetti d'accento che ne mettano in risalto le diverse parti.

La percezione ottimale della tridimensionalità degli oggetti risulta legata alla presenza di componenti di luce provenienti da direzioni diverse e caratterizzate ognuna da una certa direzionalità: l'effetto migliore si ottiene pertanto assicurando la compresenza di luce solare diretta e diffusa. Per conoscere la quantità di luce naturale che penetra all'interno degli ambienti interni, occorre come prima cosa conoscere la quantità di luce che, per ogni istante, giunge globalmente sulla Terra: tale quantità, la suddivisione nelle singole componenti diretta e diffusa e perciò anche il prevalere una sull'altra di tali componenti dipendono fortemente dalle condizioni atmosferiche e meteorologiche, in particolare dal grado di limpidezza/torpidità dell'aria e dal grado di nuvolosità. In atmosfere molto limpide la quota di radiazione solare che

arriva sulla Terra direttamente dal sole, con una direzione dunque ben precisa, risulta predominante rispetto alla quota proveniente dal cielo, che è ridotta. Viceversa, in atmosfere molto torbide la quota di radiazione solare che arriva sulla Terra direttamente dal Sole è ridotta mentre quella che proviene dal cielo è preponderante. La presenza di nuvole svolge un'azione del tutto simile, aumentando la quota parte di radiazione assorbita, rifratta e diffratta e quindi l'importanza del contributo di luce diffusa dalla volta celeste. In presenza di cielo completamente coperto, essendo il sole nascosto dalle nubi, viene a mancare la componente diretta e il campo di illuminazione è diffuso (illuminamento al suolo uniforme), con ombre e contrasti molto piatti. Le sorgenti naturali sono caratterizzate da grande variabilità del valore delle grandezze fisiche che le descrivono in quanto su tali grandezze hanno influenza, non solo i parametri geografici e temporali (per esempio la latitudine del sito, la declinazione dell'asse terrestre e l'angolo orario che corrispondono all'istante considerato), ma anche le condizioni meteorologiche riscontrate (cielo sereno o nuvoloso, limpido o torbido). Questi parametri influenzano pesantemente e in maniera dinamica, con variazioni nel tempo, spesso istantanee, sia il valore del flusso luminoso, e quindi la quantità di luce che giunge sulla terra, sia la sua distribuzione spettrale, e quindi la tonalità di colore assunta dalla luce. In sintesi, la quantità di radiazione solare globalmente incidente sulla superficie della Terra dipende da [45]:

- posizione del Sole durante l'anno: a causa della rotazione della Terra e della sua inclinazione rispetto ai raggi provenienti dal Sole, lo spessore dello strato di atmosfera attraversato dalla radiazione solare prima di incidere sulla superficie terrestre risulta diverso, a parità di ora, nei diversi periodi dell'anno: maggiore è lo spessore dello strato attraversato e minore è il contenuto energetico della radiazione incidente a causa dei più consistenti processi di assorbimento e diffusione [Figura 4.2.3].

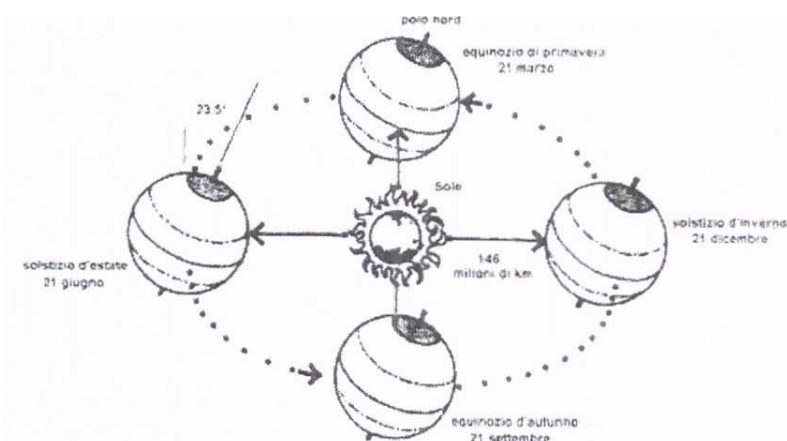


Figura 4.2.3: Variazione della quantità di luce naturale incidente sulla superficie terrestre in funzione della posizione della Terra rispetto al Sole nei diversi momenti dell'anno

-
- posizione del Sole durante il giorno: al variare dell'ora del giorno cambia la posizione del Sole rispetto alla Terra (basso sull'orizzonte poco dopo l'alba e poco prima del tramonto, alto sull'orizzonte in corrispondenza del mezzogiorno) e varia quindi lo spessore dello strato di atmosfera attraversato [Figura 4.2.4]:

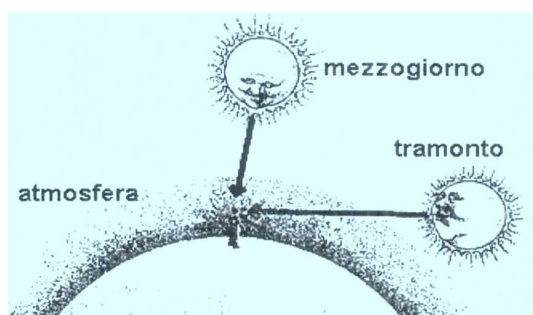


Figura 4.2.4:

Variazione della quantità di luce naturale incidente sulla superficie terrestre nei diversi momenti della giornata

- condizioni meteorologiche e climatiche dell'area geografica considerata: il maggior o minor grado di nuvolosità, così come il maggior o minore livello di torpidità dell'atmosfera (inquinamento) attenuano in maniera diversa la quantità di radiazione solare incidente sulla superficie terrestre.

4.3 Parametri illuminotecnici

L'illuminotecnica deriva i suoi principi fondamentali e le grandezze in gioco dalla fotometria, disciplina che studia la luce in funzione dello stimolo prodotto sull'occhio umano. Allo scopo di determinare le proprietà illuminotecniche fondamentali per l'illuminamento degli interni si definiscono le seguenti grandezza fondamentali:

- Flusso luminoso
- Intensità luminosa
- Luminanza
- Illuminamento
- Radianza

Flusso luminoso ed intensità luminosa sono caratteristiche proprie della sorgente luminosa, mentre l'illuminamento rappresenta l'effetto da questa prodotto su una superficie ricevente; luminanza e radianza sono rappresentative sia delle sorgenti illuminanti che delle superfici riceventi; l'illuminamento e luminanza sono le grandezze utilizzate nelle normative per il benessere visivo:

- quanta luce occorre per un compito visivo (illuminamento)
- contenimento dei fenomeni di abbagliamento (luminanza)

Flusso luminoso

Il flusso luminoso Φ , descrive la quantità percepibile di energia luminosa emessa da una sorgente nell'unità di tempo. Per energia luminosa si intende l'energia della radiazione elettromagnetica emessa nel visibile, per convenzione, nell'intervallo da 380 a 780 nm. Per le lampade la normativa IEC prevede che la misurazione del flusso luminoso emesso venga effettuata dopo 100 ore di funzionamento.

Il flusso luminoso non dà informazioni sulla qualità della luce, né sulla sua distribuzione nello spazio. L'unità di misura del flusso luminoso è il lumen [lm] che corrisponde al flusso luminoso emesso da una sorgente di luce puntiforme di intensità pari a 1 candela [cd] uscente da una superficie di 1 m^2 , intercettata su una superficie sferica di raggio pari a 1 metro.

$$(4.3.1) \quad \Phi = \int_0^{\infty} k \cdot (\lambda) \cdot Q \cdot d\lambda$$

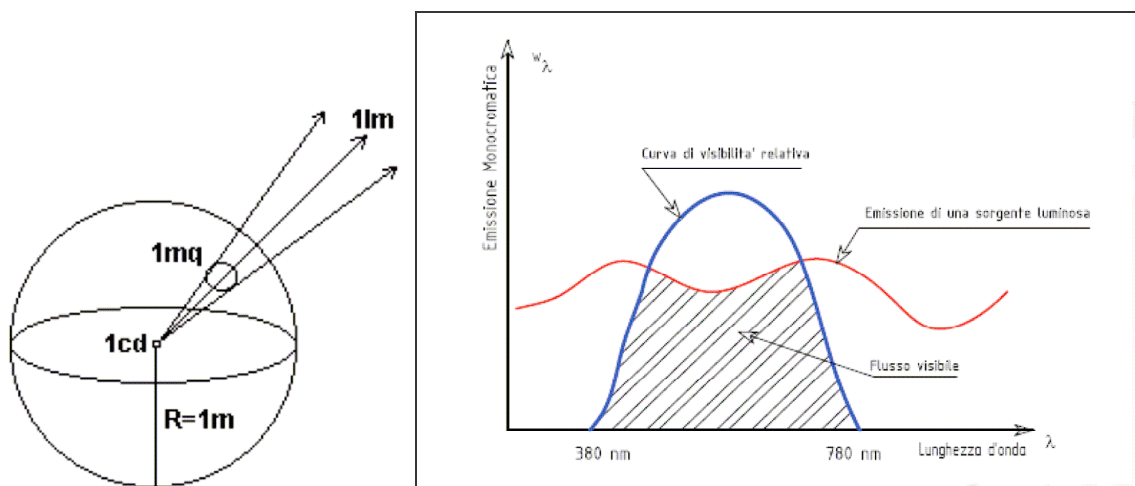


Figura 4.3.1: Rappresentazione grafica della definizione di flusso luminoso

L'intensità luminosa

L'intensità luminosa I , è un vettore che ha per modulo la quantità di energia emessa nell'unità di tempo per angolo solido e per direzione quella radiale, assumendo la sorgente puntiforme. In illuminotecnica l'angolo solido viene normalmente indicato con Ω .

$$(4.3.2) \quad I = \frac{\Delta\phi}{\Delta\Omega} \Rightarrow \phi = \int_{\Omega} I d\Omega$$

L'unità di misura dell'intensità luminosa è la candela [cd]. A differenza di altre intensità, poiché al denominatore vi è l'angolo solido, essa è una caratteristica propria della sorgente e non della distanza tra sorgente e ricevitore.

Una sorgente luminosa puntiforme emette radiazioni della stessa intensità in tutte le direzioni, quindi il suo flusso luminoso si propaga uniformemente come generato dal centro di una sfera.

Le sorgenti reali hanno una direttività propria, di cui vengono fornite le curve fotometriche, ossia le sezioni sui due piani principali, ortogonali tra loro, della distribuzione dell'intensità sull'angolo solido, detta solido fotometrico.

Il solido fotometrico: rappresenta la figura geometrica delimitata da una superficie chiusa formata dal luogo dei punti estremi di segmenti aventi lunghezza proporzionale all'intensità luminosa e centro nella sorgente.

La curva fotometrica è l'intersezione del solido fotometrico con un piano passante per il centro (se il solido fotometrico presenta una simmetria di rotazione intorno ad un asse, risulta completamente descritto da un'unica curva fotometrica)

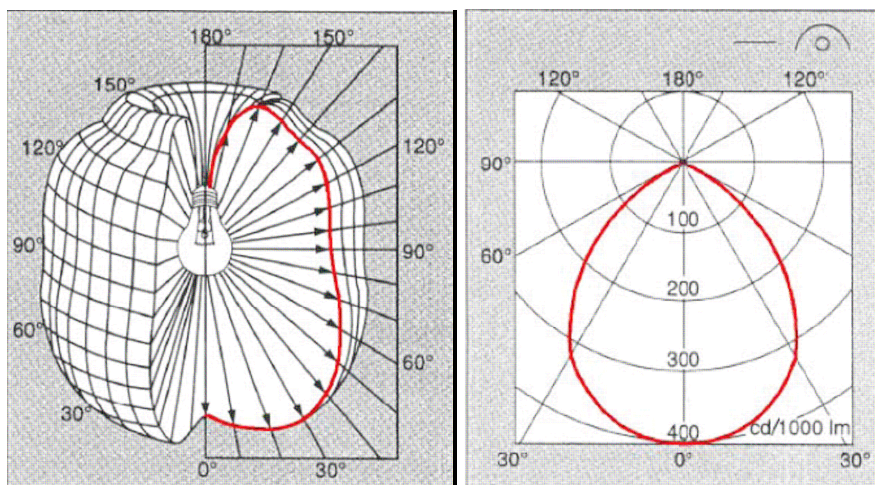


Figura 4.3.2: Esempio di curva fotometrica di una lampada

Luminanza

La luminanza L , è definita il rapporto tra l'intensità luminosa emessa da una superficie in una data direzione e l'area apparente di tale superficie. L'area apparente è la proiezione della superficie su un piano normale alla direzione considerata.

$$(4.3.3) \quad L = \frac{I_a}{S_{app}} = \frac{I_a}{S_{reale} \cdot \cos \vartheta} = \frac{I_n \cdot \cos \vartheta}{S_{reale} \cdot \cos \vartheta} = \frac{I_n}{S_{reale}}$$

Dove S rappresenta la superficie emittente o riflettente, mentre ϑ rappresenta l'angolo tra la normale alla superficie e la congiungente superficie-ricettore

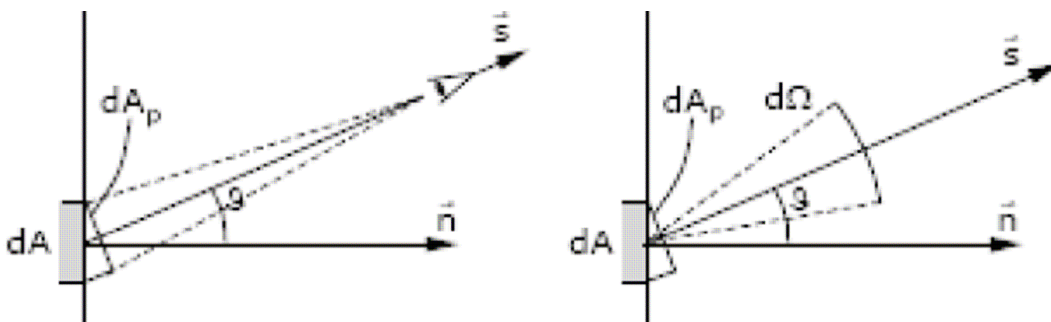


Figura 4.3.3: Rappresentazione grafica della definizione di luminanza

La luminanza è la grandezza illuminotecnica più direttamente correlata alla visione: essa tiene conto non solo della quantità di energia che raggiunge l'occhio, ma anche della sensazione di abbagliamento o di fastidio che essa può produrre. La luminanza quindi è un parametro importante nel calcolo illuminotecnico, in quanto se essa supera certi valori si crea il fenomeno dell'abbagliamento (Figura 4.3.4):

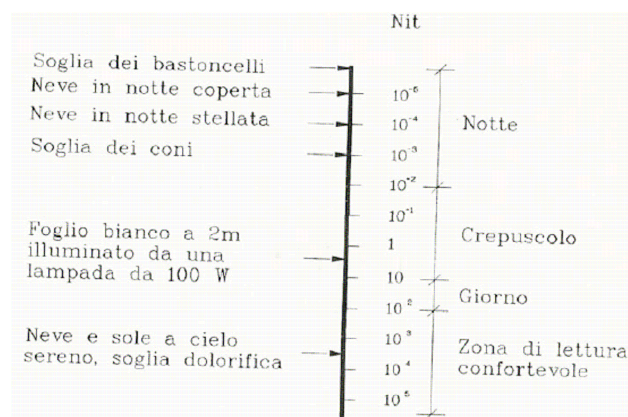


Figura 4.3.4: Range di variabilità della luminanza

Normalmente la luminanza è espressa in Nit [cd/m^2]:

$L < 10^{-3} \text{ cd}/\text{m}^2$ si ha visione scotopica

$L > 3 \text{ cd}/\text{m}^2$ si ha visione totalmente fotopica

Illuminamento

L'illuminamento pone in relazione le sorgenti luminose con i corpi illuminanti.

L'illuminamento di una superficie consiste in una grandezza scalare corrispondente alla densità di flusso incidente sulla superficie considerata, ossia:

$$(4.3.4) \quad E = \frac{d\phi}{dA} = \frac{d\phi(\vec{i} \cdot \vec{n})}{dA} = \frac{I_s \cdot d\Omega}{dA} = \frac{I_s \cdot \cos \vartheta}{R^2}$$

L'illuminamento si misura in lux [lumen/m^2] e si indica con la lettera E. Il lux è definito anche come il flusso luminoso emesso da una sorgente luminosa (situata al centro di una sfera) con un'intensità di 1 cd che illumina una superficie di 1 m^2 .

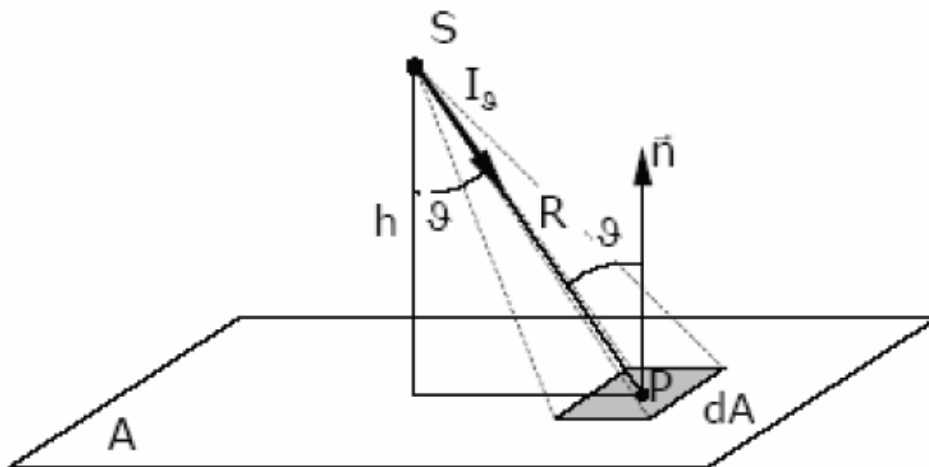


Figura 4.3.5: Rappresentazione grafica della definizione di illuminamento

L'illuminamento tiene conto del ricevitore: superfici a distanze diverse e con inclinazioni diverse rispetto ad una sorgente che irradia un'intensità fissa, in quella direzione, hanno illuminamenti diversi.

Radianza

La radianza M , rappresenta la radiazione visibile emessa da una superficie riflettente; essa è correlata alla luminanza della sorgente, ed è definita:

$$(4.3.5) \quad M = \frac{d\phi}{dS} = E \cdot r$$

Come mostra l'equazione 4.3.5 la radianza è anche pari al prodotto dell'illuminamento E ricevuto, per il fattore di riflessione della superficie r .

Se $r = 1$ (superfici bianche perfettamente riflettenti) $M=E$. Per superfici lambertiane (riflessione e trasmissione perfettamente diffuse) vale la relazione $E = \pi L$, e quindi:

$$(4.3.6) \quad L = \frac{r \cdot E}{\pi}$$

L'unità di misura della radianza è $[\text{lumen/m}^2] = [\text{lux bianco}]$.

Efficienza luminosa

Allo scopo di descrivere la capacità di una sorgente luminosa di trasformare la potenza elettrica in flusso luminoso si definisce l'efficienza luminosa:

$$(4.3.7) \quad E_l = \frac{\Phi}{P}$$

L'efficienza luminosa E_l si esprime in $[\text{lm/W}]$ e rappresenta l'efficienza di una lampada attraverso il rapporto tra il flusso luminoso $[\text{lm}]$ emesso da una sorgente luminosa e la potenza elettrica assorbita P [Watt].

CAPITOLO 5

MISURA DELLA QUALITA' ILLUMINOTECNICA

5.1 La misura dell'illuminamento

Il luxmetro è lo strumento che consente di eseguire il rilievo della quantità di luce, sia essa naturale o artificiale, incidente su una determinata superficie. La parte sensibile di un luxmetro, preposta a ricevere il flusso luminoso, è costituita dalla superficie di un dispositivo fotorilevatore, tipicamente una cellula fotoelettrica. Il funzionamento dello strumento è tarato in base a:

- corrispondenza con la curva di visibilità relativa dell'occhio umano $V(\lambda)$, in modo da tenere conto il più possibile del comportamento fisiologico dell'apparato visivo umano.
- sensibilità del dispositivo fotorilevatore impiegato
- corrispondenza con la “legge del coseno”, vale a dire la corrispondenza con la variazione del valore di illuminamento in funzione dell'inclinazione della superficie sulla quale tale valore viene misurato rispetto alla direzione di incidenza della luce: questa variazione è, infatti, di tipo cosinusoidale, tale per cui risulta: $E = E \cdot \cos \vartheta$, essendo ϑ l'angolo di inclinazione della superficie rispetto ad una giacitura normale al flusso luminoso incidente; per superfici normali alla direzione del flusso l'illuminamento è massimo ($\vartheta = 0 \Rightarrow \cos \vartheta = 1$), mentre per superfici progressivamente più inclinate (al crescere di ϑ), l'illuminamento decresce fino a diventare nullo per superfici parallele al flusso luminoso ($\vartheta = 90 \Rightarrow \cos \vartheta = 0 \Rightarrow$ luce radente).

Il corpo misuratore contiene invece l'elettronica di elaborazione del segnale elettrico trasmesso dalla sonda ed un indicatore digitale a cristalli liquidi, sul quale viene visualizzato il valore di

illuminamento in lux (già convertito dal segnale elettrico entrante). Le funzioni di comando sono limitate all'accensione e spegnimento dello strumento e alla memorizzazione della lettura e sono impartiti tramite una piccola tastiera a membrana o tramite pulsanti sul dorso dello strumento stesso.

Un circuito di autoazzeramento, di cui sono dotati i modelli più comuni, assicura la ripetibilità delle misure anche per bassissimi livelli di illuminamento presenti. Le prestazioni possono variare con il tipo di strumento e la sua finalità: luxmetri da esterni hanno un range di valori misurabili compreso fra 0,01 e 200.000 lux, mentre luxmetri ad interni sono sensibili a intervalli più ristretti di quantità di luce, solitamente 0,01÷ 20.000 lux, fino a intervalli 0,01÷ 5.000 lux tipici di luxmetri specifici per misure all'interno di modelli in scala. Normalmente il range ottimale viene individuato in maniera automatica dall'apparecchio, ma modelli più sofisticati hanno anche la possibilità di scelta della scala manuale.

5.1.1 Il metodo di misura

Al fine di conoscere il livello di illuminamento e la relativa distribuzione spaziale, il primo passo consiste nella individuazione delle superfici di interesse e nella definizione di una griglia di punti significativa: le superfici di interesse sono rappresentate dai piani utili, sui quali cioè viene svolto il compito visivo. Si tratta dunque di piani sia orizzontali, sia verticali. In relazione alla mappatura di illuminamento, è evidente che tanto maggiore è il numero di punti di misura e tanto più dettagliata è la conoscenza della distribuzione spaziale della luce naturale in ambiente. La norma UNI 10380 [UNI 1994] precisa il numero di punti minimo della griglia in funzione delle dimensioni del locale. Tale prescrizione si riferisce ad una mappatura dell'interno ambiente ed è relativa al campo dell'illuminazione artificiale, ma può essere estesa al rilievo della luce naturale. La definizione del numero di punti di misura n si basa sull'indice del locale K :

$$(5.1.1) \quad K = \frac{a \cdot b}{h \cdot (a + b)}$$

a: lunghezza in pianta del locale [m]

b: larghezza in pianta del locale [m]

h: altezza del locale, dal piano di lavoro al soffitto [m]

per $K < 1 \quad \rightarrow \quad n = 4$

per $1 < K < 2 \rightarrow n = 9$

per $2 < K < 3 \rightarrow n = 16$

per $K < 3 \rightarrow n = 25$

Il numero di punti che si ottiene deve essere ripartito in maniera omogenea lungo i due lati dell'ambiente, in maniera tale che il rapporto dei lati di ogni modulo della maglia non superi il rapporto 1:2. Le misure di illuminamento vanno effettuate al centro di ciascun modulo della maglia. La media dei dati rilevati costituisce l'illuminamento medio relativo alla superficie in esame. Prima di effettuare le misurazioni è importante lasciar trascorrere un certo intervallo di tempo, compreso fra i 5 e i 15 minuti, in modo da lasciare che le cellule si adattino al livello di illuminamento presente. Talvolta potrebbe risultare problematico mappare in maniera uniformemente distribuita l'ambiente; altre volte, al contrario, in presenza ad esempio di superfici vetrate a nastro che si estendono lungo l'intera parete di involucro, un rilievo spaziale completo dell'illuminamento potrebbe essere superfluo.

5.1.2 Strumentazione utilizzata in San Vitale – Babuc/A

Al fine di misurare l'illuminamento prodotto dalla luce naturale all'interno di San Vitale, è stato utilizzato come luxmetro, il Babuc/A versione 5.07 della LSI Lastem, con multiacquisitore a 11 ingressi e 20.000 campioni di memoria.



Figura 5.1.1: Babuc/A – LSI Lastem

La linea strumentale BABUC/A (Figura 5.1.1) consiste in un insieme di strumenti, sensori, accessori e programmi software per l'acquisizione, visualizzazione, memorizzazione ed elaborazione di una grande varietà di grandezze tecniche, gestite in un ambiente informativo unitario. Gli strumenti BABUC hanno ingressi universali, cioè possono ricevere qualsiasi combinazione di sensori di tipo diverso, avendo la capacità di riconoscerli automaticamente e di predisporre in conformità le proprie funzionalità. A seconda delle modalità di utilizzo, i livelli di ricchezza informativa realizzabili sono, in ordine crescente:

- Visualizzazione immediata di tutti i valori istantanei e delle elaborazioni significative della misura in corso.
- Memorizzazione dei dati, costituzione di un archivio locale dei rilievi eseguiti, stampe selettive dei dati e di elaborazioni significative.
- Trasferimento dell'archivio locale su PC, costituzione di archivi di grandi dimensioni, possibilità di elaborazioni con programmi applicativi specialistici o con l'ausilio di fogli elettronici.

Gli strumenti BABUC si prestano molto bene all'utilizzo sia come strumenti "portatili" per informazioni immediate, sia come stazioni "fisse" o "semifisse" di raccolta dati anche per lunghi periodi: nel caso in questione, il Babuc è stato utilizzato come luxmetro portatile.

La misura dell'illuminamento ha permesso di ricostruire la basilica, non solo acusticamente, mediante il processo di auralizzazione con tecnica stereo dipolo, ma anche da un punto di vista illuminotecnico, attraverso la costruzione di un modello fotorealistico 3D, che sfrutta algoritmi che simulano il comportamento fisico della radiazione luminosa, i cui dati di partenza sono coincisi con l'acquisizione delle misure puntuali di illuminamento nei punti costituenti il percorso stabilito per la rappresentazione audio-visiva. In particolare, il luxmetro è stato posizionato nei 10 punti in cui erano stati posti i ricevitori acustici, dove si collocavano i fedeli, distribuiti tra il piano terra ed il matroneo, e nei punti intermedi del percorso audio-video, definito in modo tale da realizzare un cammino, di un ipotetico visitatore, che ripercorra proprio i punti in cui sono state eseguite le misure acustiche (vedi Figura 5.1.2):

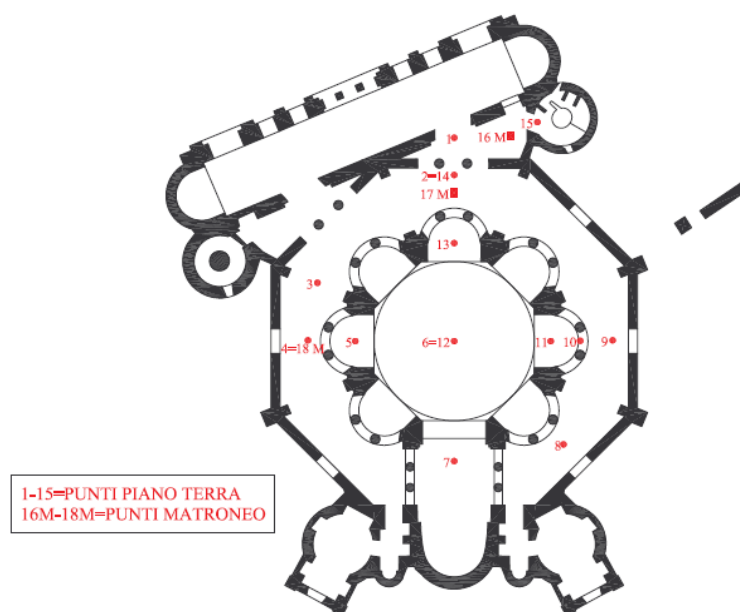


Figura 5.1.2: Punti di misura dell'illuminamento campionati in San Vitale

L'illuminamento interno è stato misurato a finestre e porte chiuse ed essendo, ai fini dello studio, necessario solo mappare i punti appartenenti al percorso del modello fotorealistico, non è stato calcolato, preliminarmente, l'indice del locale K, su cui si basa la definizione del numero di punti di misura n [45]. Nella Tabella 5.1.1 vengono riportati i valori di illuminamento nei punti campionati:

PUNTI DI MISURA	LUX MISURATI
1	38
2	26
3	18
4	27
5	28
6	40
7	27
8	24
9	260
10	220
11	83
12	40
13	20
14	26
15	10
16	30
17	28
18	30

Tabella 5.1.1: Valori dell'illuminamento in San Vitale

5.2 Strumenti per l'analisi dell'illuminazione

L'utilizzo di un programma di calcolo numerico rende possibile il perseguimento di due tipi di obiettivi, complementari per il progetto della luce naturale:

- produrre una visualizzazione realistica dell'oggetto analizzato, in modo da poter osservare il modo in cui l'ambiente in esame appare. L'approccio è dunque di tipo qualitativo (*modello fotorealistico*)
- produrre un modello che permetta la precisa determinazione delle grandezze fotometriche (livelli assoluti e distribuzione nello spazio) caratterizzanti la luce (essenzialmente illuminamenti e luminanze). L'approccio è dunque di tipo quantitativo (*modello fotometrico*).

Nella quasi totalità dei casi i programmi di illuminotecnica, nascono come strumento di progetto della luce artificiale, per cui, partendo dalle indicatrici di emissione degli apparecchi di illuminazione e dalla proprietà di riflessione e trasmissione luminosa dei materiali presenti nel locale in esame, predicono i livelli di illuminamento e luminanza e la loro distribuzione spaziale; i più complessi estendono il calcolo anche alla determinazione delle proprietà colorimetriche delle superfici o alle condizioni di abbagliamento. Sono pochi, tuttavia, i programmi dotati degli algoritmi necessari per tenere conto degli effetti e dell'influenza della dinamica della luce naturale [45].

5.2.1 Uso di modelli teorici di sole e di cielo per la progettazione

Per il calcolo delle grandezze illuminotecniche all'esterno ed all'interno degli ambienti confinati, è necessaria la conoscenza puntuale della sorgente luminosa: nel caso di luce, naturale, pertanto, risulta indispensabile la disponibilità di dati sull'illuminamento al suolo dovuto al sole e sulla distribuzione di luminanza della volta celeste (e quindi dell'illuminamento al suolo dovuto al cielo). Il sole e la volta celeste costituiscono due sorgenti luminose naturali (la seconda intesa come sorgente secondaria) profondamente diverse in termini sia quantitativi, sia qualitativi: diversi sono infatti i livelli di illuminamento prodotti sulla superficie terrestre, le dimensioni (una puntuale, l'altra superficiale), la direzionalità dell'illuminazione, la temperatura di colore e la ripartizione spettrale, i potenziali disagi (insostenibilmente abbagliante il sole, più "morbida" e uniforme (a luce proveniente dalla volta celeste)). Nella pratica della progettazione, al fine di rendere reale l'importante idea di basare le scelte di progetto, sin dalle prime fasi concettuali, sulla conoscenza dei contributi di illuminazione naturale, risulta fondamentale per il progettista avere degli strumenti per poter

quantificare la disponibilità di luce naturale proveniente sia dal sole, sia dalla volta: quest'ultima è peraltro necessaria per calcolare il fattore di luce diurna, parametro di verifica nel campo dell'illuminazione naturale prescritto dalla normativa italiana (vedi paragrafo 5.4). L'illuminamento prodotto dalla volta celeste su una superficie varia in funzione al livello di luminanza caratterizzante le diverse parti di cielo.

La distribuzione di luminanza dipende da diversi fattori:

- posizione del sole nel cielo (legata all'ora del giorno, al momento dell'anno e al sito geografico considerati).
- condizioni meteorologiche (presenza o assenza di nuvole, spessore degli strati di nuvole). Le principali condizioni fanno riferimento a:
 - *cielo sereno*, in cui la distribuzione di luminanza varia in funzione della posizione del sole;
 - *cielo coperto a luminanza costante*, in cui la distribuzione di luminanza è uniforme (tutti i punti del cielo sono caratterizzati dallo stesso valore di luminanza: è la tipica condizione di un cielo nebbioso);
 - *cielo coperto a luminanza variabile*, in cui la distribuzione di luminanza varia in funzione dell'angolo di altezza solare;
 - *cielo parzialmente coperto*, in cui la distribuzione di luminanza varia in funzione della posizione del sole e del grado di nuvolosità .
- grado di torbidità dell'atmosfera (più o meno limpida, a seconda del contesto urbano o di campagna e del livello di inquinamento).

Sin a partire dagli anni '40 [48-50], sulla base di valori di luminanza misurati sperimentalmente, sono stati definiti alcuni algoritmi riferiti a condizioni standardizzate di illuminazione naturale ed in grado di fornire la distribuzione di luminanza della volta celeste in termini relativi, vale a dire in termini di rapporto fra il valore di luminanza di un punto generico della volta celeste ed il valore di luminanza allo zenit. Occorre sottolineare come nei diversi modelli di cielo esistenti in letteratura non sia mai inclusa la componente solare diretta, solitamente valutata separatamente, ma soltanto la luminanza circumsolare e quella della volta celeste. L'uso di modelli di cielo risiede nel fatto che permettono di fare riferimento a condizioni standard, codificate come significative: è, questo, il modo migliore per poter confrontare fra loro soluzioni progettuali diverse. I primi modelli di cielo ad essere definiti hanno fatto riferimento a condizioni meteorologiche estreme, ovvero il cielo completamente sereno o il cielo completamente coperto: in tale ottica la CIE (Commission Internationale de L'Eclairage) [46], ha normalizzato il modello di cielo sereno come "Clear Standard Sky" (nel

1965) e quello coperto come “Overcast Standard Sky” (nel 1955), ampiamente utilizzati per la valutazione degli illuminamenti negli ambienti confinati.



Figura 5.2.1: Differenti condizioni di cielo fotografate

Nel caso di San Vitale, le analisi di illuminamento ed ombreggiamento effettuate con Ecotect hanno impiegato un cielo coperto, “Overcast Standard Sky” (Figura 5.2.1 b).

5.3 Programmi

5.3.1 Ecotect

Ecotect costituisce uno strumento per lo studio del comportamento energetico ed illuminotecnico degli edifici e dell'ambiente ad essi limitrofo: il programma scaturisce dall'iniziativa dello statunitense Andrew Marsh, ed è il principale prodotto della società di software gestita dallo stesso Marsh “Square One”, recentemente acquisita dalla multinazionale Autodesk.

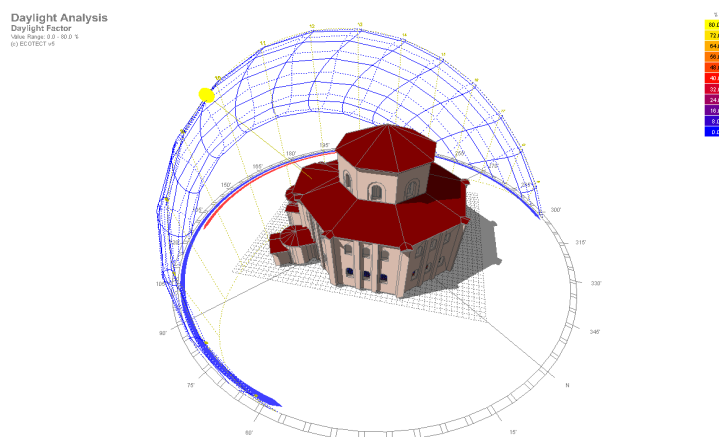


Figura 5.3.1: Modello della Basilica di San Vitale analizzato in Ecotect

Il pacchetto copre un vasto panorama di funzioni di simulazione e di analisi, utili nel comprendere a fondo in che modo un edificio può comportarsi a livello di comfort e di consumi energetici. Dal punto di vista dell'analisi dei contributi provenienti da fonti di illuminazione esterna, quali il percorso apparente del sole, Ecotect fornisce elementi per una simulazione geometrica delle ombre su fascia oraria definita dall'utente e sulle intensità luminose (esprese dal fattore di luce diurna) presenti in differenti punti dell'edificio in esame.

Tuttavia si evidenzia che il software è stato sviluppato nell'intenzione di fornire uno strumento di analisi destinato ad un approccio qualitativo dei valori ottenibili mediante calcolo, sia per condizioni inerenti la progettazione ex-novo di ambienti sia per l'analisi di contesti architettonici esistenti.

E' presente la possibilità di modellare situazioni geometriche anche complesse, così come è stato fatto per la Basilica di San Vitale, che poi possono essere trasmesse mediante formati di interscambio dati con altri software di analisi illuminotecnica più blasonati o precisi, tra i quali si ricorda Radiance.

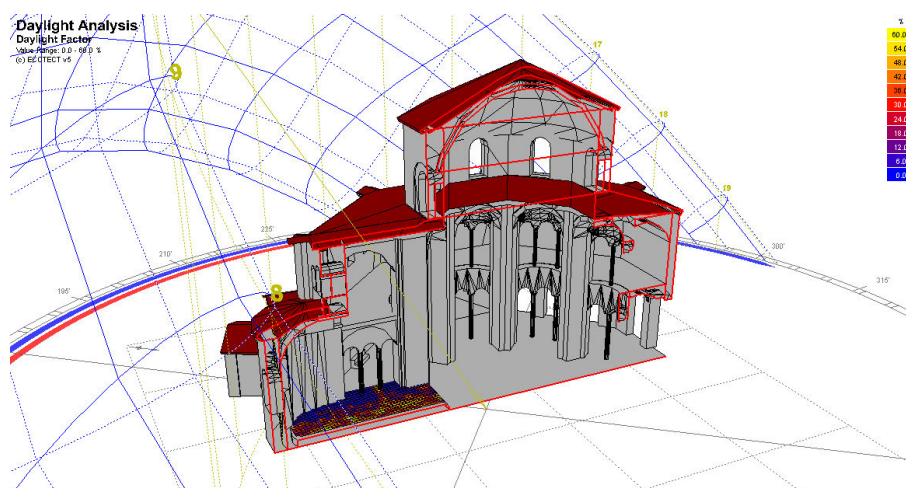


Figura 5.3.2: Sezione della Basilica di San Vitale analizzata in Ecotect

5.3.2 3D Studio max

3D Studio Max (chiamato anche 3ds Max o solo Max) è un programma di grafica vettoriale tridimensionale e animazione, realizzato dalla divisione Media & Entertainment di Autodesk. Sviluppato come successore di 3D Studio per DOS dalla divisione di Autodesk specificatamente preposta (la vecchia Kinetix), ha acquisito il nome di produzione Discreet Logic nel 1998, quando questa società è stata rilevata da parte di Autodesk.

3D Studio Max è uno dei più diffusi software di modellazione tridimensionale per numerose ragioni, tra le quali, le potenti capacità di editing e la sua architettura di plugin, routine di programmi realizzati da terze parti, destinati ad integrare funzioni non presenti nella versione base del programma.

Il modellatore interno, ovvero il modulo che presiede alla generazione di elementi tridimensionali a partire da primitive grafiche, è strutturato secondo sette metodi base di modellazione:

- Modellazione a partire da primitive standard, dove i contorni geometrici sono generati usando cubi, sfere, cono, cilindri e altri oggetti predefiniti. Si possono successivamente applicare operatori booleani di intersezione, sottrazione e unione per ottenere geometrie più complesse.
- NURMS (Non-Uniform Rational MeshSmooth), implementazione della modellazione mediante suddivisione di superfici, un metodo che sta affiancandosi alla modellazione mediante NURBS (Non-Uniform Rational B_Splines) sia per modelli con molti poligoni che quelli a basso numero di poligoni. Alla base di questo metodo vi è la geometrizzazione mediante poligoni alla quale è possibile applicare il meshsmooth NURMS dove che ogni vertice ed ogni bordo ha un peso associato. Il peso simboleggia quanto la forma finale è affetta dal vertice/bordo in questione. È importante notare che i modelli NURMS, mentre sono ottimali per la creazioni di immagini, video e prototipi, sono inutilizzabili in produzione di componenti fisiche (stampe 3D o modellazioni su macchine a controllo numerico), in quanto completamente privi di informazioni geometriche. La modellazione mediante NURMS è più semplice della modellazione mediante spline, alla base delle più note NURBS, e può essere utilizzata con successo anche da utilizzatori non esperti pur fornendo una buona scalabilità ed una buona possibilità di controllo agli artisti con più esperienza.
- Surface tool, originariamente un plugin, utile nella creazione delle comuni spline 2D gestite poi da un modificatore chiamato "surface" ("superficie"). Questo modificatore crea una superficie ogni 3 o 4 vertici in una griglia, generando forme spaziali.
- NURBS, acronimo che sta per Non Uniform Rational B-Splines, traducibile in "B-Splines razionali non uniformi", una classe di curve geometriche utilizzate in computer grafica per rappresentare curve e superfici complesse. Una NURBS è la rappresentazione matematica che un programma software crea di un oggetto, per definirne accuratamente la forma.

- Modellazione con poligoni, dove il modellatore converte una primitiva in poligoni ed utilizzando strumenti come lo smusso, l'estrusione ed il taglio dei vertici o delle facce, aggiunge dettagli e raffina il modello. È possibile inoltre attaccare due o più poligoni e "collassare" i vertici comuni in modo da poter mantenere unità nella superficie risultante. Questa tecnica è molto utilizzata nel campo dei videogiochi perché permette un controllo molto accurato su ogni poligono e quindi consente una forte ottimizzazione.
- Modellazione con mesh: una mesh poligonale viene definita da una matrice la cui dimensione viene determinata dai valori delle dimensioni M ed N. $M \times N$ equivale al numero di vertici che devono essere specificati e che costituiscono le superfici per gli oggetti componenti del modello.
- Modellazione con patch, una tecnica molto simile a quella spline. La differenza principale è che al posto di creare prima un telaio di spline e poi generare la superficie sopra di esso, con le Patch la superficie è immediatamente visibile. Rispetto alla modellazione poligonale e quella spline, la modellazione patch è meno diffusa.

Nello specifico, è stato utilizzato il software 3D Studio Max Design 2009, versione che ha introdotto il modulo "Lighting Analysis Assistant", un sofisticato sistema di controllo che aiuta a gestire gli strumenti offerti dal programma per l'analisi della luce presente in una scena (Figura 5.3.3).

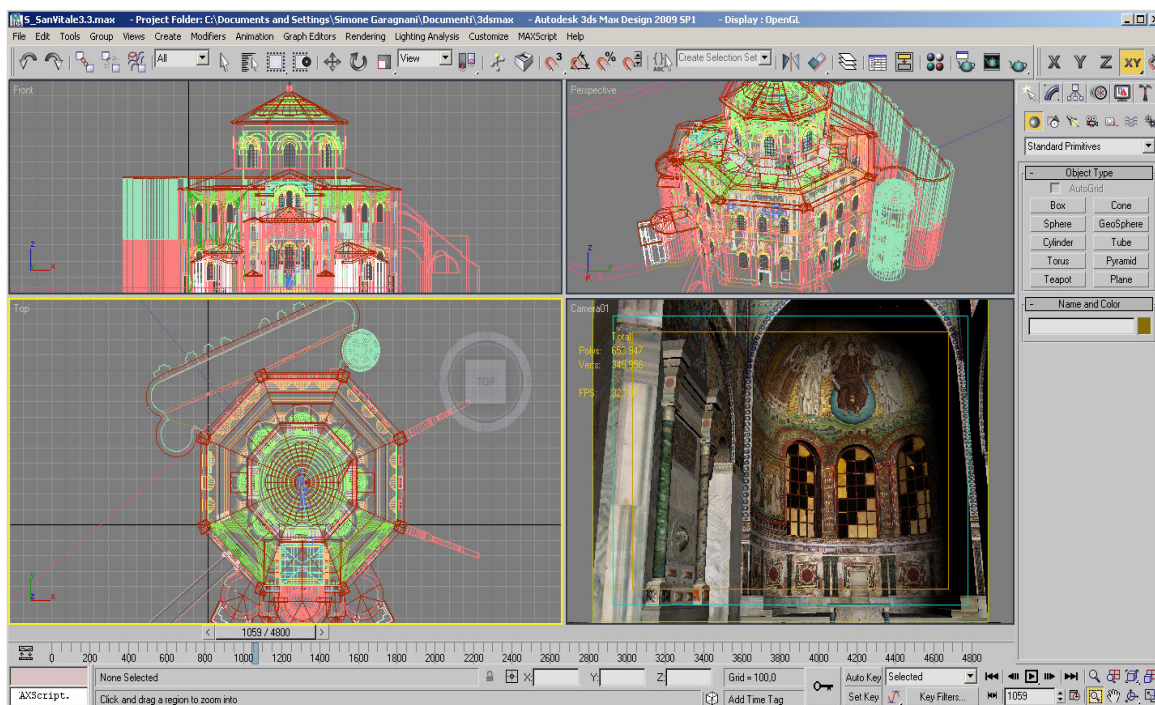


Figura 5.3.3: Modello della Basilica di San Vitale generato in 3D Studio Max Design 2009

5.4 Valutazione dei parametri illuminotecnici

Mediante strumenti di calcolo informatizzati, Ecotect e 3D Studio Max, sono stati verificati ed analizzati valori per i contributi di illuminazione esterna incidenti all'interno della Basilica. Tali studi sono serviti per la ricostruzione visuale e geometrica della situazione attuale esistente all'interno di San Vitale [54]. Il modello tridimensionale ottenuto da un processo di modellazione tridimensionale digitale, al quale sono state associate delle mappature fotografiche acquisite da una campagna di rilievo speditiva, ha successivamente tenuto conto delle valutazioni di natura illuminotecnica, per simulare condizioni verosimili nel periodo di costruzione originario, durante il VI secolo.

I grafici che seguono, da 5.4.1 a 5.4.4, costituiscono un'elaborazione analitica per la valutazione degli effetti dell'illuminamento diurno all'interno della Basilica. Scopo ultimo dell'indagine numerica è stato quello di valutare come l'orientamento geografico e la disposizione delle aperture originali potessero influire sul rapporto di luminosità entrante.

Il software Ecotect permette di valutare qualitativamente il fattore di illuminamento diurno, necessario alla comprensione della situazione geometrica e luminosa di abside, navate e matroneo.

Il fattore di luce diurno è infatti definito come il rapporto, espresso in termini percentuali, tra la luminosità in un dato punto all'interno di un edificio e l'illuminazione all'esterno, nelle medesime e simultanee condizioni di cielo non ostruito. Una volta determinati per un specifico punto il fattore di luce diurno (Daylight Factor DF) e il valore di luminosità del cielo di progetto (Design Sky DS), la semplice moltiplicazione dei due valori fornisce il livello di illuminazione dovuto alla luce naturale espresso in [cd]:

$$(5.4.1) \quad L_{\text{punto}} = \frac{DF_{\text{punto}}}{100} \cdot L_{\text{DS}}$$

% OMBREGGIAMENTO	20 MARZO	21 GIUGNO	22 SETTEMBRE	21 DICEMBRE
FINESTRA EST	100	100	100	100
FINESTRA CETRALE	32	56	36	24
FINESTRA OVEST	21	53	21	16

Tabella 5.4.1: % di ombreggiamento delle 3 finestre absidali alle ore 12 nelle giornate di equinozio e solstizio

Daylight Analysis
Daylight Factor
Value Range: 0.0 - 80.0 %
(c) ECOTECT v5

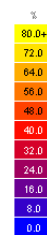
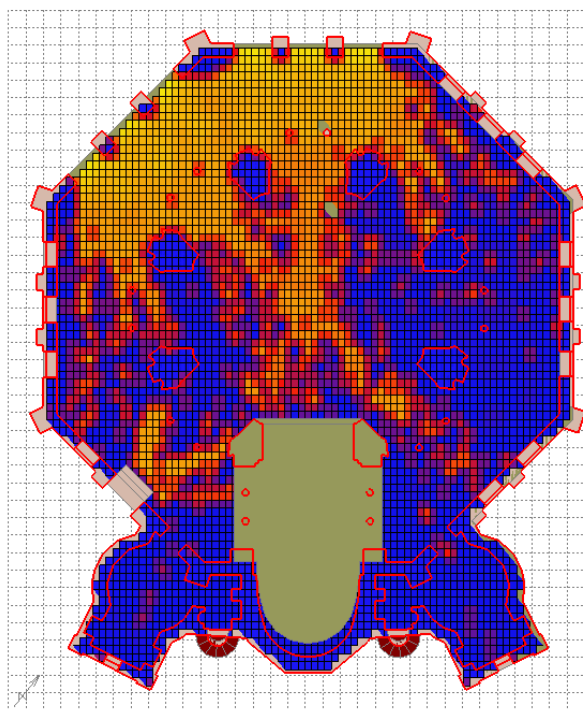


Figura 5.4.1: Distribuzione dei valori per il fattore di illuminamento diurno nella zona centrale della Basilica di San Vitale – Vista in pianta analizzata in Ecotect

Daylight Analysis
Daylight Factor
Value Range: 0.0 - 80.0 %
(c) ECOTECT v5

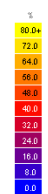
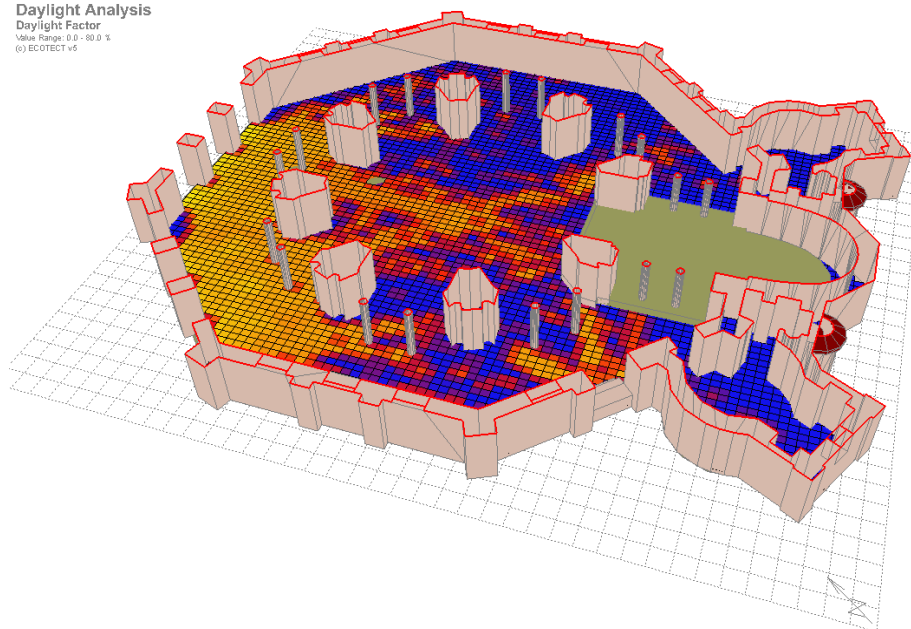


Figura 5.4.2: Distribuzione dei valori per il fattore di illuminamento diurno nella zona centrale della Basilica di San Vitale – Vista prospettica analizzata in Ecotect

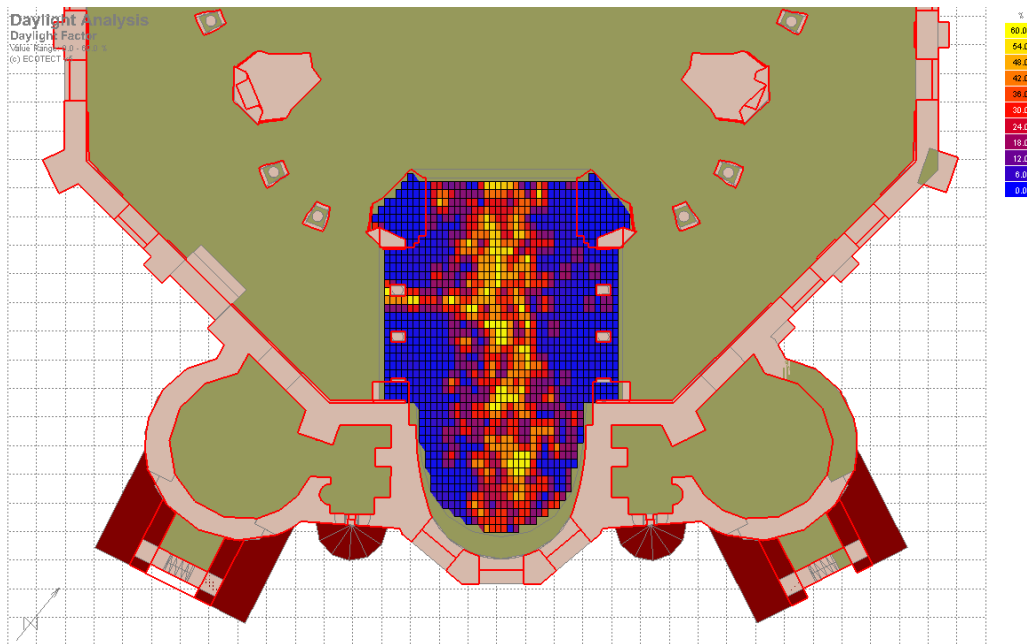


Figura 5.4.3: Distribuzione dei valori per il fattore di illuminamento diurno nella zona absidale della Basilica di San Vitale – Vista in pianta analizzata in Ecotect

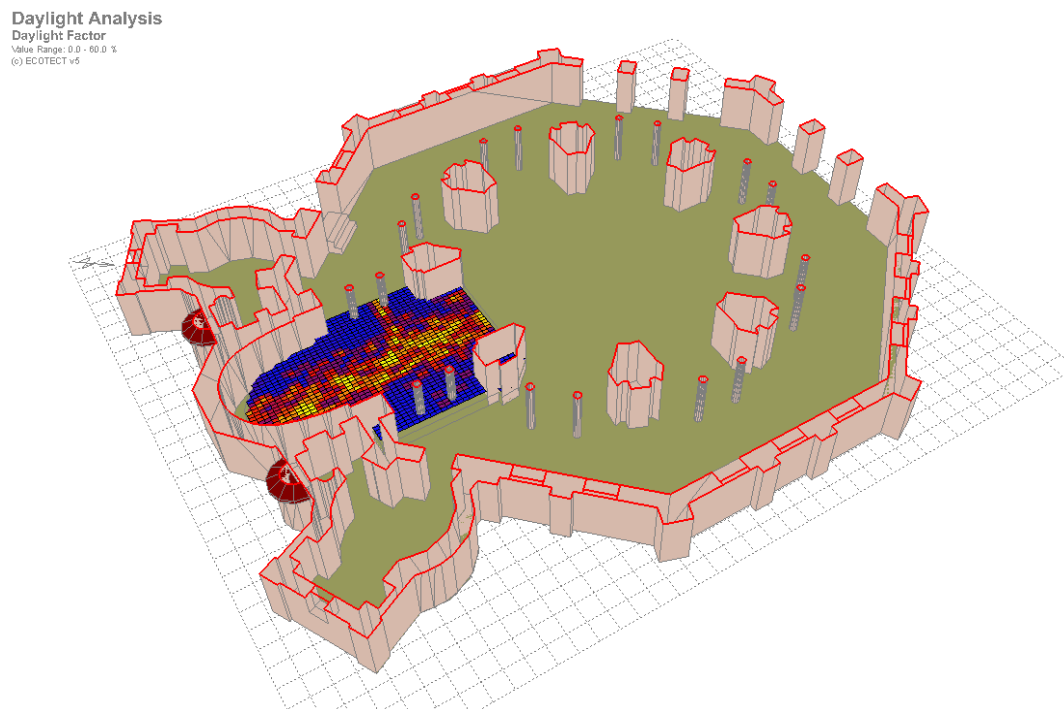


Figura 5.4.4: Distribuzione dei valori per il fattore di illuminamento diurno nella zona absidale della Basilica di San Vitale – Vista prospettica analizzata in Ecotect

Pur essendo riferita ad una condizione geometrica attualizzata, ovvero con le aperture “moderne” sul nartece e con le porte di accesso sul cortile interno prospiciente il mausoleo di Galla Placidia, si può evincere che la distribuzione luminosa più intensa si ha naturalmente verso i varchi di accesso sulla attuale zona di ingresso, nartece, e sull’abside, illuminato dalle tre finestre romaniche di grande dimensione. Supponendo che la posizione geografica e il fenomeno della processione degli equinozi non abbia influito enormemente sulle caratteristiche di esposizione di queste aperture, si può supporre che tale area fosse illuminata allo stesso modo anche durante il VI secolo. A tal fine, e per conoscere con precisione i periodi dell’anno, durante i quali le finestre absidali erano illuminate naturalmente, si è proceduto al calcolo di assonometrie solari definite.

Di seguito è proposto il grafico di illuminamento per la finestra centrale, dal quale si evince una condizione di illuminamento per oltre il 60% della superficie dalle ore 7 alle ore 12.30 per gran parte dell’anno solare (Figura 5.4.5).

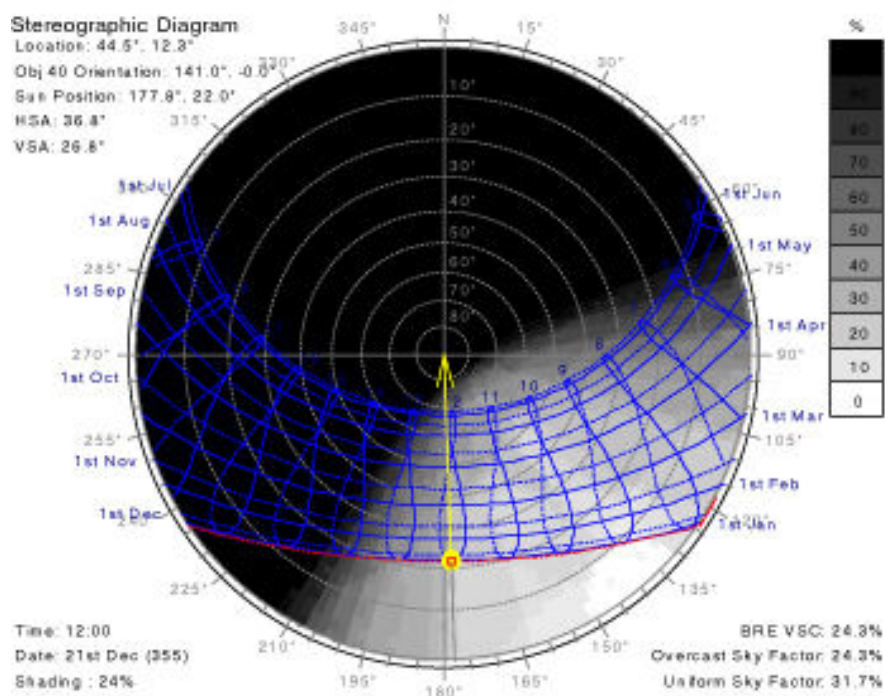


Figura 5.4.5: Diagramma solare per il calcolo della percentuale di area esposta a luce naturale, finestra centrale dell’abside

Allo stesso modo si sono analizzate le condizioni di illuminamento/ombreggiamento per le altre aperture absidali (Figure 5.4.6 e 5.4.7).

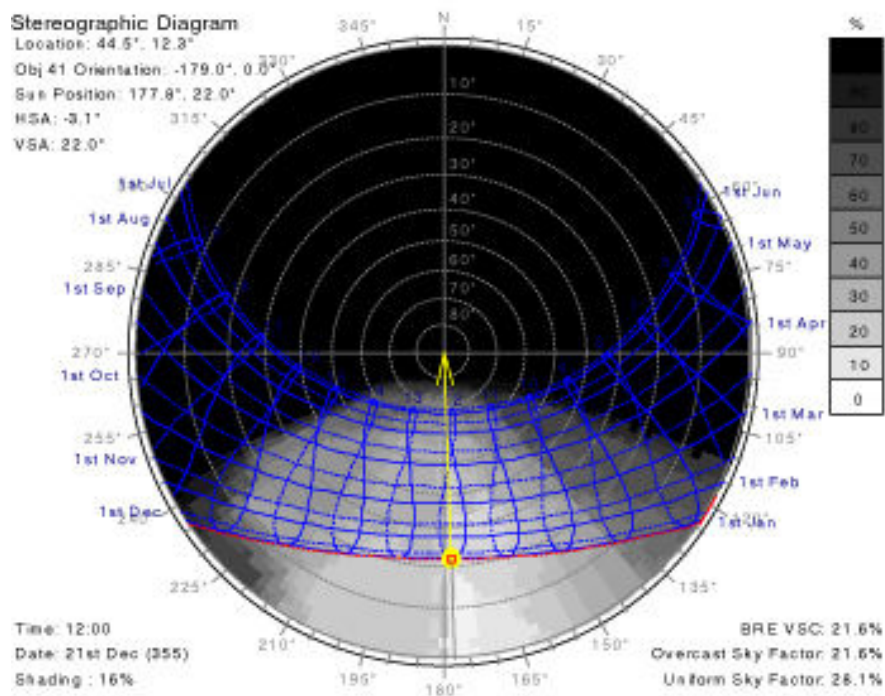


Figura 5.4.6: Diagramma solare per il calcolo della percentuale di area esposta a luce naturale, finestra ovest dell'abside

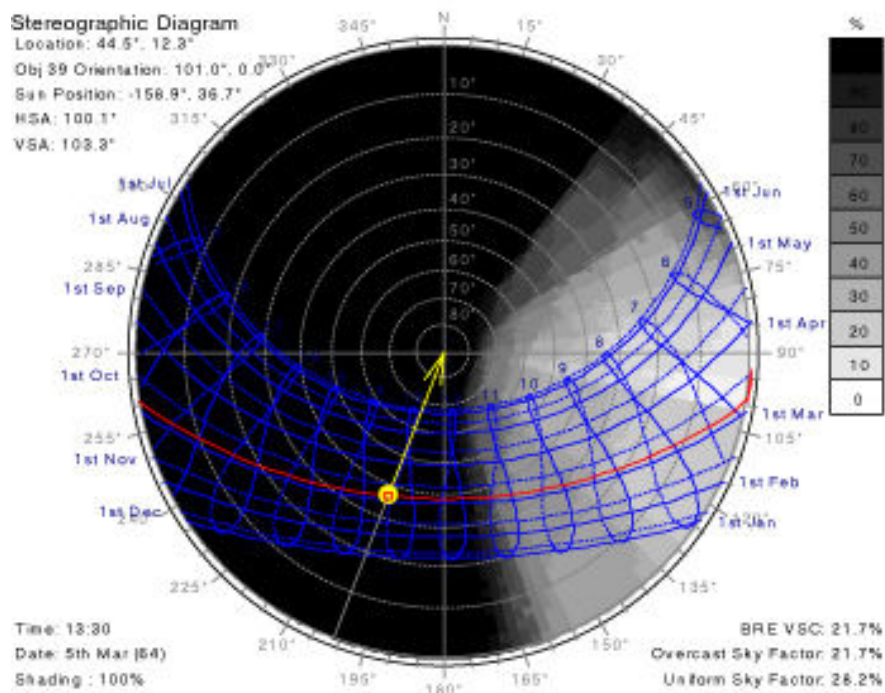


Figura 5.4.7: Diagramma solare per il calcolo della percentuale di area esposta a luce naturale, finestra est dell'abside

5.5 Modellazione Fotorealistica

5.5.1 Introduzione al fotorealismo

In computer grafica, l'equazione di rendering descrive il flusso dell'energia luminosa attraverso una scena. È basata sulla fisica della luce e fornisce risultati teoricamente perfetti, in contrasto con le varie tecniche di rendering, le quali approssimano questo ideale. Unendo la luce uscente a quella entrante, attraverso un punto d'interazione, questa equazione rappresenta l'intero *trasporto di luce* presente nella scena. Tutti i più complessi algoritmi possono essere visti come soluzioni a particolari formulazioni di questa equazione.

$$(5.5.1) \quad L_o(x, \vec{w}) = L_e(x, \vec{w}) + \int_{\Omega} f_r(x, \vec{w}', \vec{w}) L_i(x, \vec{w}') (\vec{w}' \cdot \vec{n}) d\vec{w}'$$

$L_o(x, \vec{w})$ è la luce uscente in una particolare posizione x e direzione \vec{w}

$L_e(x, \vec{w})$ è la luce emessa nella stessa posizione e direzione.

$\int_{\Omega} d\vec{w}'$ è una somma infinitesimale calcolata su un emisfero di direzioni entranti

$f_r(x, \vec{w}, \vec{w}')$ è la percentuale di luce riflessa in quella posizione (dalla direzione entrante a quella uscente).

$L_i(x, \vec{w}')$ è la luce entrante da posizione e direzione \vec{w}'

$(\vec{w}' \cdot \vec{n})$ è l'attenuazione della luce entrante dovuta all'angolo d'incidenza.

Quando si parla di rendering in architettura [53, 54], le correnti di pensiero attualmente più documentate in letteratura sono tre: quella che punta alla riproduzione di tecniche classiche del disegno, quella che cerca di simulare la luce apportando degli artefatti correttivi all'algoritmo di calcolo e quella che simula *in toto* il comportamento elettromagnetico della radiazione luminosa.

Della prima, si può fare riferimento ad un approccio che da svariati anni è stato sviluppato ed analizzato dai grafici dell'architettura e che viene chiamato NPR, acronimo utilizzato per descrivere il Non-Photorealistic Rendering, riferendosi a quella tecnica di rappresentazione che vede i suoi fondamenti nella visualizzazione di oggetti tracciati e presentati come sketches, schizzi, senza la volontà di arrivare al realismo esasperato dei motori di rendering che le grandi case software stanno immettendo sul mercato in questi ultimi anni. Si tratta in buona sostanza di una simulazione delle geometrie di architettura alla “vecchia maniera”, mediante viste

planimetriche o prospettiche di scorci trattati come se fossero stati disegnati a mano libera e poi rifiniti con tecniche classiche come le campiture a pantone o l'acquerello. In realtà tali immagini possono essere realizzate partendo da elaborati digitali CAD, generati durante il flusso di disegno per i ben più espliciti fini richiesti dalla documentazione tecnico-normativa del progetto di architettura.

Per la seconda corrente, più rilevante ai fini scientifici, ci si può riferire ai cosiddetti motori di render "biased and consistent", ovvero algoritmi veloci che riproducono la luminosità reale e ignorano o approssimano alcuni aspetti generando errori attesi (i bias) trascurabili a volte ma con la necessità di essere confinati da settaggi complessi delle variabili in atto. Questi sono poi di solito consistent, cioè approssimano sempre meglio la soluzione mano a mano che si incrementano alcuni parametri; è questo il caso degli algoritmi di ray-tracing e radiosity:

- Ray-tracing è un algoritmo di tipo stocastico, basato su un processo "random" con il quale solo il percorso di alcuni fra gli infiniti raggi luminosi viene effettivamente simulato: ripetendo lo stesso calcolo, pertanto, il risultato finale varia leggermente. L'immagine definitiva viene ottenuta come media delle soluzioni corrispondenti ad un insieme di raggi. Per quanto questo possa sembrare strano, rappresenta invece il modo in cui la luce "lavora" effettivamente nella realtà: i fotoni che la compongono, infatti, si propagano, direttamente o attraverso infinite riflessioni, in maniera del tutto casuale; è il loro numero elevatissimo a conferire alla radiazione luminosa il suo carattere di stabilità. Al fine di ridurre i tempi di elaborazione (occorrerebbero infinite reiterazioni delle quali calcolare la media per avere un risultato perfetto) l'algoritmo assume una importante semplificazione: i processi di inter-riflessione sulle superfici diffondenti vengono infatti approssimati con un contributo di luce ambientale costante in tutti i punti e senza nessuna correlazione con il fenomeno fisico.

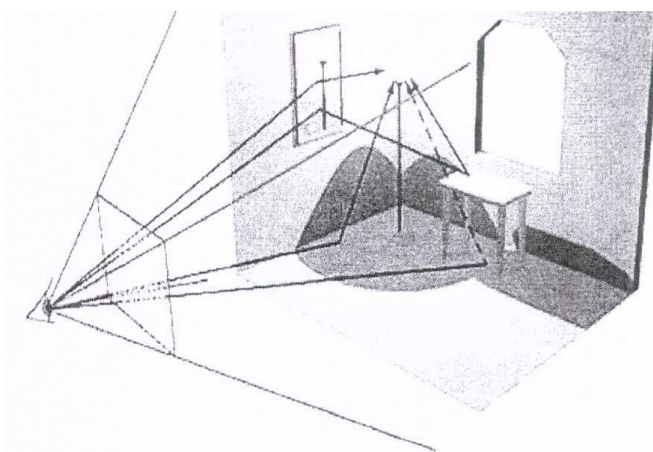


Figura 5.2.1: schematizzazione della modalità di modellazione della radiazione luminosa nell'algoritmo ray-tracing

L'algoritmo lavora seguendo a ritroso il percorso dei raggi che dall'occhio dell'osservatore vanno a colpire le sorgenti luminose sia direttamente, sia indirettamente per riflessione sulle superfici opache dell'ambiente (ad esclusione dei raggi intercettati da oggetti). Il contributo di ciascun raggio che realizza (considerando anche riflessioni multiple) il congiungimento sorgente - occhio viene preso in considerazione per determinare il colore degli elementi e i livelli di illuminazione e luminanza presenti sulle superfici stesse [51].

- Radiosity è un algoritmo sviluppato negli anni '60 per simulare lo scambio di energia radiativa fra superfici in funzione della posizione relativa e applicato alla propagazione della luce a partire dalla metà degli anni '80. Il calcolo si basa sull'assunzione di comportamento perfettamente diffondente (Lambertiano - la luminanza è costante da qualunque direzione si osservi la superficie) di tutte le superfici presenti nell'ambiente e fra cui avviene un mutuo trasferimento di radiazione luminosa. Tale approssimazione, se da un lato rende meno oneroso il processo di elaborazione dei dati (minor tempo e minore capacità richiesta al processore del computer), dall'altro esclude elementi lucidi e speculari, la cui emissione luminosa varia in maniera significativa nelle diverse direzioni dello spazio. Al fine di avere un approccio più sofisticato e quindi un grado di precisione maggiore, con il radiosity le superfici effettive vengono suddivise in griglie di elementi superficiali (3D mesh) di ridotta estensione: il calcolo dell'energia luminosa scambiata viene effettuato fra una singola mesh e tutte le altre.

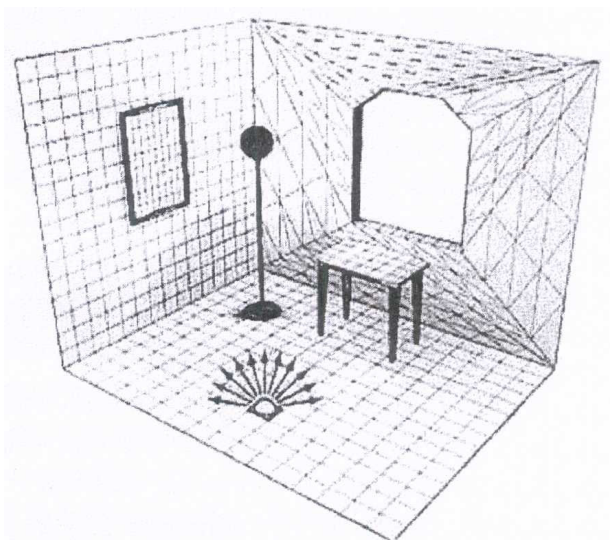


Figura 5.2.2: schematizzazione della modalità di modellazione della radiazione luminosa nell'algoritmo radiosity

Questa suddivisione è particolarmente dettagliata (il numero di elementi cresce esponenzialmente) nelle aree caratterizzate da elevati gradienti di illuminazione. L'algoritmo attualmente implementato nei programmi di simulazione numerica illuminotecnica si basa su

un processo di raffinamento progressivo per cui all'operatore viene visualizzata in tempi rapidissimi l'immagine risultante, in modo da poter effettuare una prima analisi qualitativa del risultato senza dover attendere che l'intero calcolo venga portato a compimento: tale immagine viene continuamente rielaborata e raffinata fino al rendering finale e alla quantificazione dei dati fotometrici [51].

Viene poi la terza scuola di pensiero: l'unbiased, ovvero quegli algoritmi che hanno errore atteso nullo, convergendo sempre verso la soluzione corretta, per raggiungere fedelmente la quale è solo questione di tempo di calcolo. E' il caso dell'algoritmo dietro al software Maxwell-Render, utilizzato nel corso di questa ricerca per simulare il comportamento della luce entrante dalle finestre della Basilica, ricostruite secondo scritti e reperti del VI secolo. In questi algoritmi, alla base dei quali vi sono le equazioni di Maxwell (5.5.2), sussistono pochi parametri da settare ma molto tempo di calcolo occorrente, perchè non ci sono approssimazioni indotte o errori ricorsivi nel processo.

$$(5.5.2) \quad \left\{ \begin{array}{l} \nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \\ \nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \\ \nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \\ \nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J} + \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \end{array} \right.$$

dove

- ∇ è l'operatore differenziale divergenza tramite l'operatore nabla
- $\nabla \times$ è l'operatore differenziale rotore espresso tramite l'operatore nabla
- \mathbf{E} è il campo elettrico
- \mathbf{B} l'induzione magnetica ($\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H}$ dove \mathbf{H} è il campo magnetico)
- ρ la densità di carica
- \mathbf{J} il vettore densità di corrente
- ϵ_0 e μ_0 sono dette rispettivamente costante dielettrica del vuoto e permeabilità magnetica del vuoto, e sono legate dalla relazione $1/c^2 = \epsilon_0 \mu_0$, dove c è la velocità della luce

Come è deducibile dalla tipologia delle analisi condotte, il corso della ricerca ha privilegiato la scelta di primitive mesh e poligonali per consentire al modello tridimensionale della Basilica di poter essere sottoposto anche a processi di calcolo visuale (3D Studio Max, sia biased che unbiased) e di comportamento acustico (Ramsete). Considerata infatti la grande quantità di dati

vettoriali da gestire e da rappresentare, un approccio poligonale [55], nel quale inserire una volumetria semplificata del complesso basilicale, è parso essere più opportuno rispetto alla realizzazione di un plastico virtuale più fedele ai dettagli ma molto più oneroso in termini di richiesta di risorse.

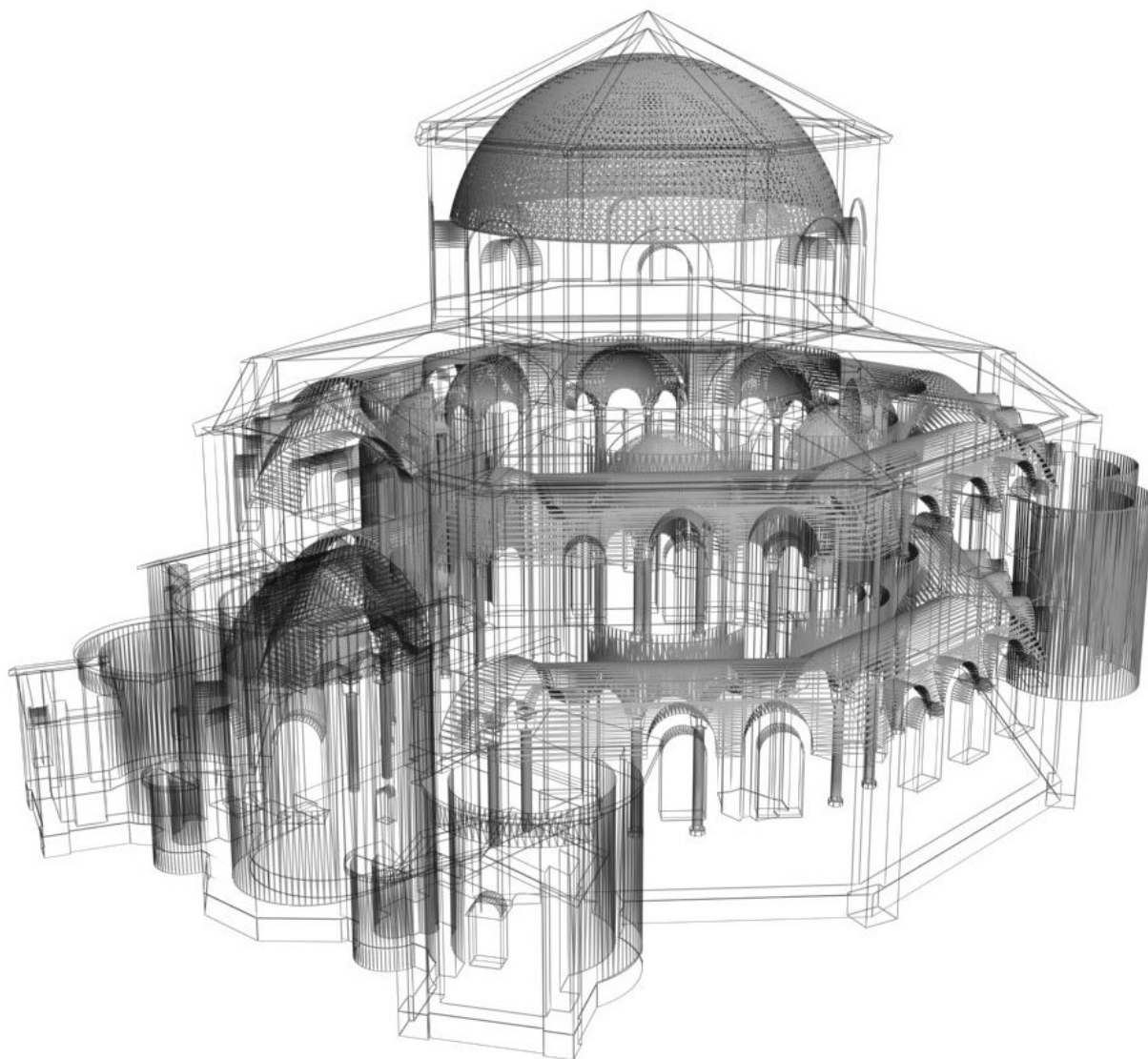


Figura 5.5.1: Modello della Basilica di San Vitale generato secondo modalità di rappresentazione poligonale

Questo tipo di rappresentazione, definito anche B-Rep, acronimo di Boundaries Representation, ovvero modalità di generazione di elementi tridimensionali rappresentati mediante il loro solo contorno e senza informazione di massa all'interno, ha permesso la manipolazione e la successiva modifica di elementi plastici per numerosi componenti del modello.



Figura 5.5.2: Modello della Basilica di San Vitale - esempio di semplificazione geometrica

5.5.2 Algoritmi biased ed unbiased

Unbiased e consistent, addentrandosi maggiormente nello specifico, sono due termini che nella letteratura scientifica vengono utilizzati per descrivere gli errori negli algoritmi di risoluzione dell'equazione di rendering. Sebbene l'esatto comportamento di un errore possa non sembrare interessante ai fini della rappresentazione visuale, esso riveste un enorme impatto sulla facilità di utilizzo del metodo e su quanto esso possa essere considerato robusto nella sua procedura di calcolo. Alcuni studiosi preferiscono i metodi *unbiased*, dal momento che, consentono con estrema facilità di introdurre dei vincoli sugli errori. Una buona stima per l'errore rende molto più facile conoscere quanto tempo di calcolo è necessario per raggiungere una finalità desiderata: questo significa anche che per produrre un'immagine di corretto aspetto possono essere molto pochi i parametri che hanno necessità di essere valutati; d'altro canto i metodi *biased* tendono ad essere molto più efficienti per scene semplici piuttosto che quelli *unbiased*. Questi metodi infatti partono dal concetto di introdurre delle semplificazioni che appaiono ragionevoli nel calcolo finale producendo delle viste sufficientemente credibili.

Ad esempio, un algoritmo potrebbe assumere che tutta l'illuminazione indiretta presente in una scena possieda una frequenza spaziale molto bassa, e tuttavia potrebbe interpolare i rimbalzi diretti solamente tra una modesta quantità di elementi; dal momento, però, che i margini di errore per gli algoritmi *unbiased* sono perlopiù sconosciuti, appare spesso difficoltoso collezionare parametri che corrispondano al livello desiderato di qualità da raggiungere.

Al di là di tutto, esiste un punto di incontro tra i veloci metodi *biased* e i più robusti metodi *unbiased*: gli utilizzatori spesso confondono il termine *unbiased* con il termine *consistent*. Ad esempio si può leggere su alcuni scritti, ed in maniera non corretta, che il photon mapping, un

algoritmo di illuminazione globale, basato sulla simulazione dell'emissione di raggi di luce e usato in computer grafica per simulare realisticamente l'interazione della luce con differenti oggetti (in particolare, è capace di simulare la rifrazione della luce attraverso sostanze trasparenti, ad esempio il vetro o l'acqua, riflessioni a vicenda tra oggetti illuminati, ed alcuni effetti causati da particelle come il fumo o il vapore acqueo), sia un metodo *unbiased* dal momento che converge sempre alla soluzione corretta. In realtà i due termini hanno connotazioni completamente differenti ed è importante chiarirne le differenze. Se un'approssimazione si avvicina alla soluzione corretta con l'aumentare del tempo di calcolo, allora il metodo è *consistent*. Purtroppo però conoscere se un metodo sia *consistent* o meno non fornisce molte indicazioni agli sviluppatori dei motori di render.

Esplicitare questa caratteristica, infatti, non indica quanto velocemente il metodo possa convergere ad una soluzione corretta e non fornisce neppure nessun vincolo al tipo di errore introdotto. In generale, la stima dell'errore F_N (dato un generico numero N di rendering) per una quantità generica I si dice *consistente* per un valore ϵ se:

$$(5.5.3) \quad \lim_{N \rightarrow \infty} P[|F_N - I| > \epsilon] = 0$$

In altre parole, considerando un numero significativo di campioni, la probabilità che l'errore sia più grande di un valore fissato si avvicina allo zero. Ciò significa che la stima del calcolo tende alla risposta esatta. Matematicamente questo si traduce nel formalismo:

$$(5.5.4) \quad E[F_N - I] = 0$$

Il che significa che l'errore atteso E (bias) nella risoluzione dell'equazione di rendering è nullo, a prescindere dal valore di N (numero dei campioni di rendering).

Il concetto di errore introdotto (*bias*) invece, è fortemente più sottile: un metodo di calcolo in computer grafica si dice infatti *unbiased* (ovvero privo di errori introdotti) se produce una risposta corretta sulla base di una media. Viceversa l'introduzione di artefatti mirati a far convergere più velocemente alla soluzione porta ad un metodo risolutivo *biased*. Una modalità semplice di pensare al bias introdotto in un rendering è costituita dall'immaginare di chiedersi: "se si esegue un rendering della stessa immagine milioni di volte utilizzando parametri di illuminazione differenti, la media delle molte soluzioni restituisce il comportamento corretto?", se la risposta è "No", si è di fronte ad un algoritmo affetto da bias.

5.5.3 Applicazioni al caso di studio

L'analisi della situazione illuminotecnica attuale è servita per ricostruire come la Basilica fosse illuminata durante il VI secolo, integrata dalla misurazione già esposta in precedenza dei lux rilevabili nell'edificio sacro. La verifica che tali valori fossero congruenti con le simulazioni digitali ottenute dal modello tridimensionale ha permesso di estendere le considerazioni effettuate alla situazione presumibile nel VI secolo. Tale ricostruzione è stata poi inserita in un filmato avente come oggetto il percorso virtuale all'interno del modello digitale [56]. Le finestrate della basilica, sono a tutt'oggi l'elemento illuminante naturale più rilevante dell'intero complesso, pertanto si è deciso di concentrare l'attenzione di studio su queste componenti, ipotizzando la configurazione geometrica e luminosa.

Grazie alla collaborazione intrapresa con il Dipartimento di Archeologia dell'Università di Southampton, si è giunti alla formulazione di un'ipotesi, per analogia, riguardante la configurazione geometrica degli infissi e delle vetrate originali (Figura 5.5.3): alcuni sopralluoghi effettuati negli archivi storici e nel museo archeologico antistante la Basilica hanno portato al rinvenimento di informazioni utili per la ricostruzione tipologica (Figura 5.5.4).

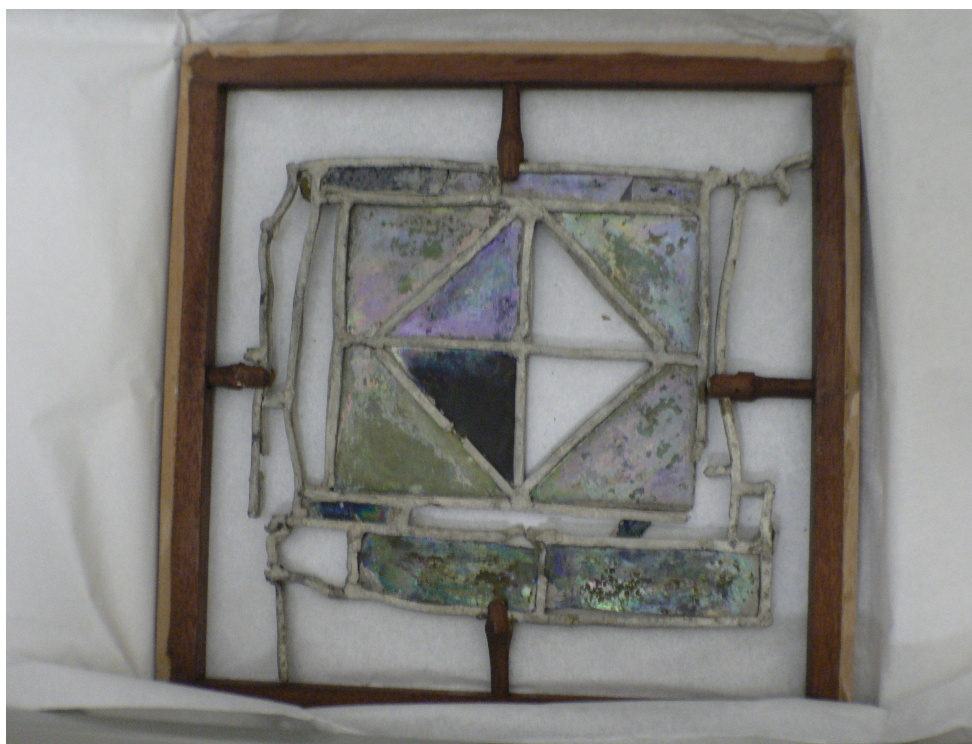


Figura 5.5.3: Reperto risalente al VI secolo d.C. di vetro e telaio che componeva le finestre in San Vitale

I campioni originali del VI secolo visionati (vedi ALLEGATO C), hanno fornito elementi critici per simulare come la radiazione luminosa potesse interagire con le superfici trasparenti. Alcuni frammenti metallici del telaio autentico sono stati presi a modello per ricostruire l'infisso completo a sostegno dei dischi di vetro colorato esaminati.

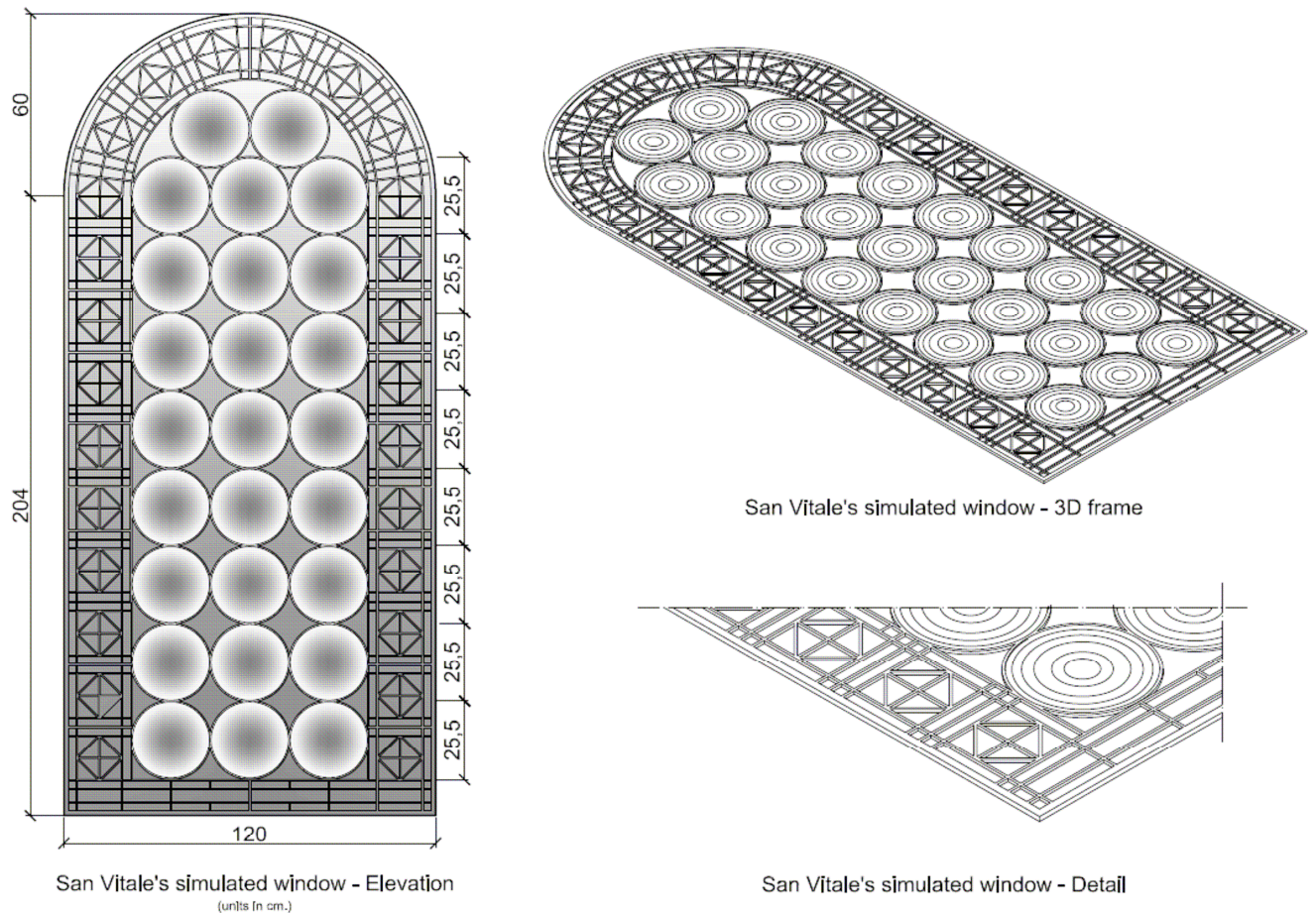


Figura 5.5.4: Ricostruzione del serramento absidale originale in San Vitale

Per ottenere una ricostruzione visuale fedele delle caratteristiche delle finestre, composte dagli elementi colorati, sono stati effettuati dei rendering mediante algoritmi *unbiased* che hanno prodotto risultati dipendenti dalla percentuale di trasparenza del vetro. Nonostante i tempi di calcolo siano stati rilevanti per ottenere una visualizzazione coerente delle caratteristiche illuminotecniche presunte, la simulazione ha consigliato di porre la maggiore attenzione nei confronti delle aperture più significative in termini di illuminazione diretta.



Figura 5.5.5: Modello della finestra absidale - resa visuale di ipotesi vetrata (algoritmo statico unbiased)

Infatti le finestre di maggior estensione areale sono quelle presenti nella zona absidale che, come si evince dalle mappe dei valori percentuali di illuminazione nelle Figure da 5.3.2 a 5.3.5, sono le maggiori responsabili della condizione luminosa all'interno dell'abside e della sua prospiciente navata. Il favorevole angolo di incidenza della radiazione luminosa naturale è stato verificato e misurato su queste superfici mediante assonometrie solari, a dimostrazione della verosimiglianza della ricostruzione tipologica realizzata.

L'ipotesi di serramento absidale insieme alle testimonianze archeologiche della distribuzione della luce naturale e artificiale nel VI sec.d.C in San Vitale, riportate nel libro "Architettura paleocristiana e bizantina" di Krautheimer [57], hanno permesso di simulare il percorso audiovisivo della basilica all'epoca della sua costruzione: nel libro "Architettura paleocristiana e bizantina" [57] si legge: "Le finestre erano schermate da lastre di vetro...: blu scuro, verdastro, marrone purpureo cupo, biancastro, giallo, rosso chiaro. La luce doveva gradualmente aumentare dalla zona in ombra delle navate laterali alla zona più chiara delle gallerie e infine

alla zona delle finestre della navata centrale; sempre però smorzata, la luce restava tenue. Nelle funzioni notturne, lampade erano appese al bordo del perimetro della cupola, candelabri sporgevano dal cornicione e candelieri venivano posti negli archi delle navatelle e delle gallerie del matroneo”.

Si è potuto quindi, ricostruire, verosimilmente, una scena notturna della Chiesa di San Vitale, rappresentante l’illuminazione artificiale interna che, insieme all’auralizzazione 3D, ha permesso di recuperare la qualità illuminotecnica ed acustica della basilica sia nel VI che nel XXI secolo.

CAPITOLO 6

CONCLUSIONI

6.1 Conclusioni

La chiesa di San Vitale, la cui edificazione iniziò nel 526 d.C., sul modello della basilica di S. Sofia a Costantinopoli, e terminò nel 547 d.C., nasce come chiesa imperiale, a testimonianza dei legami culturali tra Ravenna e Bisanzio.

L'edificio di culto rappresenta uno straordinario esempio di incontro tra l'architettura bizantina e quella romana, in cui l'influenza orientale, sempre presente nell'architettura ravennate, assume qui un ruolo dominante: discostandosi notevolmente dalle strutture delle altre basiliche a tre navate, costruite precedentemente e assumendo la forma ottagonale a pianta centrale.

Nel sesto secolo, la musica corale era considerevolmente differente dalla, più nota, musica gregoriana dei secoli successivi, e la sua esecuzione produce differenti effetti sonori all'interno della Basilica di San Vitale. Dal sesto secolo alle riforme ecclesiastiche di papa Gregorio il Grande (c.540-604), la liturgia cristiana delle chiese di Ravenna, compreso San Vitale, era caratterizzata da propri riti e canti: in particolare un canto che caratterizzava la liturgia in questi anni era intitolato 'Illuxit Avernis de tenebris de luce Deus di lux'.

Oggi è ormai noto come la pratica liturgica abbia influito sull'architettura religiosa del sesto secolo, portando ad innovazioni architettoniche quali la chiesa a pianta ottagonale, ma rimangono alquanto insufficienti i documenti religiosi e storici per descrivere le caratteristiche musicali e lo sviluppo della musica vocale della basilica. Attraverso una campagna di misure acustiche per mezzo di microfoni binaurali – tridimensionali, e grazie all'impiego della tecnica di auralizzazione 3D è stato possibile recuperare gli antichi effetti sonori della basilica: a questo scopo il brano '*Lux de luce Deus tenebris illuxit Avernis*' è stato registrato nella camera

anecoica dell'Università di Southampton (UK); tra le diverse tecniche, per semplicità di riproduzione alla Commissione, si è scelta l'auralizzazione binaurale in cuffia, mentre il video originale è stato tarato per lo stereo dipolo in sala Arlecchino, misurando il settaggio dei cross-talk delle casse della sala, da inserire nel file video, in modo che il rendering di San Vitale sia perfettamente coerente alla realtà.

Per l'analisi delle prestazioni illuminotecniche della Basilica, si è ipotizzato una possibile configurazione geometrica del serramento absidale, grazie alla bibliografia che si è occupata dell'architettura dell'epoca [57], i reperti dei dischi di vetro, fotografati nel Museo Nazionale di Ravenna (allegato C), che componevano la superficie trasparente, e modelli di finestre risalenti all'epoca della costruzione di San Vitale, come San Nicolò a Treviso. Si è potuto, quindi, costruire un modello fotorealistico, sfruttando algoritmi biased e unbiased, che ha consentito di riprodurre, verosimilmente, la realtà illuminotecnica dell'epoca, fornendo anche una visione notturna della Basilica. Il modello audio-visivo, rappresentante il presumibile stato di fatto del VI secolo d.C., presenta, ovviamente, alcune imperfezioni e alcune carenze dovute alla complessità dell'architettura e alle alterazioni causate dal tempo, ma tale “restauro musicale - virtuale” ha permesso di riportare nuovamente in vita gli antichi originali effetti acustici ed illuminotecnici di San Vitale nel VI sec.d.C, altrimenti perduti.

APPENDICE A

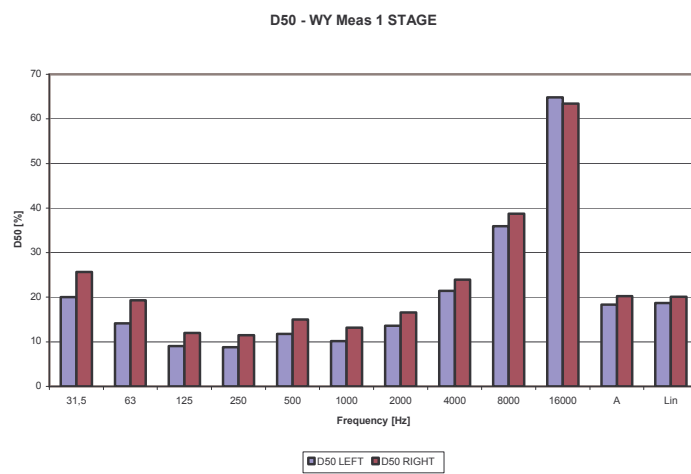
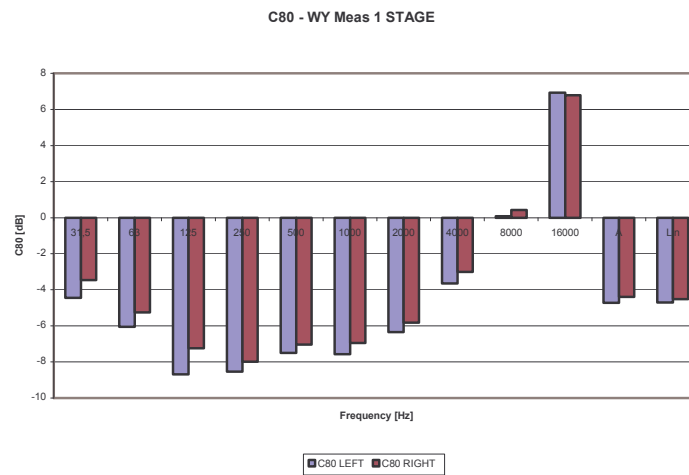
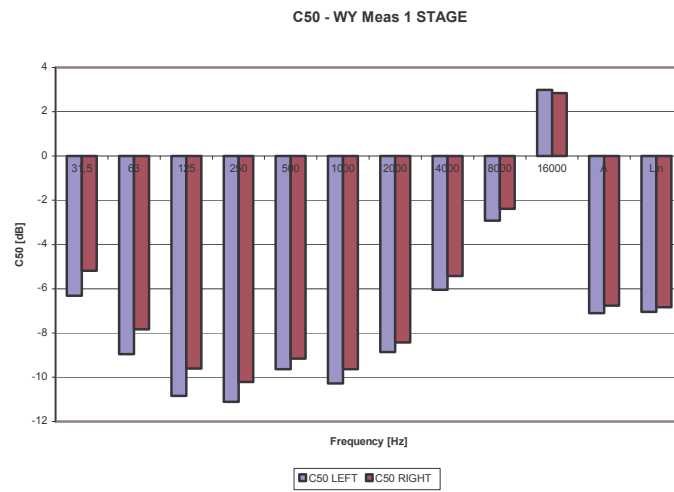
MEDIE PARAMETRI ACUSTICI

MEDIE S1 ISO 3382 OCTAVE BAND ACOUSTICAL PARAMETERS												
Freq. [Hz]	31.5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000	A	Lin
C50 [dB]	-6,31	-8,96	-10,8	-11,1	-9,64	-10,3	-8,86	-6,05	-2,92	2,991	-7,1	-7,05
C80 [dB]	-4,45	-6,05	-8,68	-8,53	-7,5	-7,56	-6,33	-3,65	0,074	6,923	-4,71	-4,7
D50 [%]	20,04	14,17	9,071	8,824	11,82	10,21	13,64	21,45	35,96	64,82	18,36	18,67
Ts [ms]	232,5	371,8	409,2	438,6	434,6	403,2	325,7	214,6	114,8	63,2	278,2	287,9
EDT [s]	4,624	4,899	4,963	5,802	5,856	5,273	4,321	2,89	1,567	0,74	3,799	3,993
T20 [s]	5,528	5,587	5,17	5,579	5,745	5,267	4,391	2,906	1,689	0,744	4,463	4,752
T30 [s]	7,02	5,802	5,015	5,596	5,769	5,348	4,441	2,952	1,777	0,105	4,703	5,002
IACC	0,988	0,996	0,962	0,739	0,387	0,346	0,352	0,231	0,136	0,248	0,248	0,263
LE	0,542	1,124	1,214	0,844	0,823	0,893	0,699	0,679	0,5	0,252	0,664	0,655
LF	0,802	1,715	1,487	1,095	1,097	1,156	0,988	0,931	0,654	0,374	0,912	0,897
LFC	0,439	0,791	0,701	0,599	0,588	0,604	0,544	0,495	0,36	0,254	0,492	0,484
MTI	-	-	0,092	0,08	0,075	0,074	0,087	0,11	0,147	-	-	-

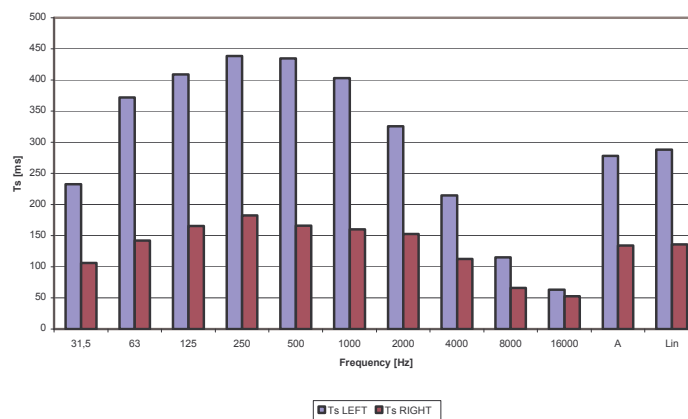
MEDIE S2 ISO 3382 OCTAVE BAND ACOUSTICAL PARAMETERS												
Freq. [Hz]	31.5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000	A	Lin
C50 [dB]	-36,2	-2,86	1,519	3,778	6,959	9,515	12,62	12,97	2,95	-7,1	10,19	10,38
C80 [dB]	-2,99	-10,3	-7,83	-8,4	-9,95	-9,39	-7,51	-5,92	-2,17	-1,05	-6,63	-6,53
D50 [%]	-1,4	-6,95	-5,97	-6,48	-7,75	-7,31	-5,56	-3,59	0,357	1,864	-4,6	-4,55
Ts [ms]	34,05	11,31	16,18	13,11	9,786	11,15	15,67	21,47	38,52	51,54	18,49	18,81
EDT [s]	282,8	330,6	337,9	392,2	432,8	405,1	316	207,1	111,3	829,5	279,9	288,3
T20 [s]	4,057	4,17	4,613	5,561	5,756	5,362	4,289	2,803	1,654	11,95	3,928	4,12
T30 [s]	5,081	4,839	5,052	5,605	5,726	5,252	4,261	2,754	1,724	0,751	4,472	4,753
IACC	0,974	0,984	0,926	0,748	0,263	0,289	0,285	0,201	0,166	0,392	0,211	0,263
LE	0,422	0,942	0,722	0,721	0,807	0,783	0,579	0,476	0,449	0,338	0,538	0,549
LF	0,582	1,254	1,117	1,085	1,066	1,005	0,789	0,623	0,616	0,516	0,719	0,756
LFC	0,363	0,67	0,638	0,593	0,576	0,547	0,455	0,368	0,347	0,302	0,413	0,43
MTI	-	-	0,107	0,095	0,083	0,078	0,099	0,119	0,156	-	-	-

MEDIE S3 ISO 3382 OCTAVE BAND ACOUSTICAL PARAMETERS												
Freq. [Hz]	31.5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000	A	Lin
C50 [dB]	-3,75	-8,3	-9,41	-8,28	-10,1	-10,3	-7,31	-5,72	-1,96	4,539	-6,28	-6,15
C80 [dB]	-1,86	-4,29	-7,08	-6,46	-7,72	-7,96	-5,23	-3,53	0,435	7,894	-4,23	-4,13
D50 [%]	30,95	15,67	12,08	14,34	9,772	9,772	17,65	23,22	39,6	71,24	20,86	21,25
Ts [ms]	306,1	281,6	345,2	412,4	439,3	408,5	313,5	209	110,6	44,89	268,2	274,7
EDT [s]	4,252	3,617	4,382	5,665	5,897	5,369	4,469	2,906	1,61	0,738	3,88	4,042
T20 [s]	4,702	4,75	5,073	5,578	5,727	5,322	4,395	2,948	2,101	0,799	4,457	4,726
T30 [s]	9,885	5,154	5,081	5,679	5,765	5,335	4,435	2,979	1,532	0,1	4,688	4,973
IACC	0,976	0,991	0,951	0,747	0,431	0,374	0,371	0,236	0,192	0,37	0,265	0,294
LE	0,381	0,619	0,526	0,625	0,614	0,57	0,4	0,384	0,338	0,205	0,391	0,395
LF	0,507	0,71	0,722	0,793	0,769	0,706	0,514	0,465	0,429	0,291	0,488	0,499
LFC	0,375	0,518	0,478	0,494	0,487	0,422	0,318	0,291	0,261	0,187	0,301	0,309
MTI	-	-	0,107	0,091	0,082	0,082	0,103	0,122	0,156	-	-	-

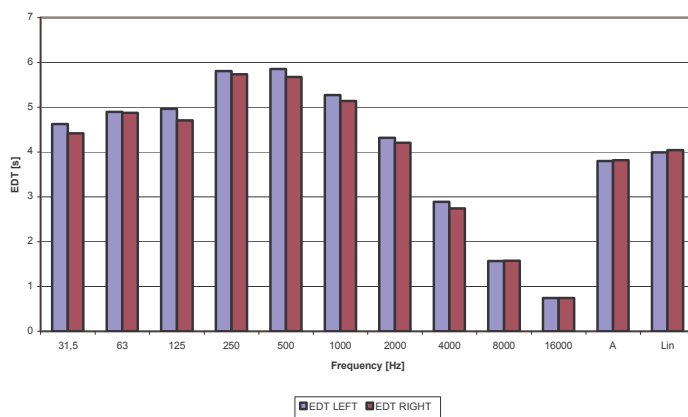
GRAFICI WY – S1



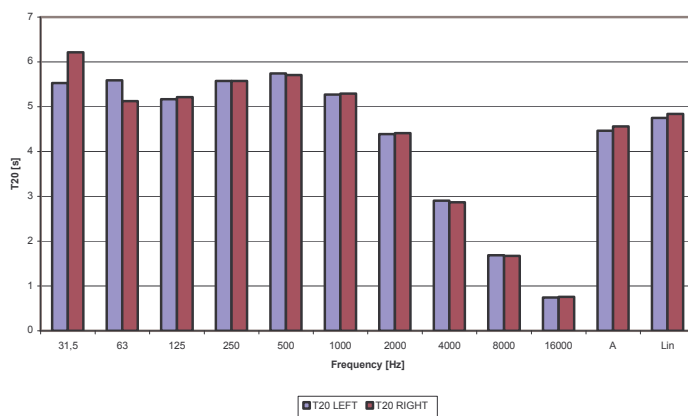
Ts - WY Meas 1 STAGE



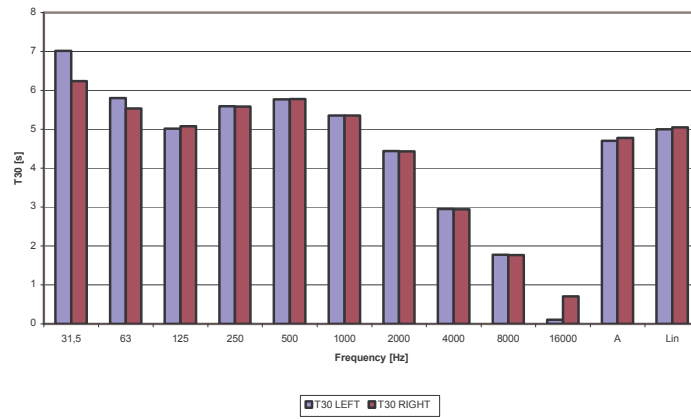
EDT - WY Meas 1 STAGE



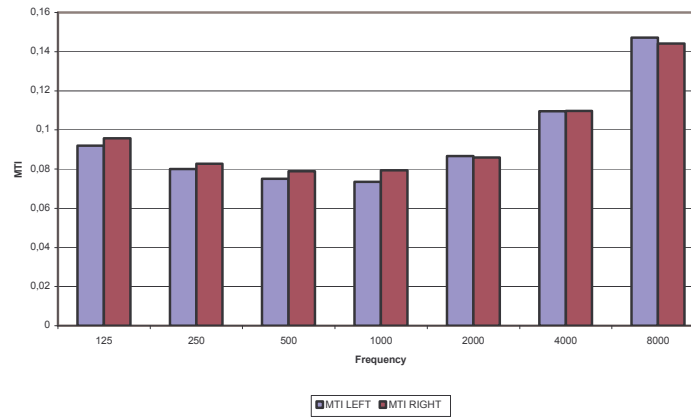
T20 - WY Meas 1 STAGE



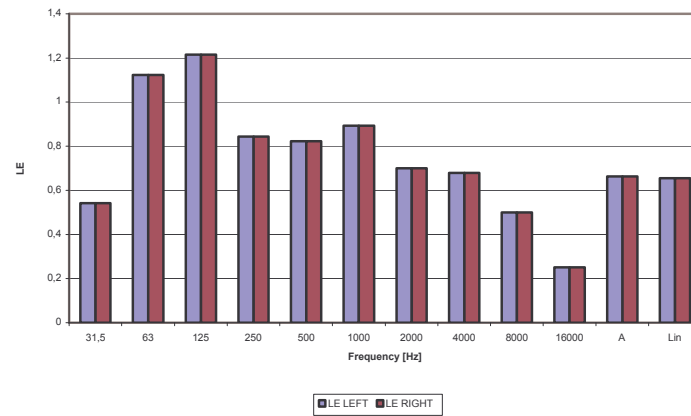
T30 - WY Meas 1 STAGE



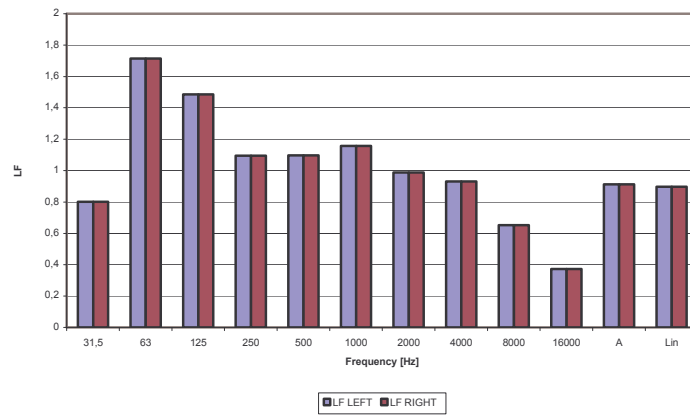
MTI



LE - WY Meas 1 STAGE



LF - WY Meas 1 STAGE



LFC - WY Meas 1 STAGE

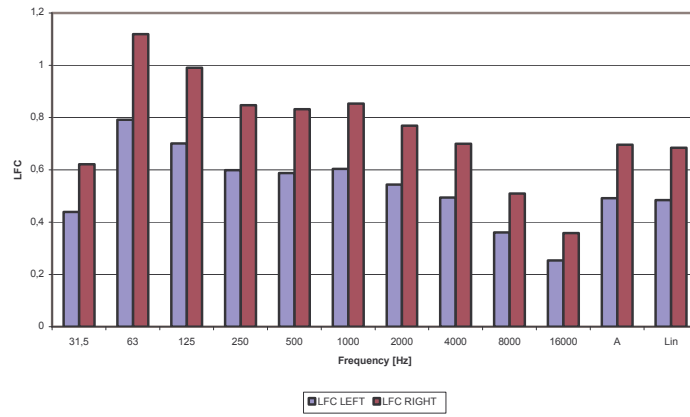
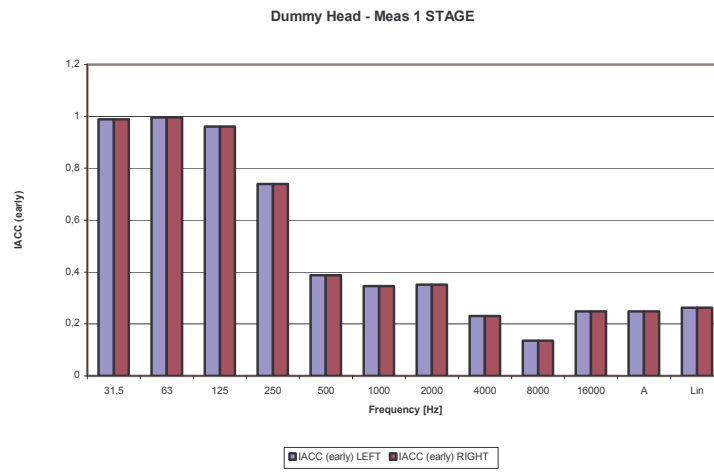
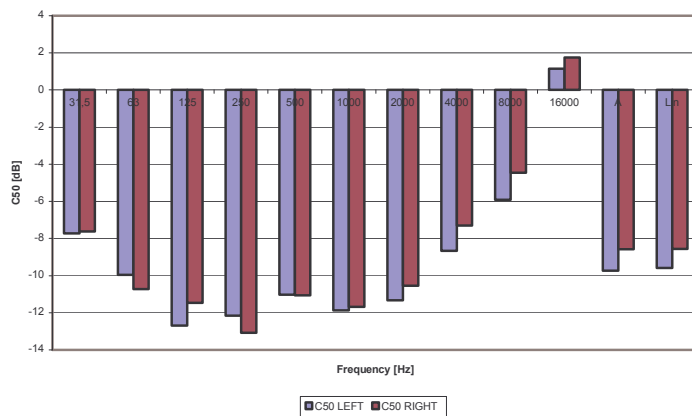


GRAFICO DUMMY HEAD – S1

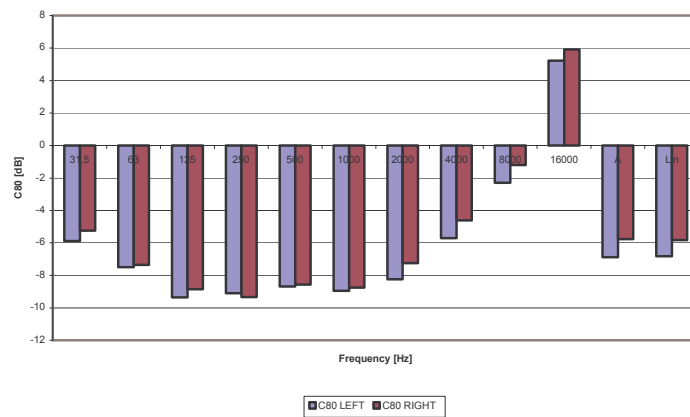


GRAFICI XZ – S1

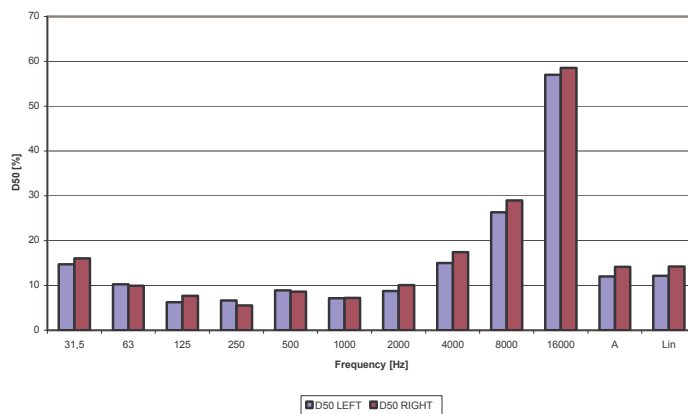
C50 - XZ Meas 1 STAGE



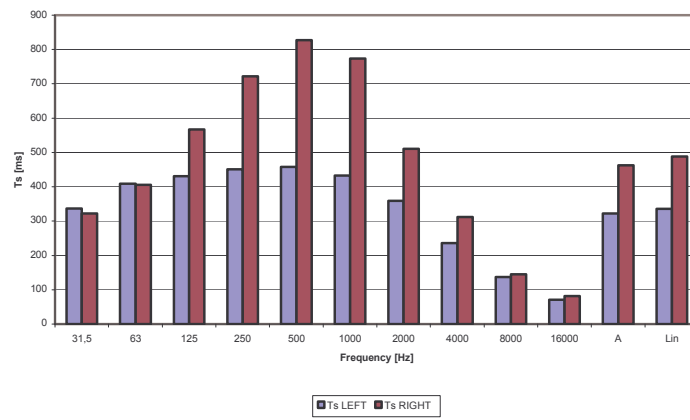
C80 - XZ Meas 1 STAGE



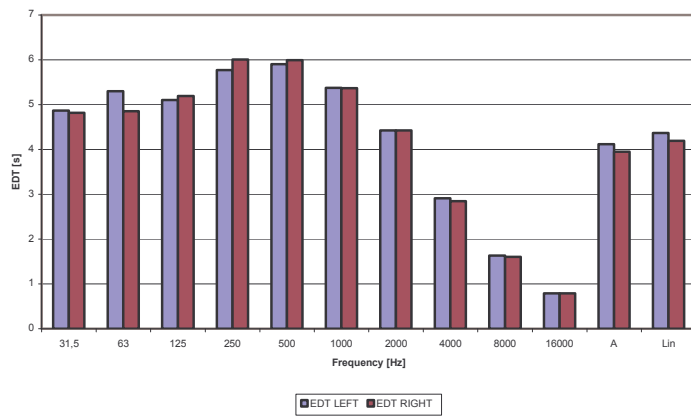
D50 - XZ Meas 1 STAGE



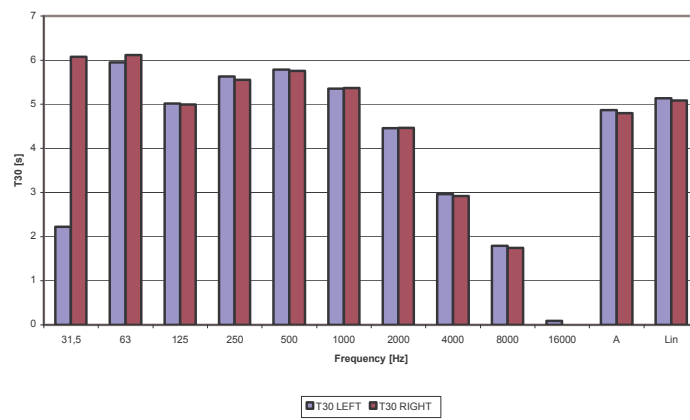
Ts - XZ Meas 1 STAGE



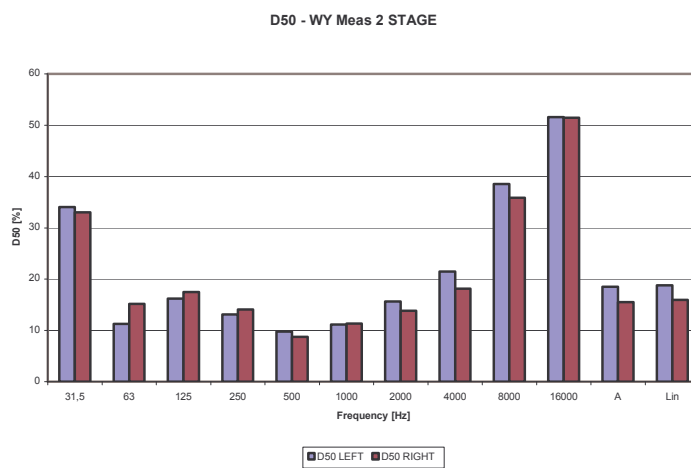
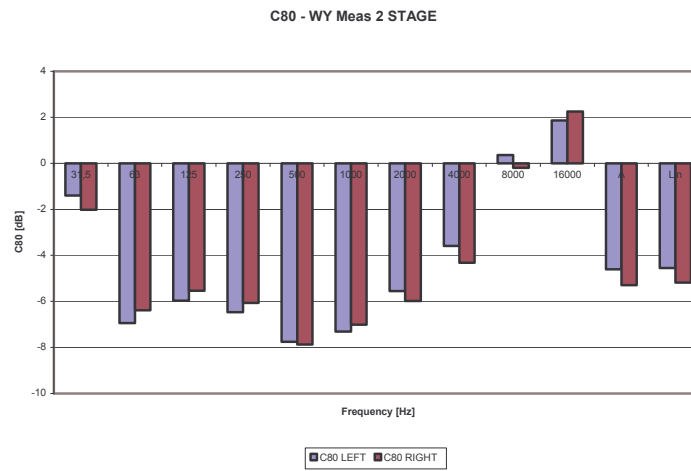
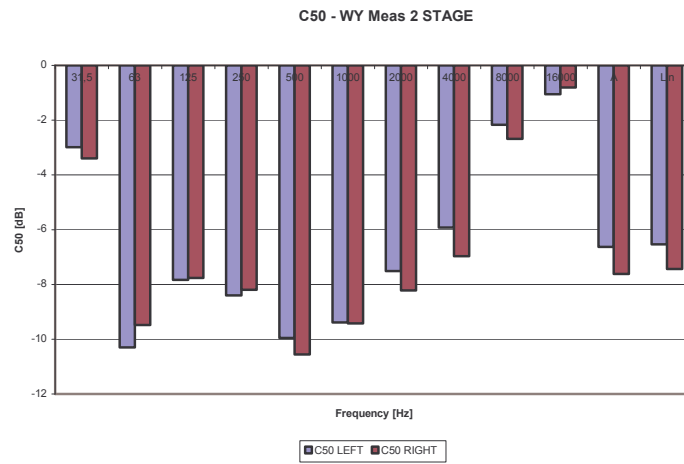
EDT - XZ Meas 1 STAGE



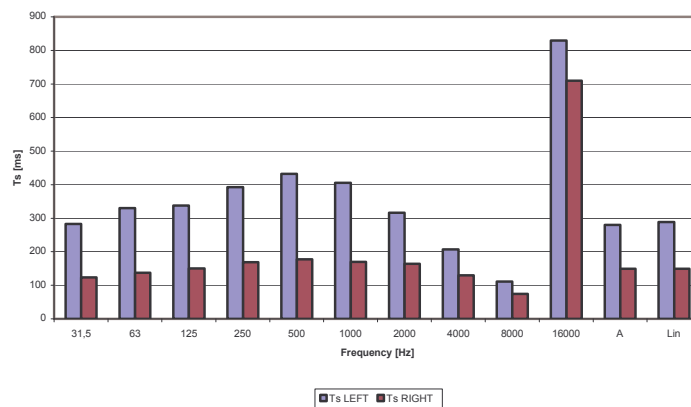
T30 - XZ Meas 1 STAGE



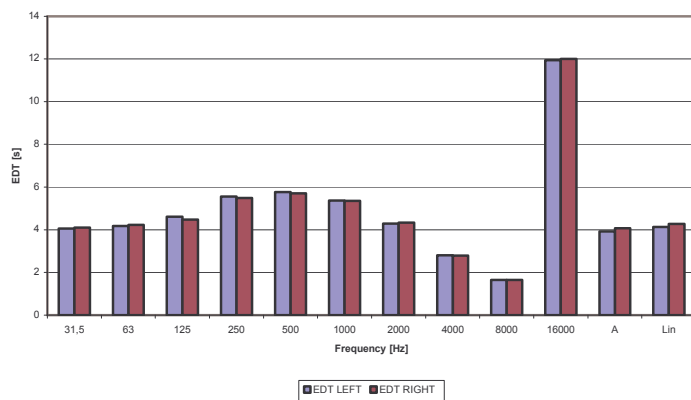
GRAFICI WY – S2



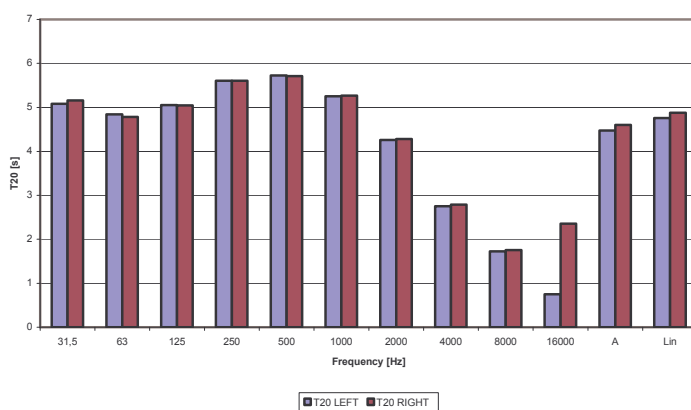
Ts - WY Meas 2 STAGE



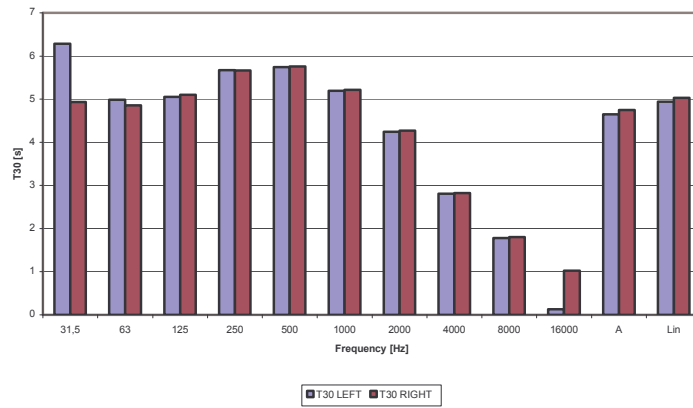
EDT - WY Meas 2 STAGE



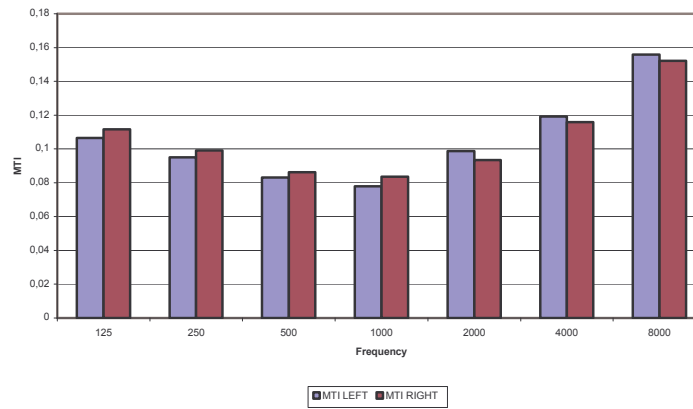
T20 - WY Meas 2 STAGE



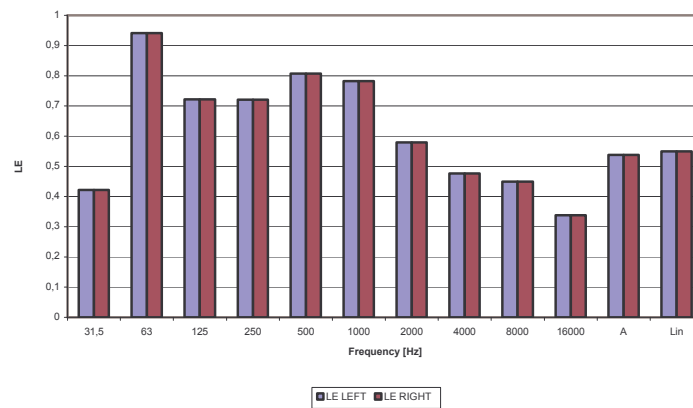
T30 - WY Meas 2 STAGE



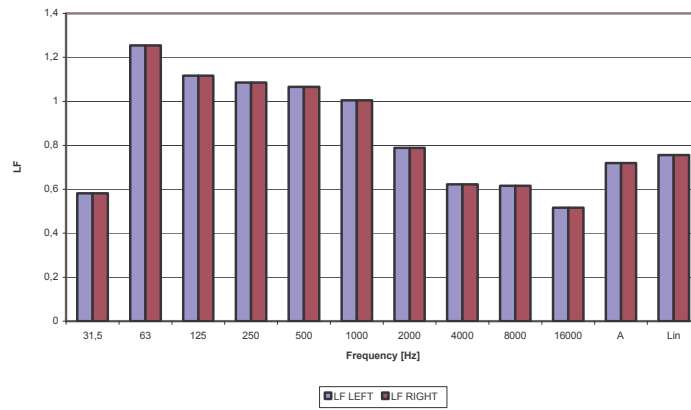
MTI



LE - WY Meas 2 STAGE



LF - WY Meas 2 STAGE



LFC - WY Meas 2 STAGE

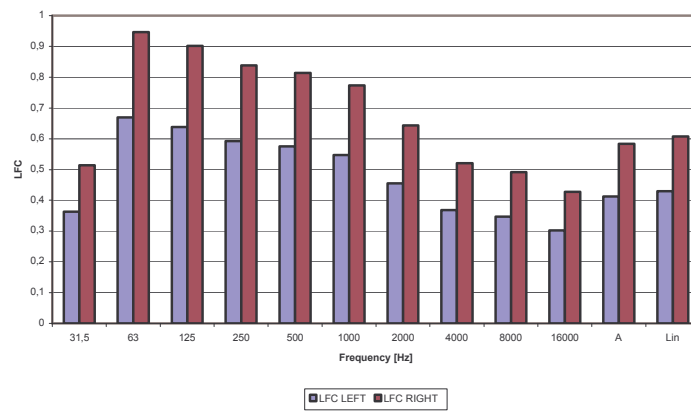
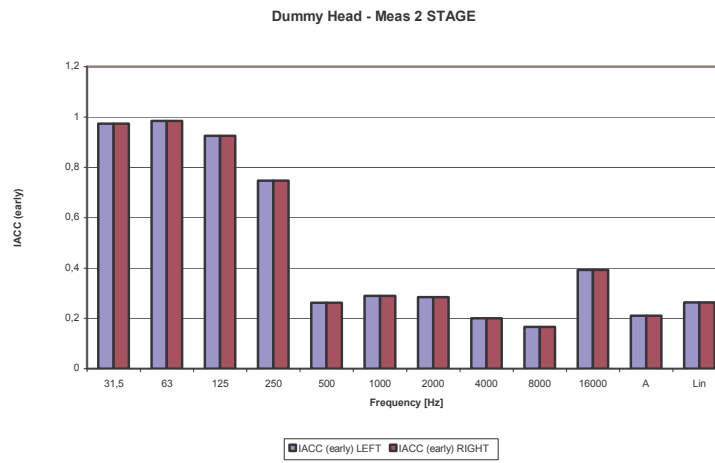
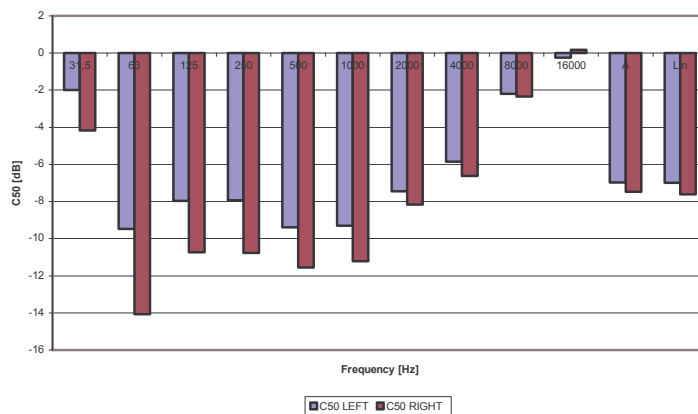


GRAFICO DUMMY HEAD – S2

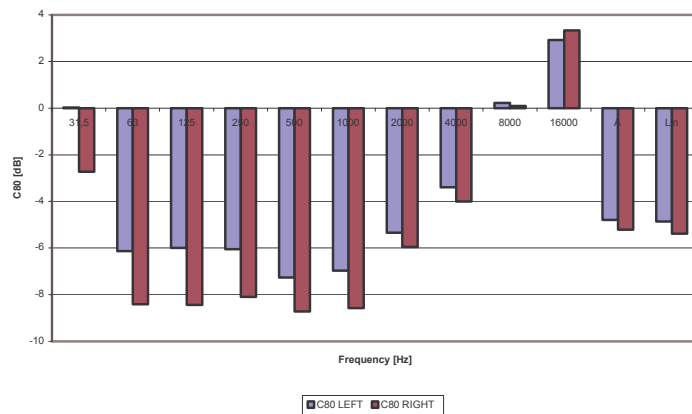


GRAFICI XZ – S2

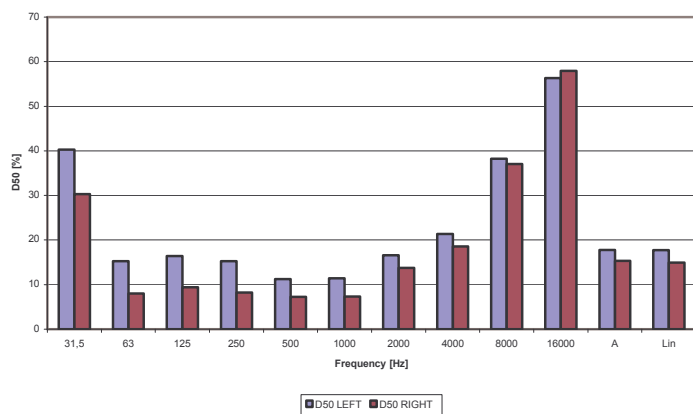
C50 - XZ Meas 2 STAGE



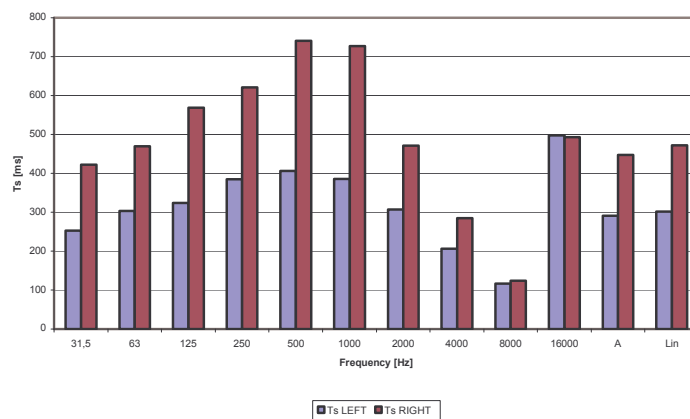
C80 - XZ Meas 2 STAGE



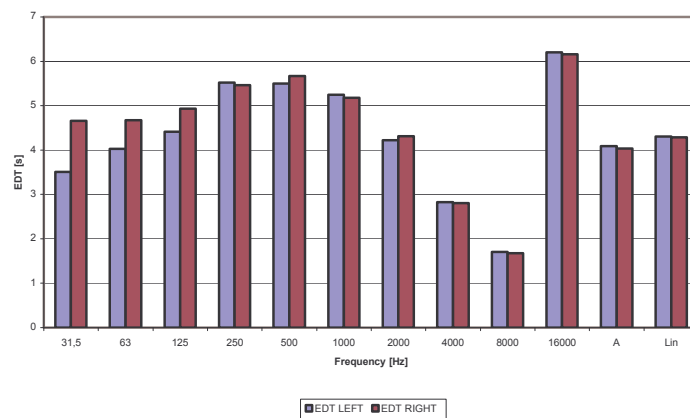
D50 - XZ Meas 2 STAGE



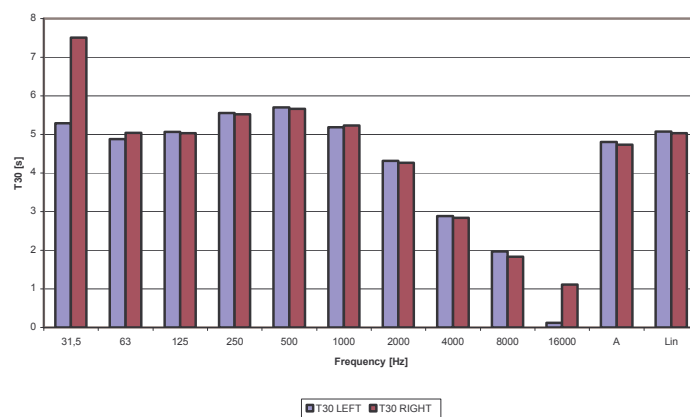
Ts - XZ Meas 2 STAGE



EDT - XZ Meas 2 STAGE

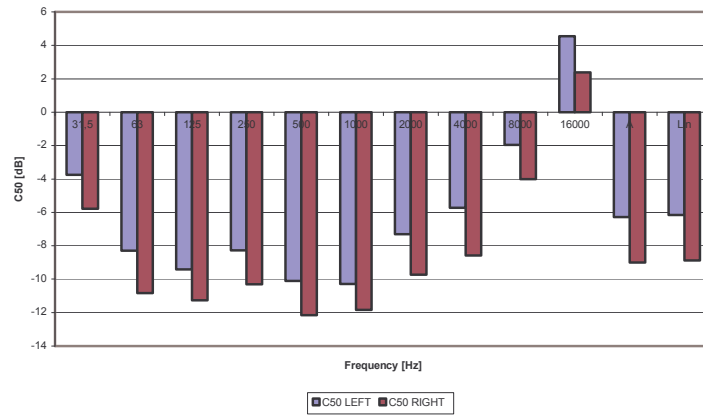


T30 - XZ Meas 2 STAGE

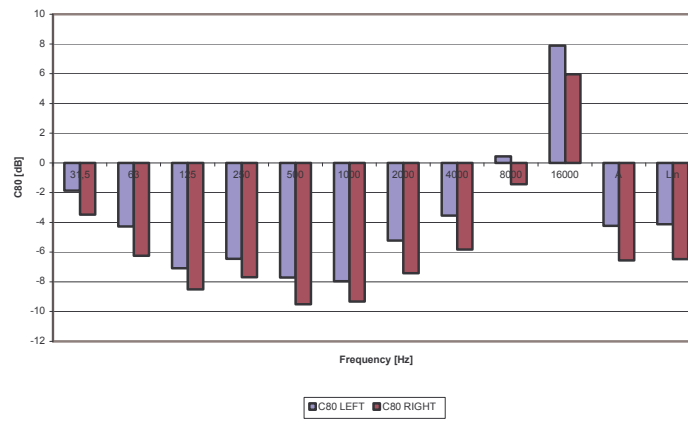


GRAFICI WY – S3

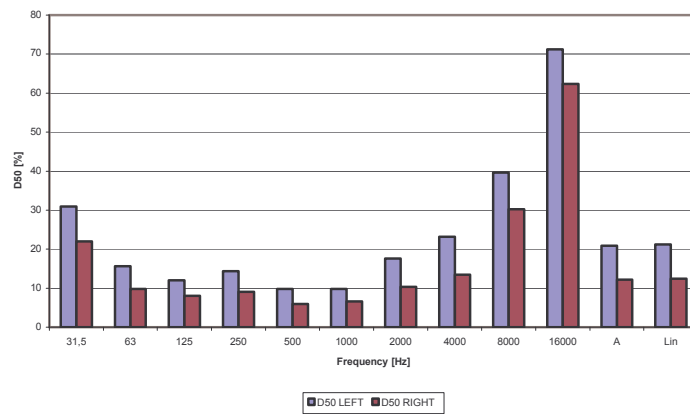
C50 - WY Meas 3 STAGE



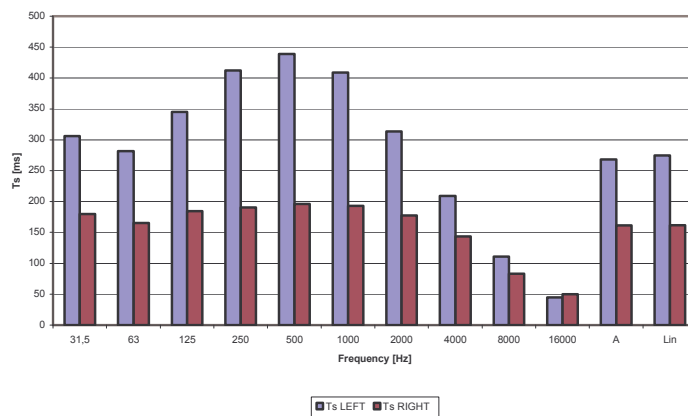
C80 - WY Meas 3 STAGE



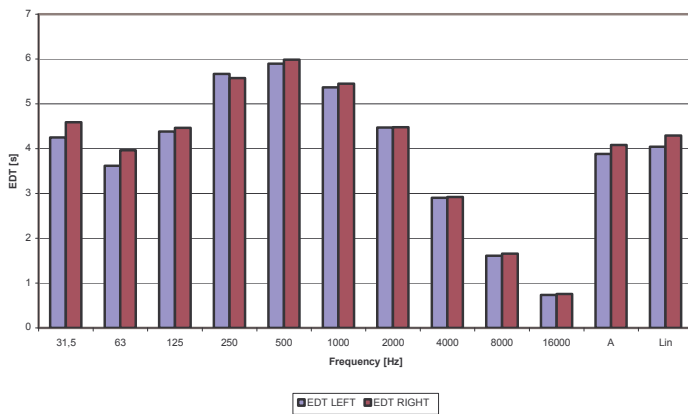
D50 - WY Meas 3 STAGE



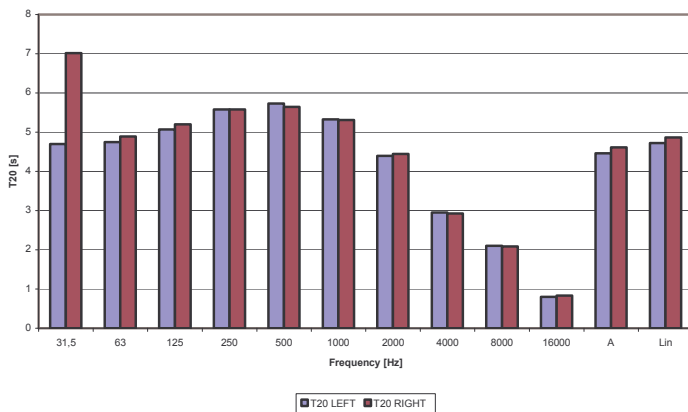
Ts - WY Meas 3 STAGE



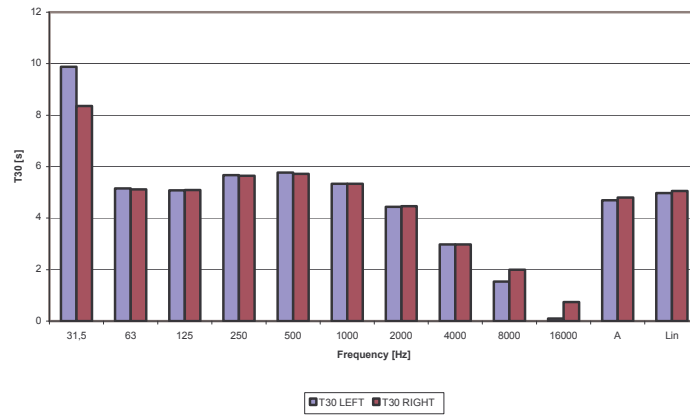
EDT - WY Meas 3 STAGE



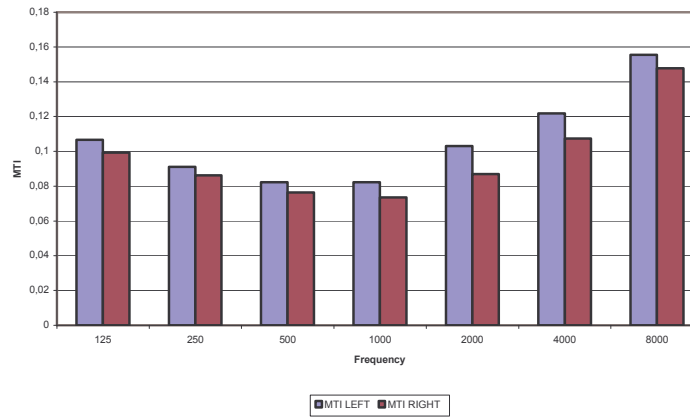
T20 - WY Meas 3 STAGE



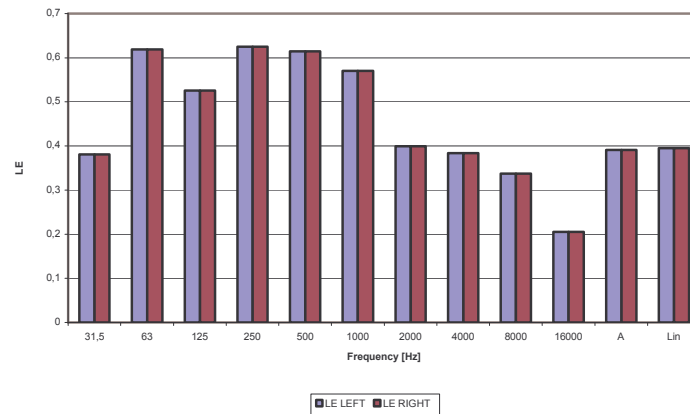
T30 - WY Meas 3 STAGE



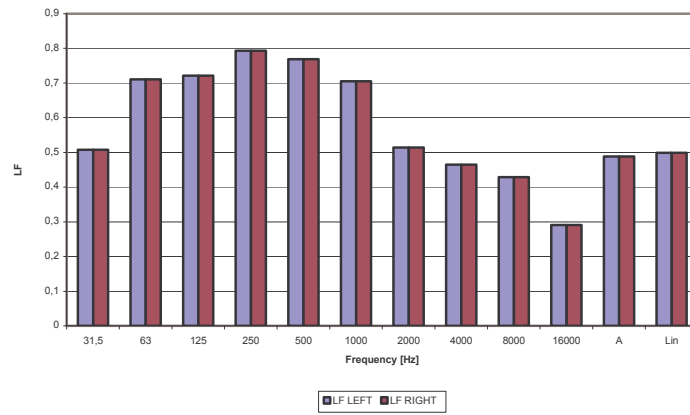
MTI



LE - WY Meas 3 STAGE



LF - WY Meas 3 STAGE



LFC - WY Meas 3 STAGE

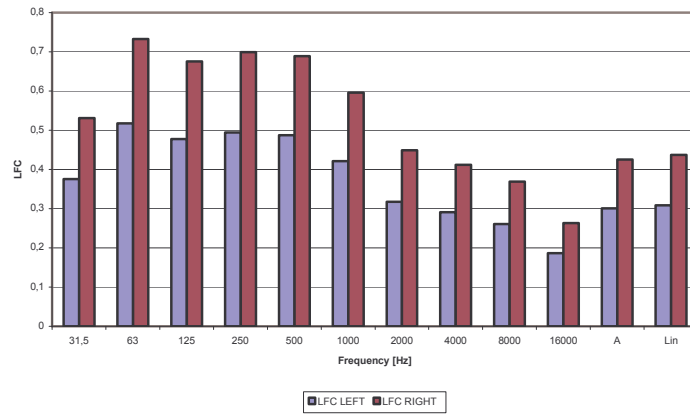
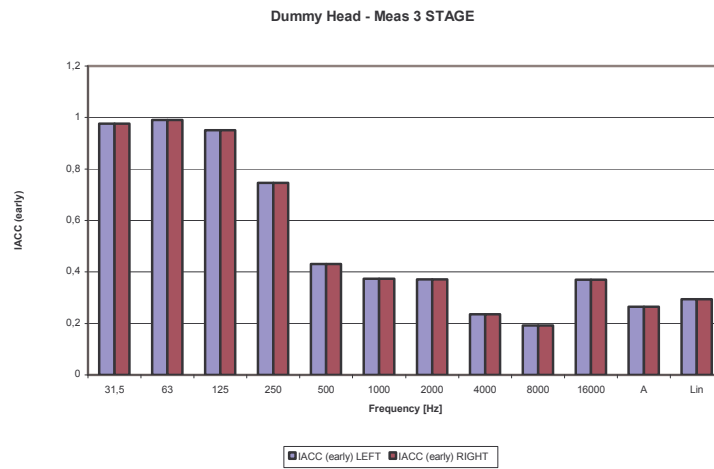
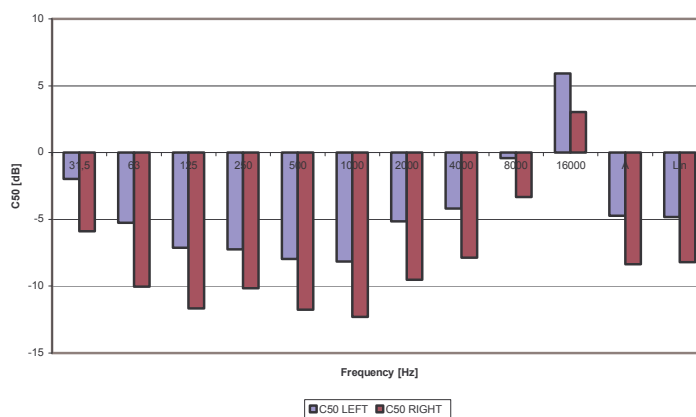


GRAFICO DUMMY HEAD – S3

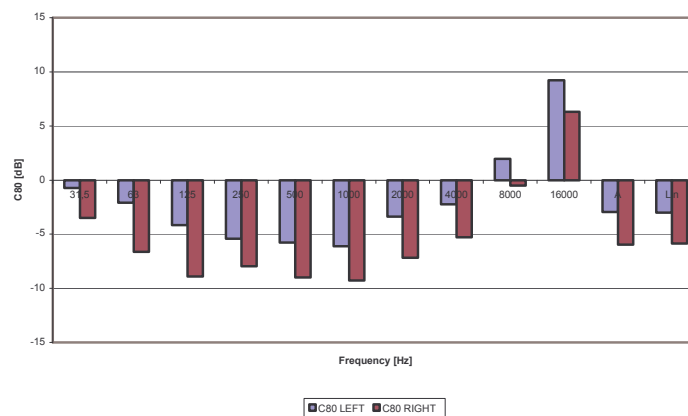


GRAFICI XZ – S3

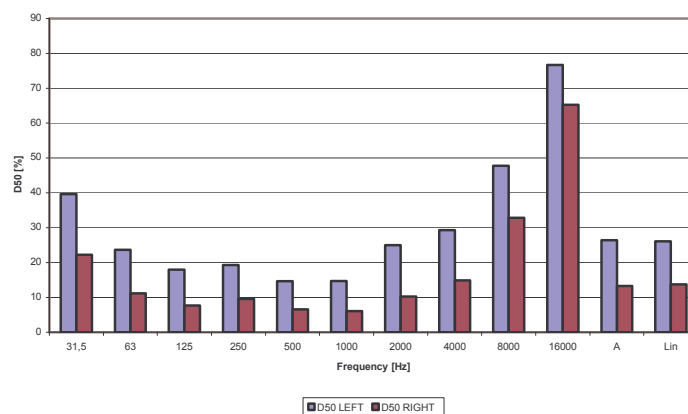
C50 - XZ Meas 3 STAGE



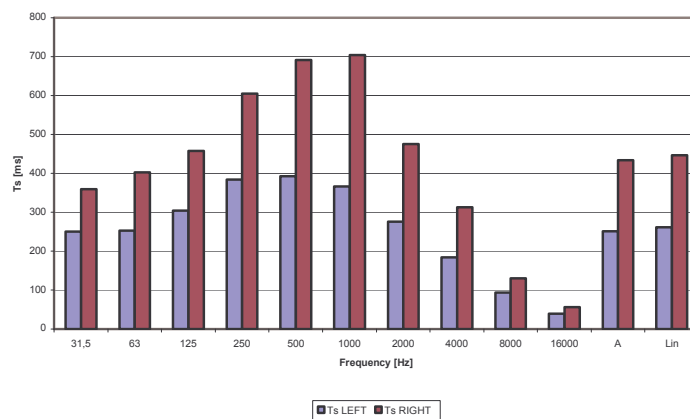
C80 - XZ Meas 3 STAGE



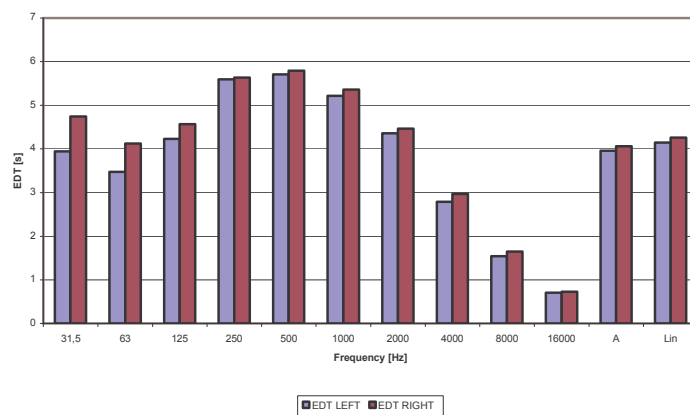
D50 - XZ Meas 3 STAGE



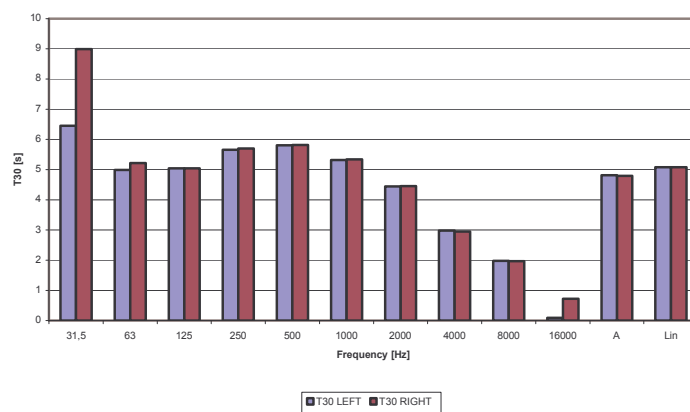
Ts - XZ Meas 3 STAGE



EDT - XZ Meas 3 STAGE

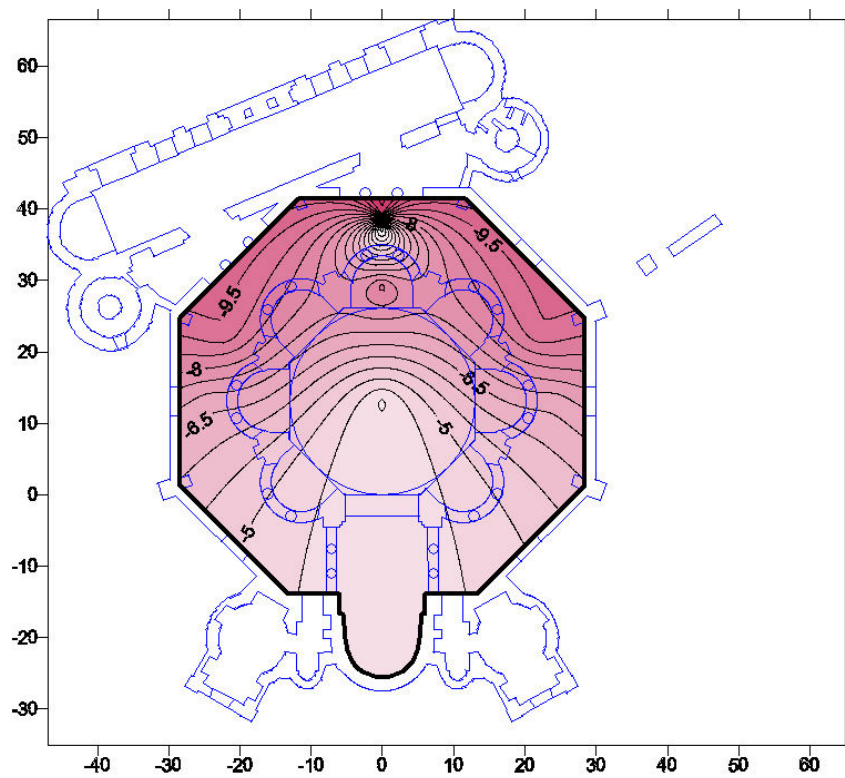


T30 - XZ Meas 3 STAGE

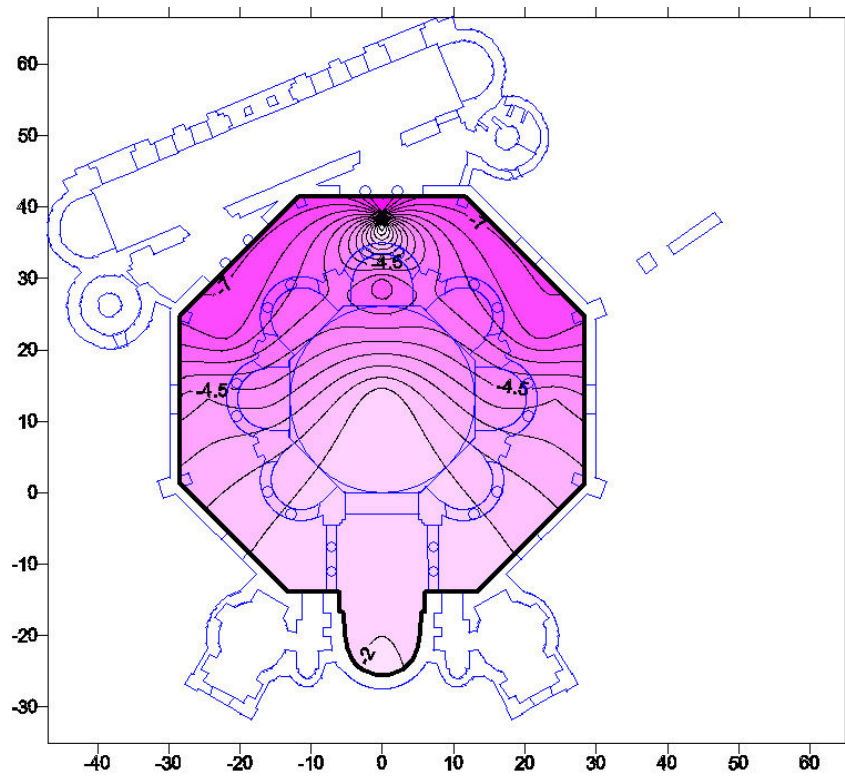


Mappe acustiche WY – S1

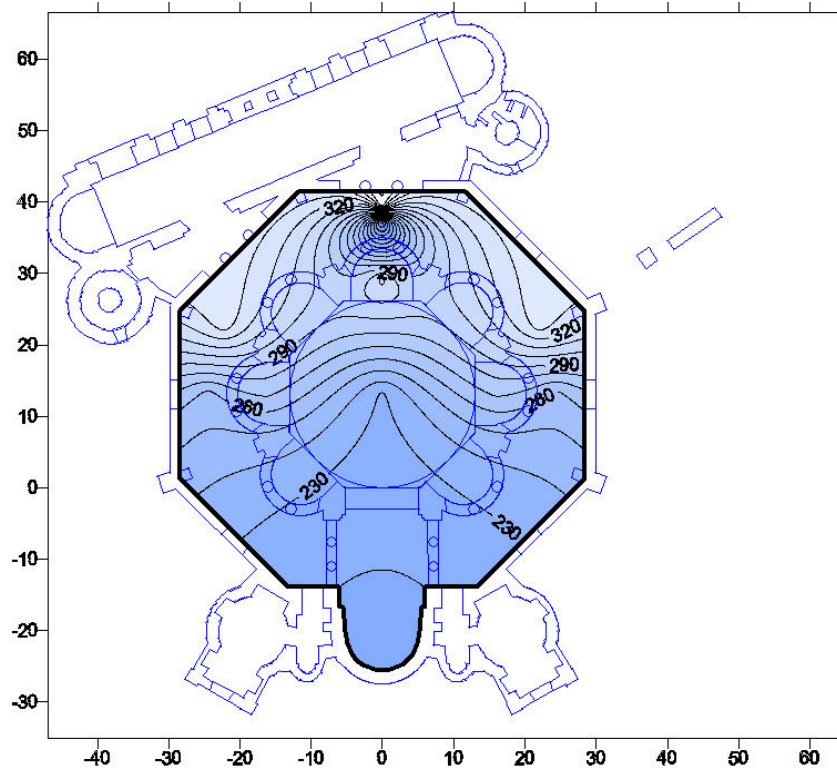
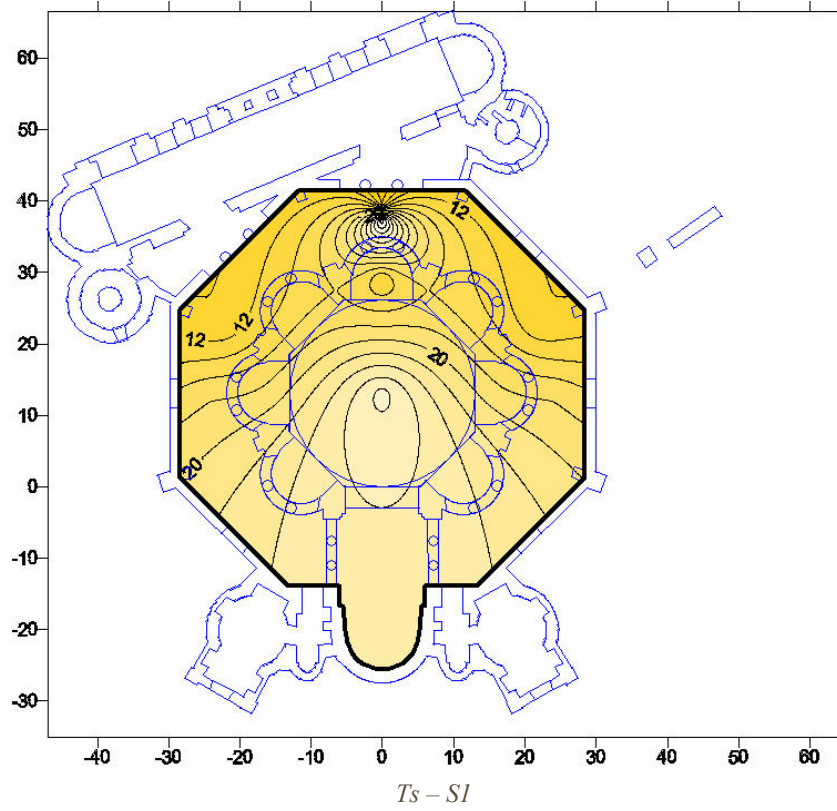
C 50 – S1



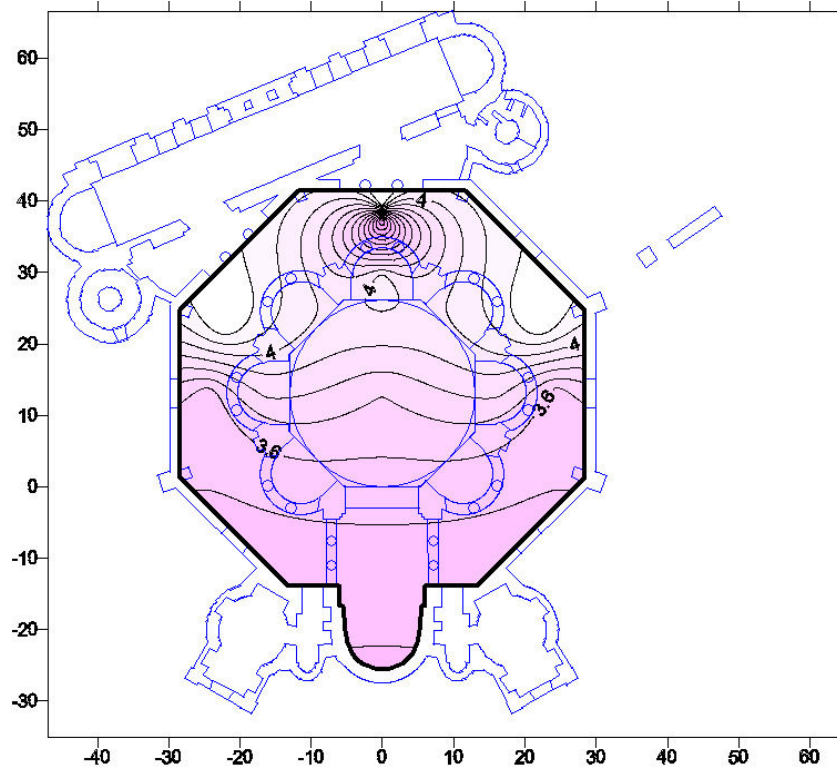
C80 – S1



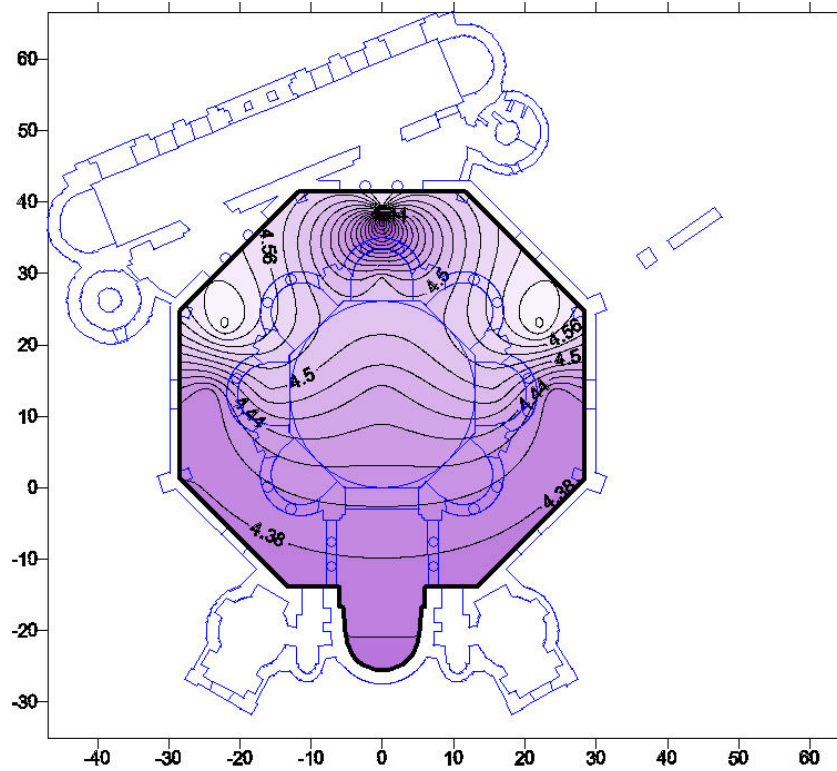
D50 – S1



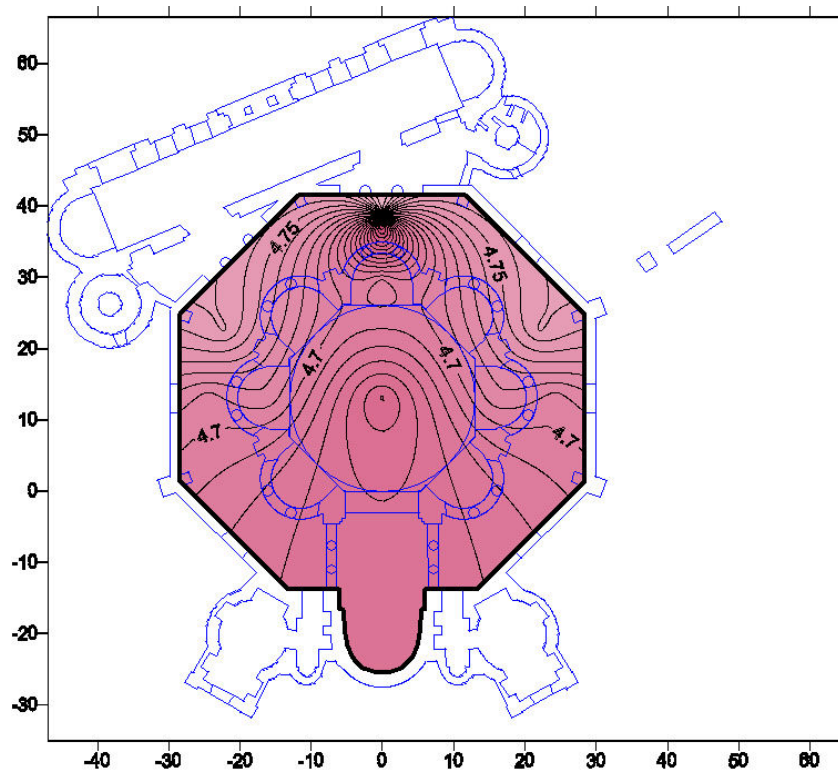
EDT - SI



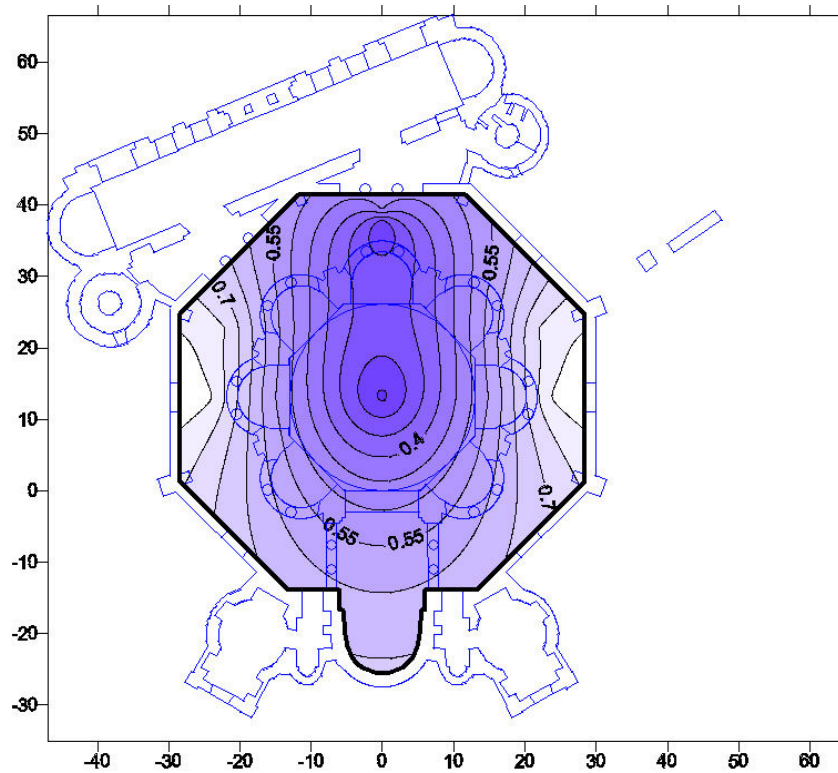
T20 - SI



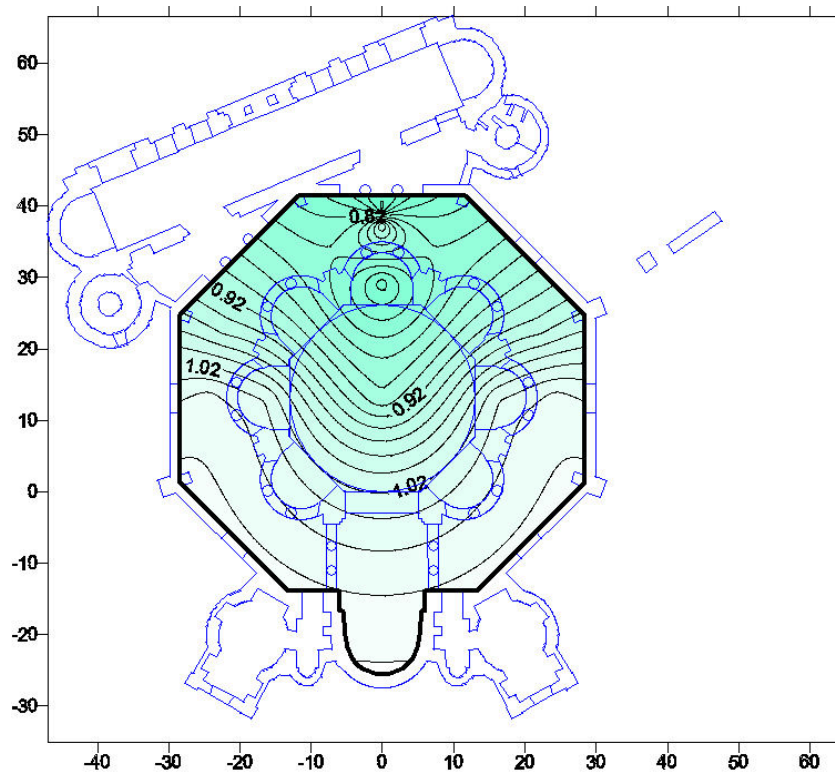
T30 - SI



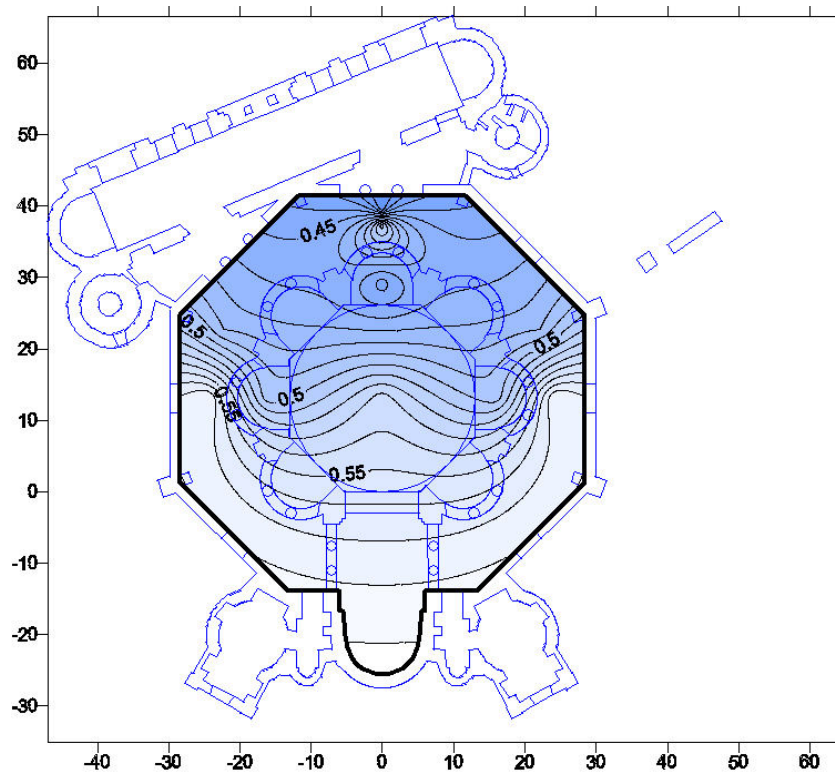
LE - SI



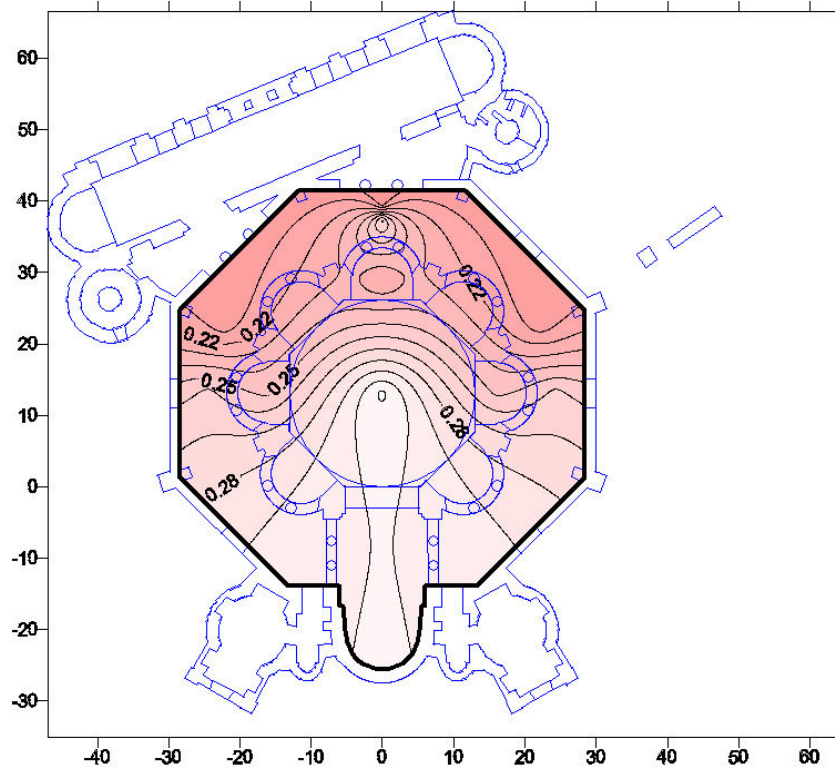
LF - SI



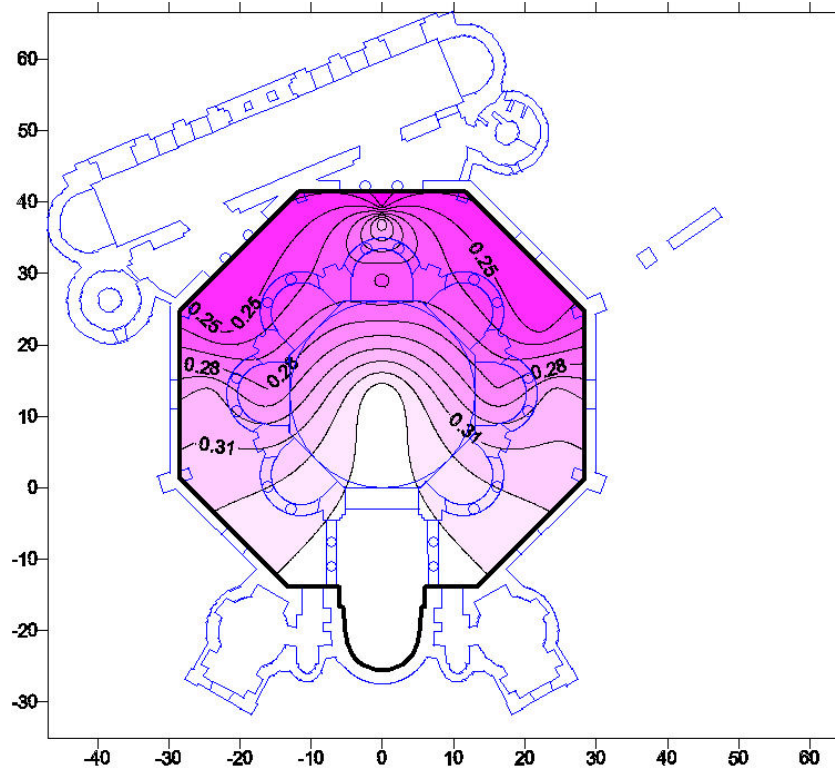
LFC - SI



RASTI - SI

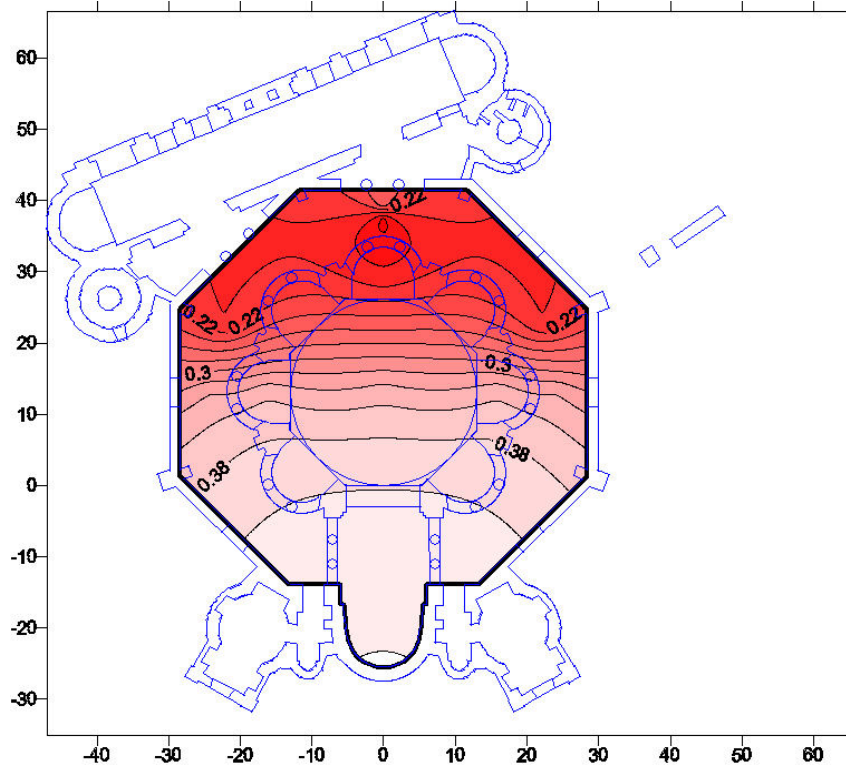


STIMALE - SI



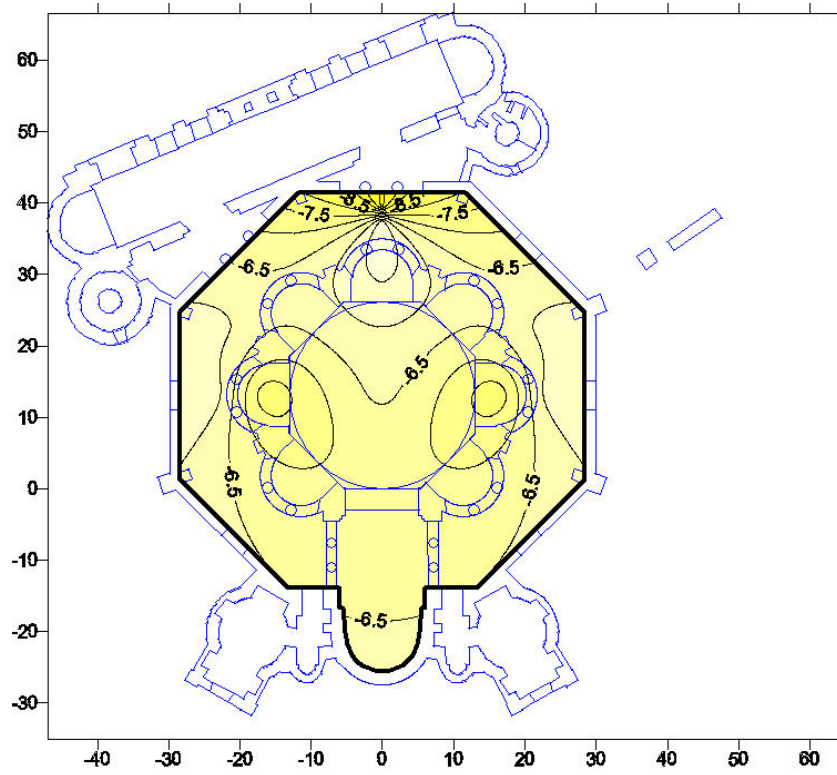
Mappe acustiche DUMMY HEAD – S1

IACC – S1

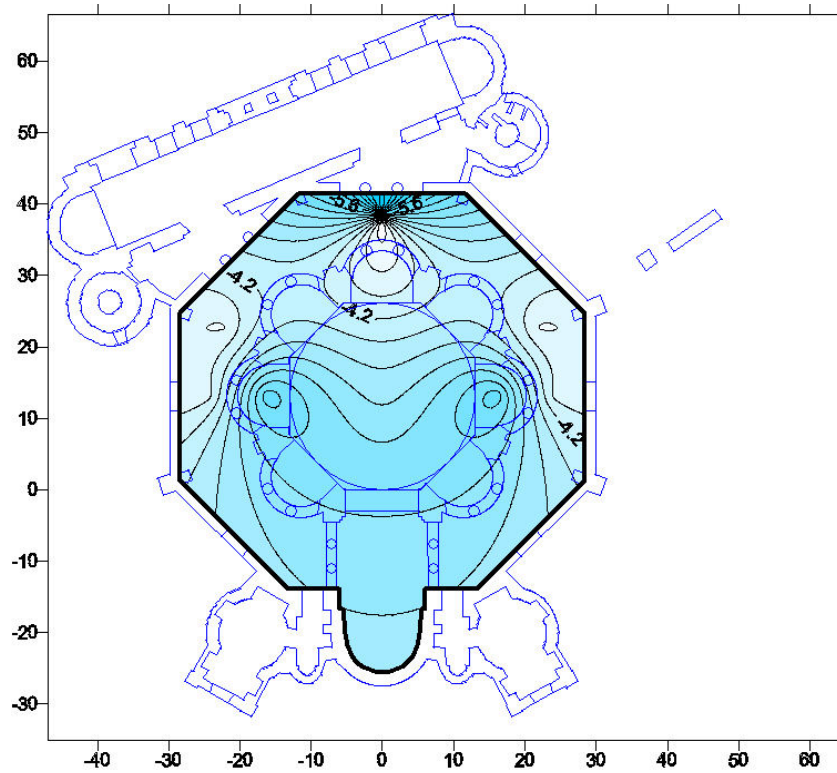


Mappe acustiche WY – S2

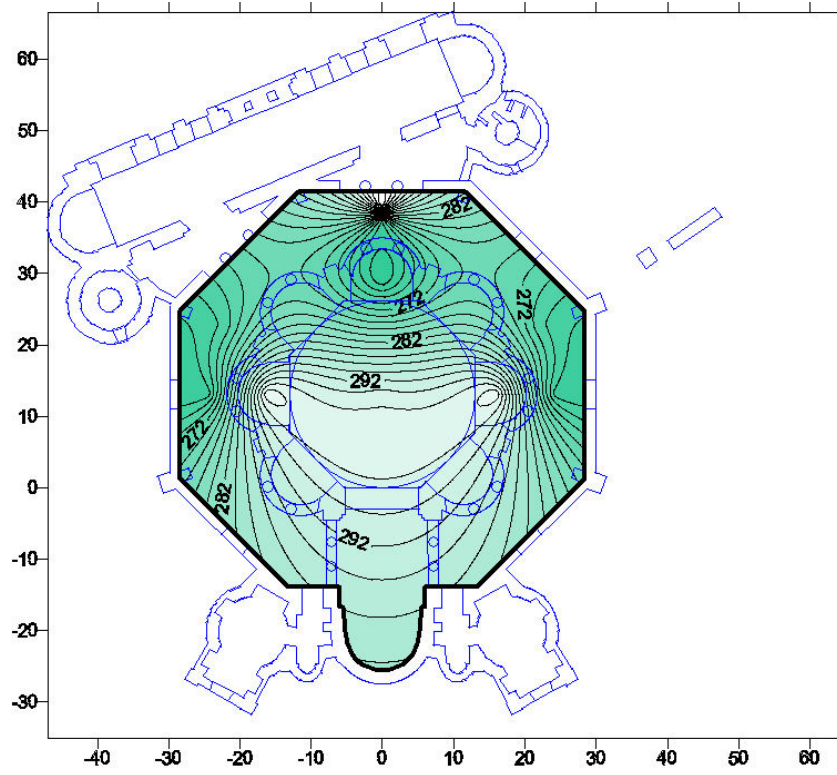
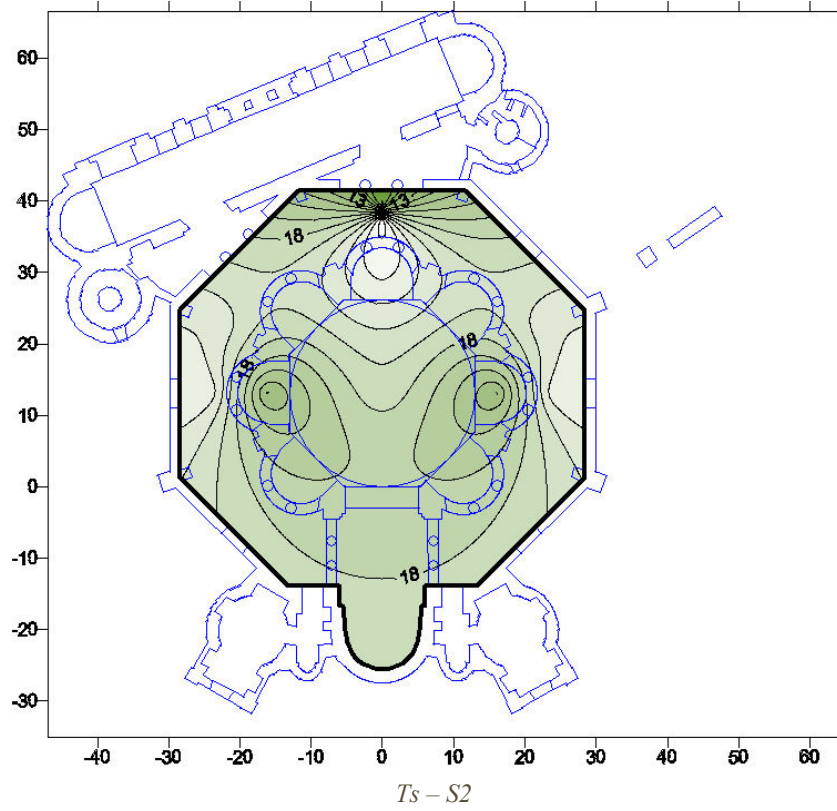
C50 – S2



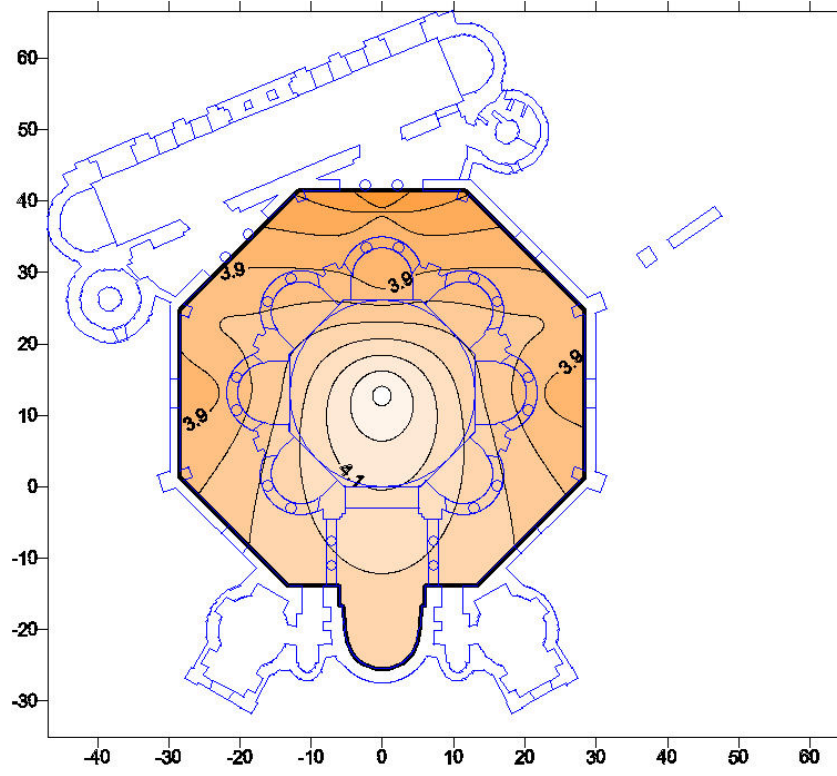
C80 – S2



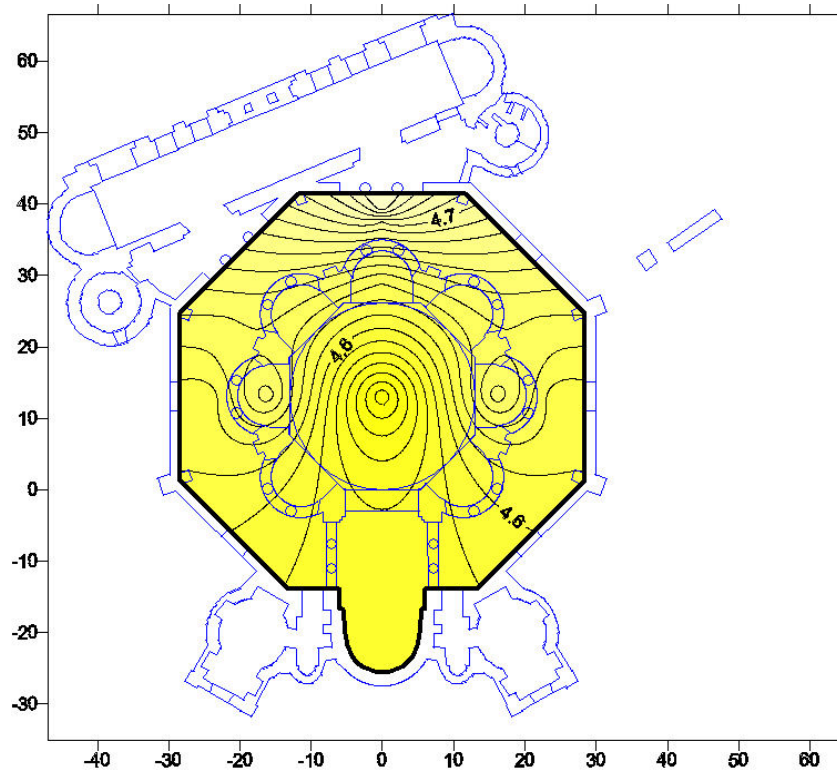
D50 – S2



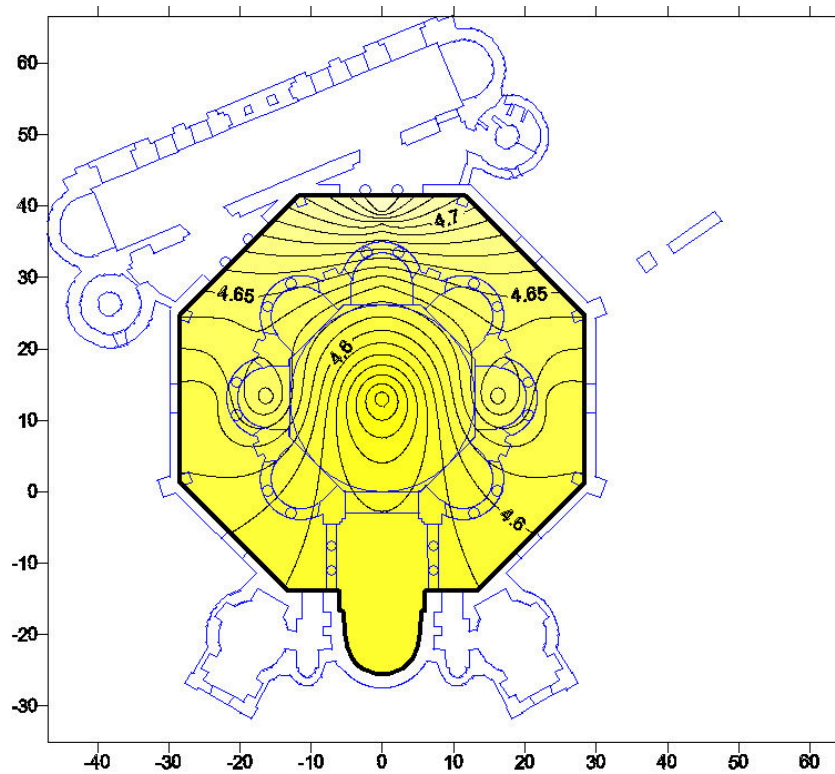
EDT - S2



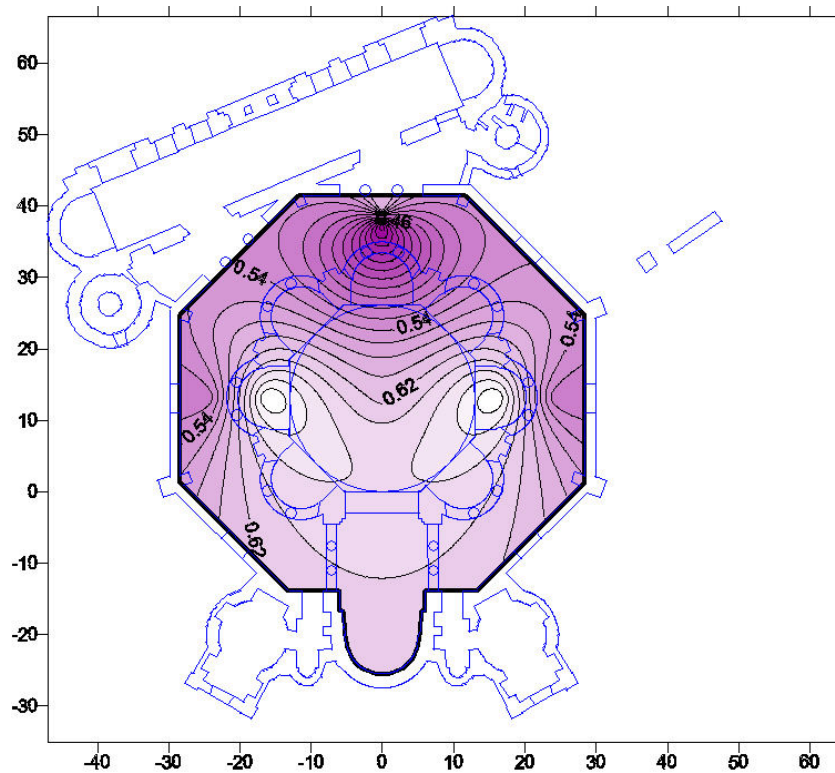
T20 - S2



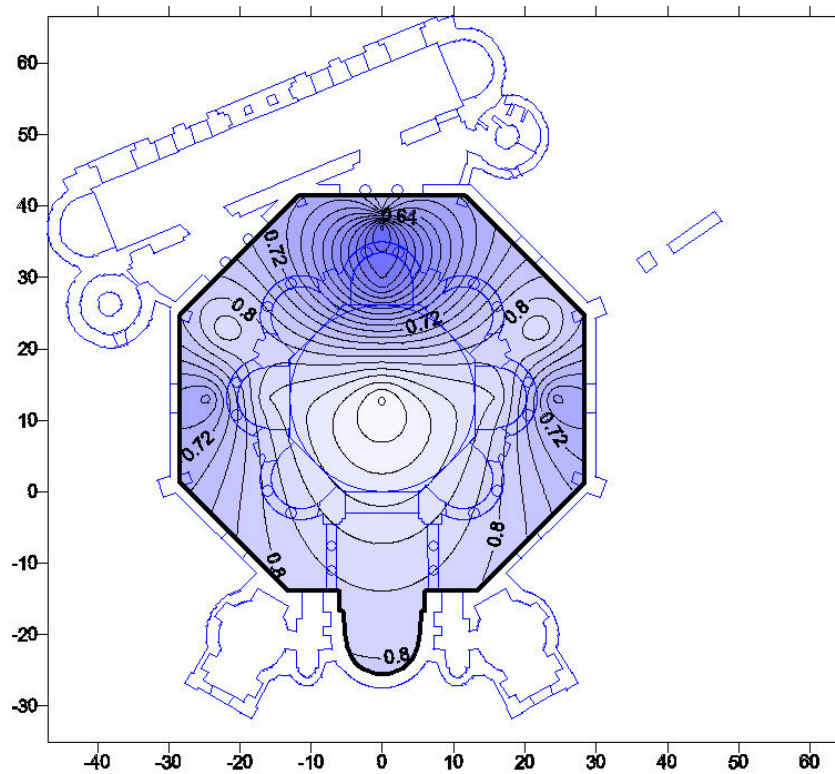
T30 - S2



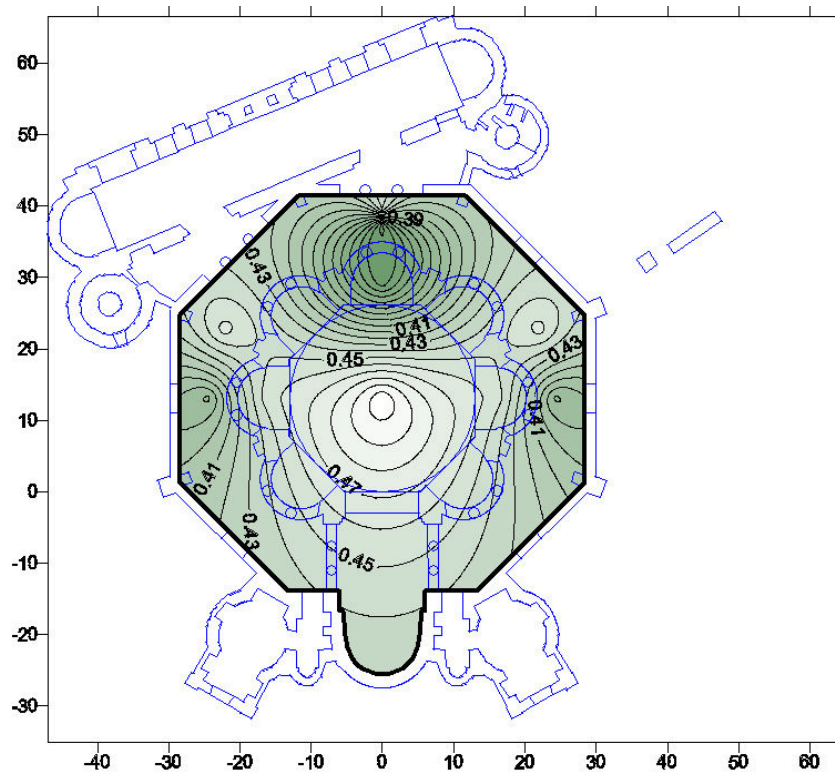
LE - S2



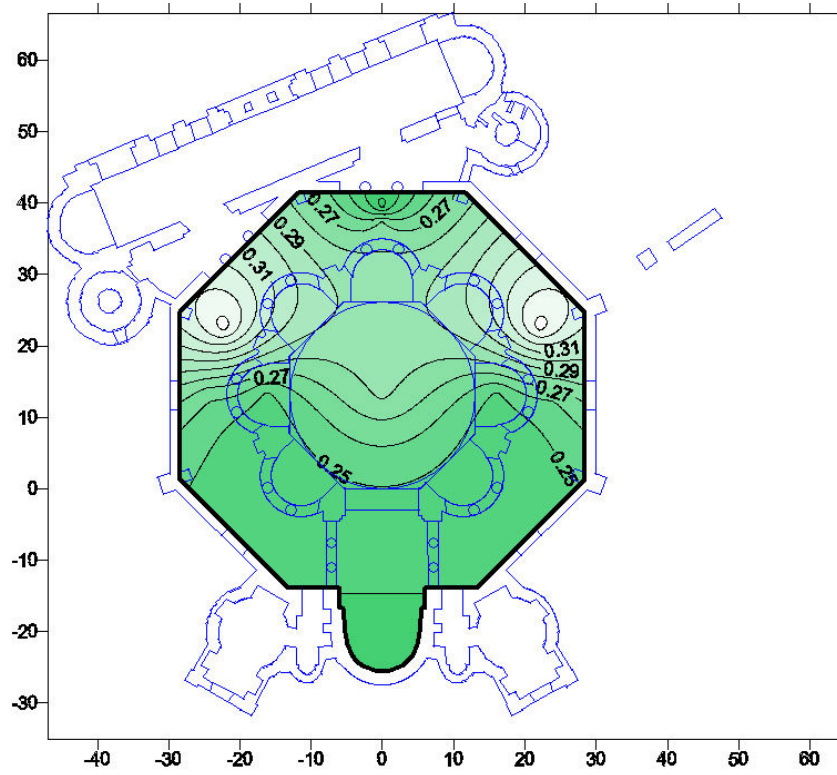
LF - S2



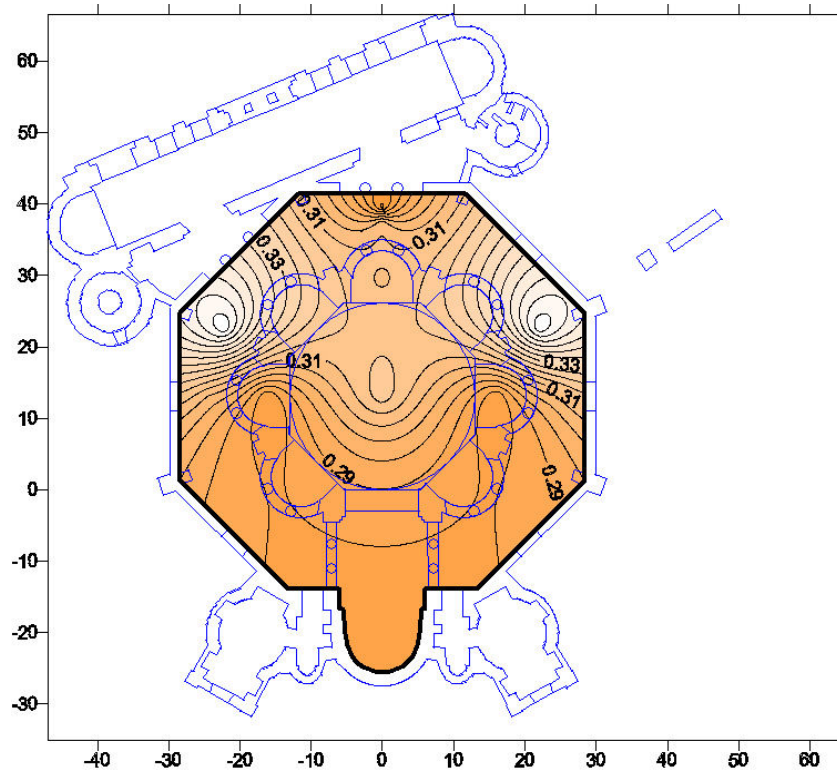
LFC - S2



RASTI - S2

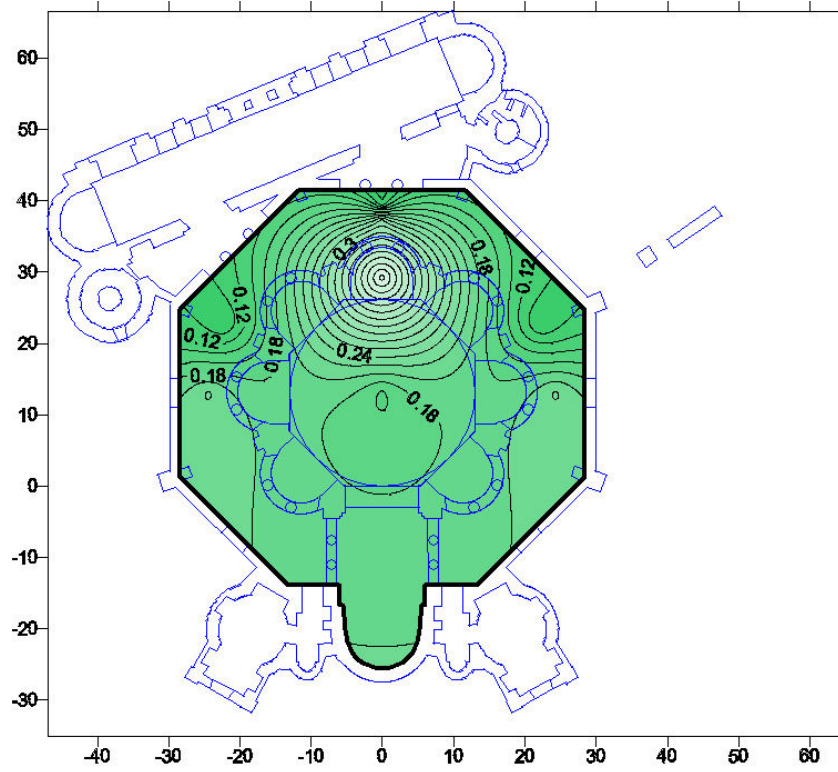


STIMALE - S2



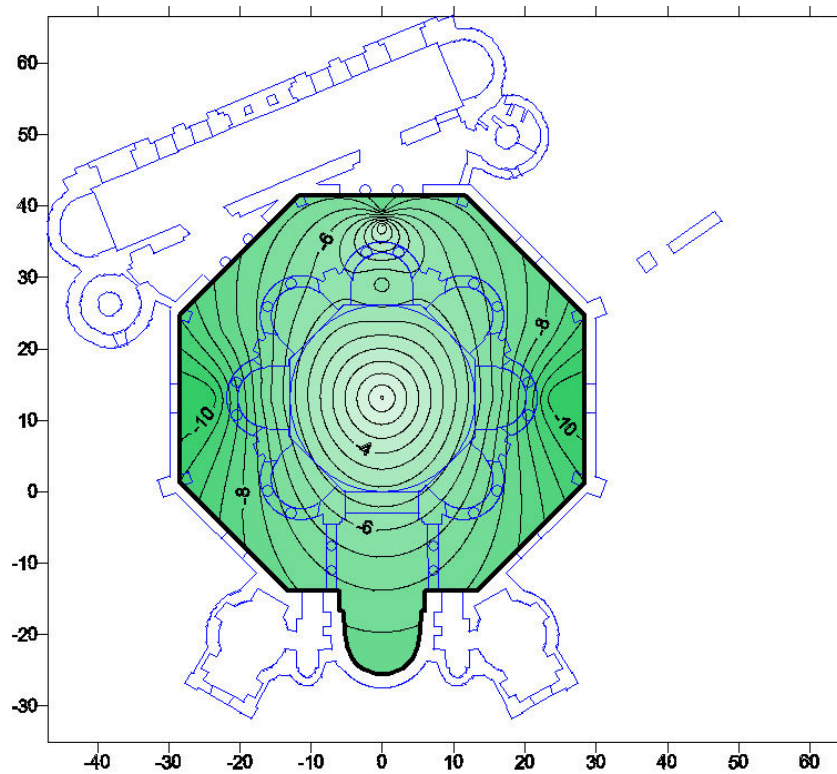
Mappe acustiche DUMMY HEAD – S2

IACC – S2

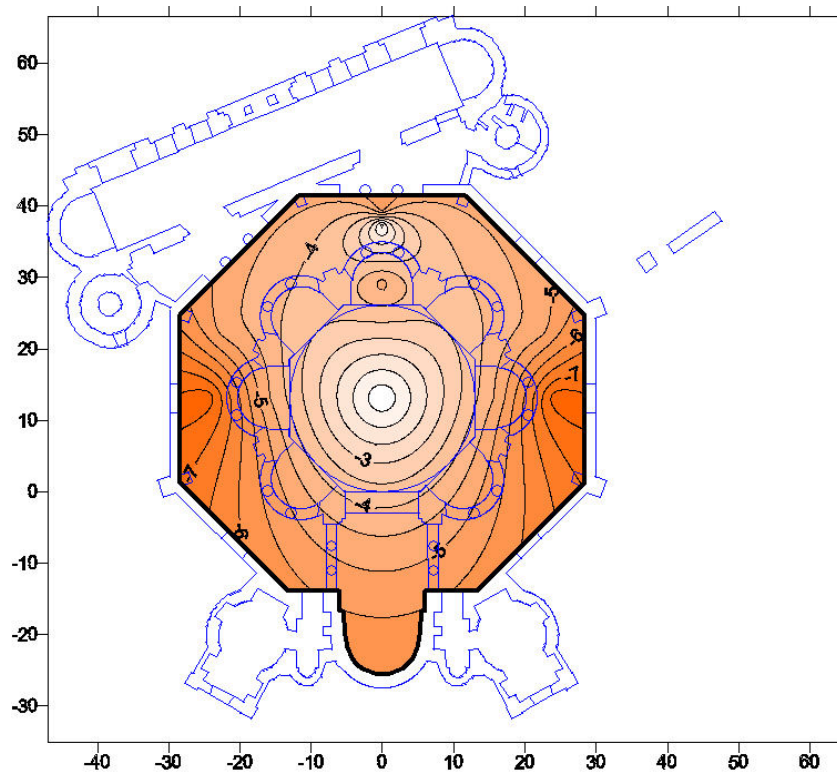


Mappe acustiche WY – S3

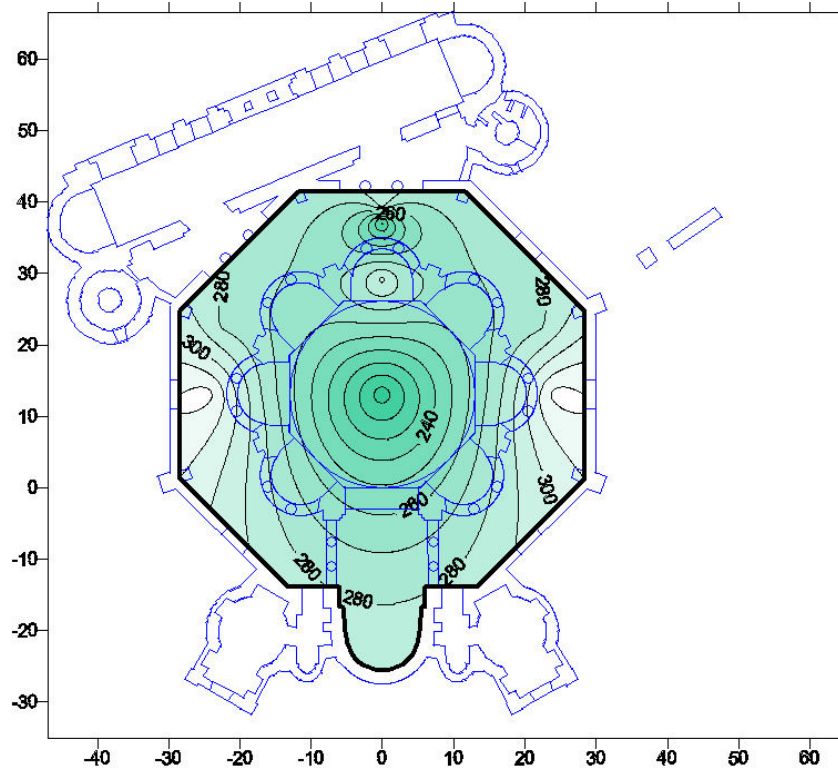
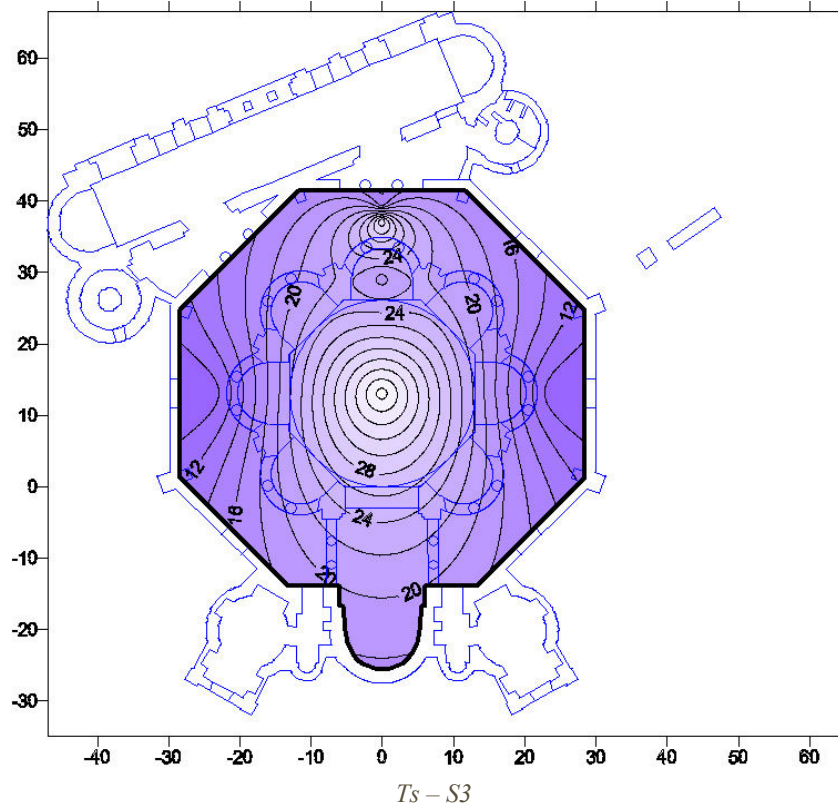
C50 – S3



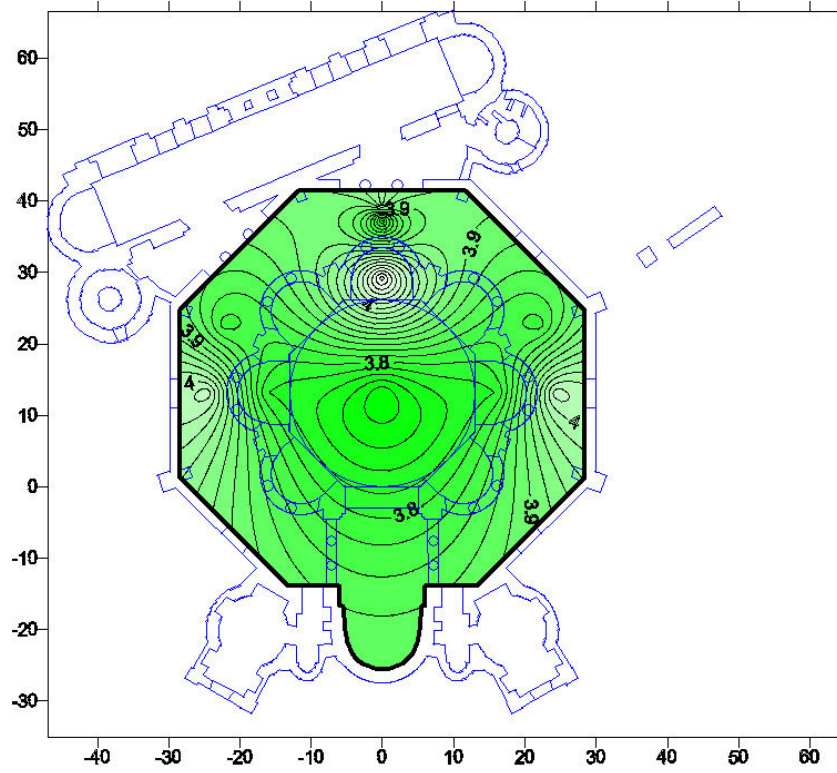
C80 – S3



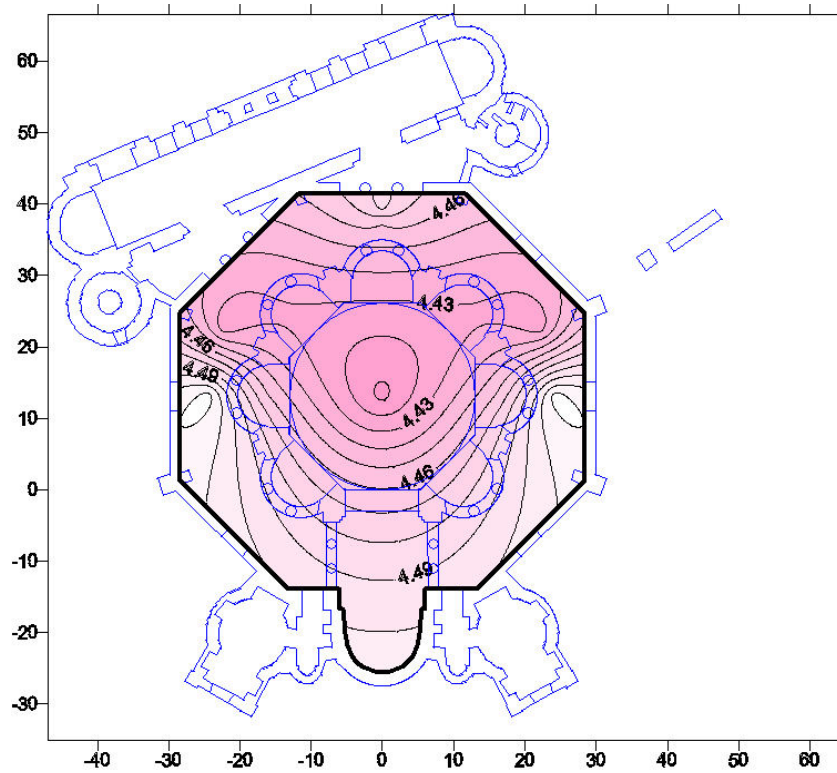
D50 – S3



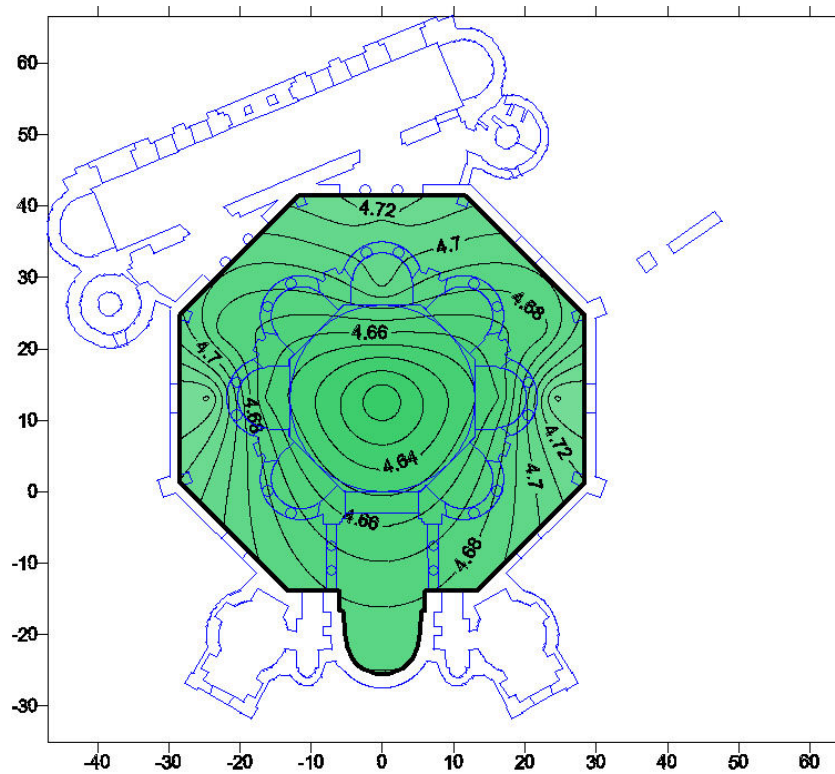
EDT - S3



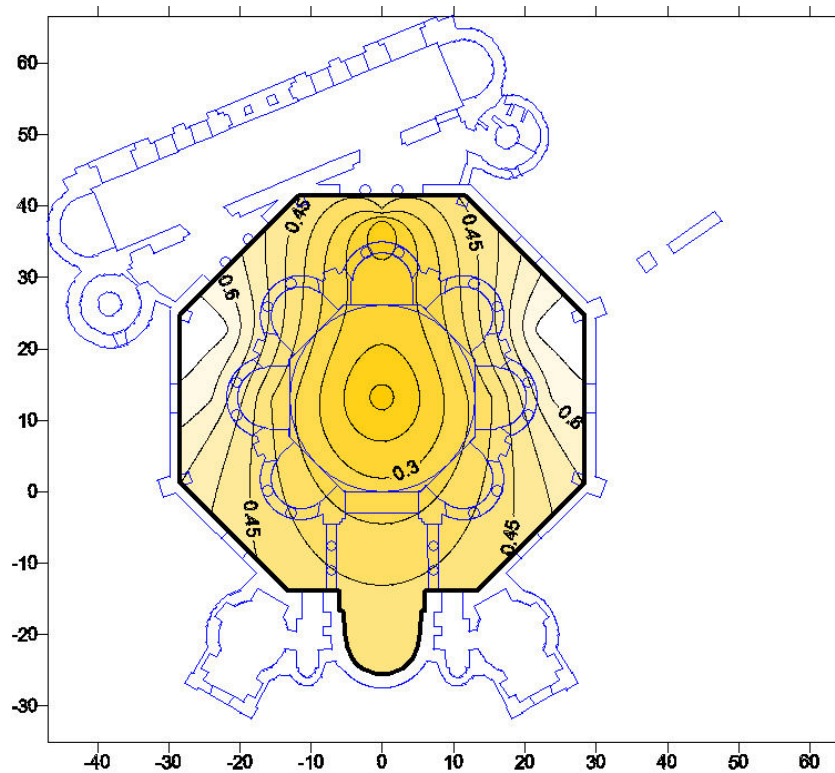
T20 - S3



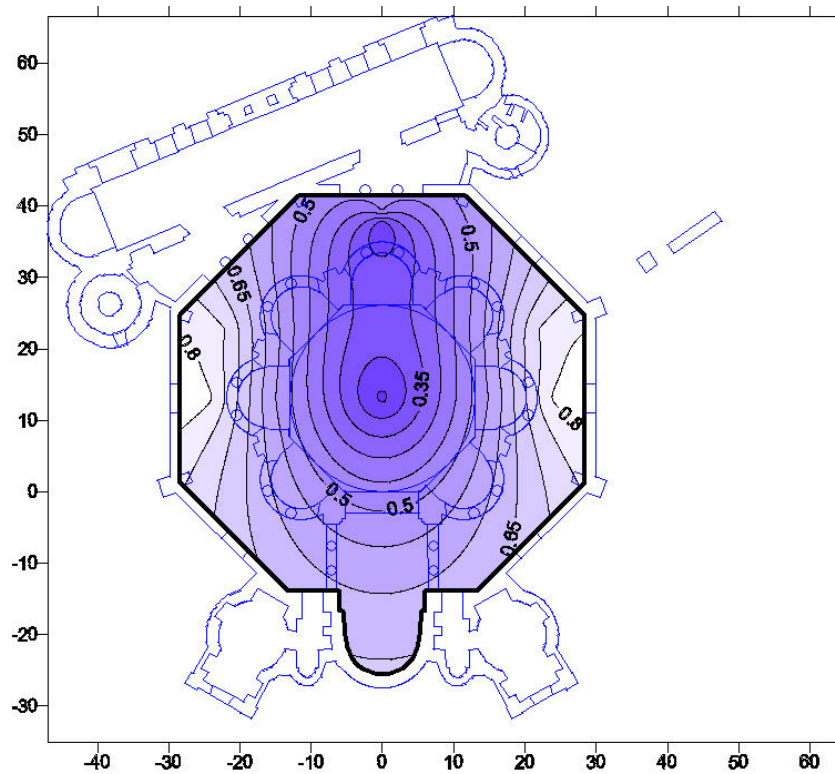
T30 – S3



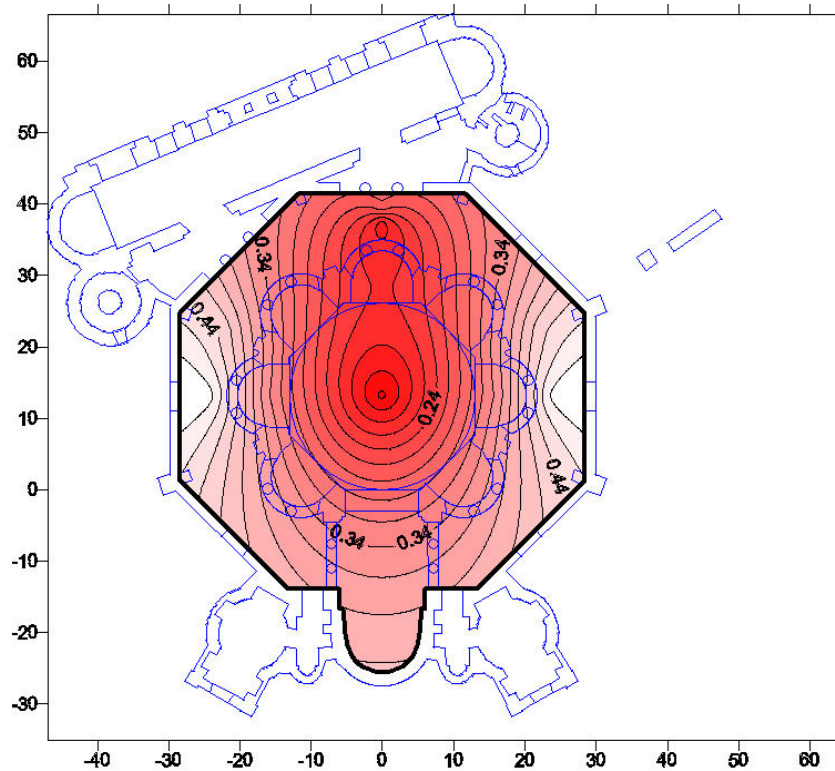
LE – S3



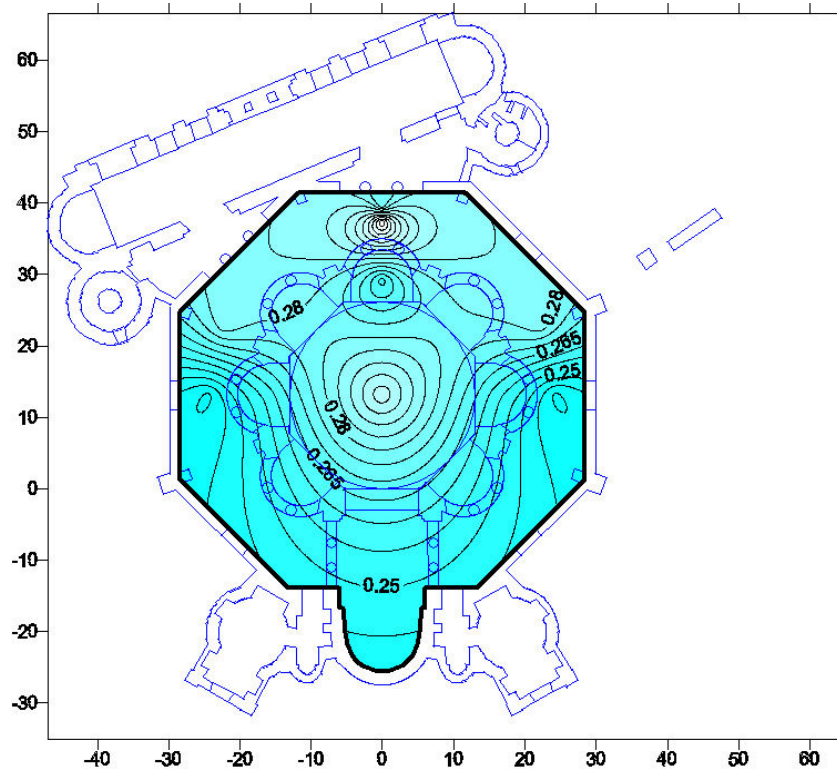
LF - S3



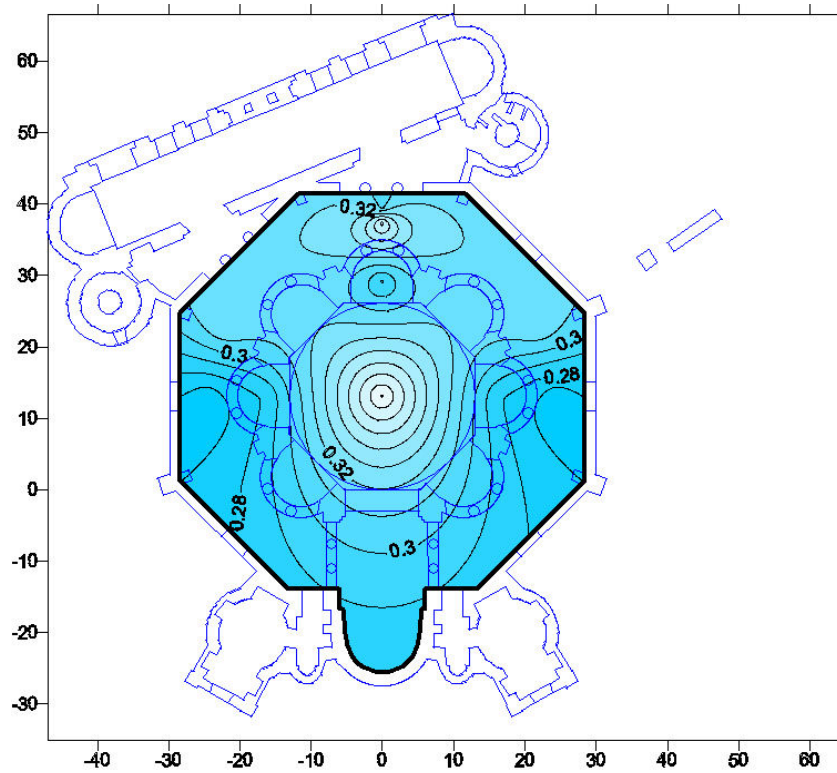
LFC - S3



RASTI – S3

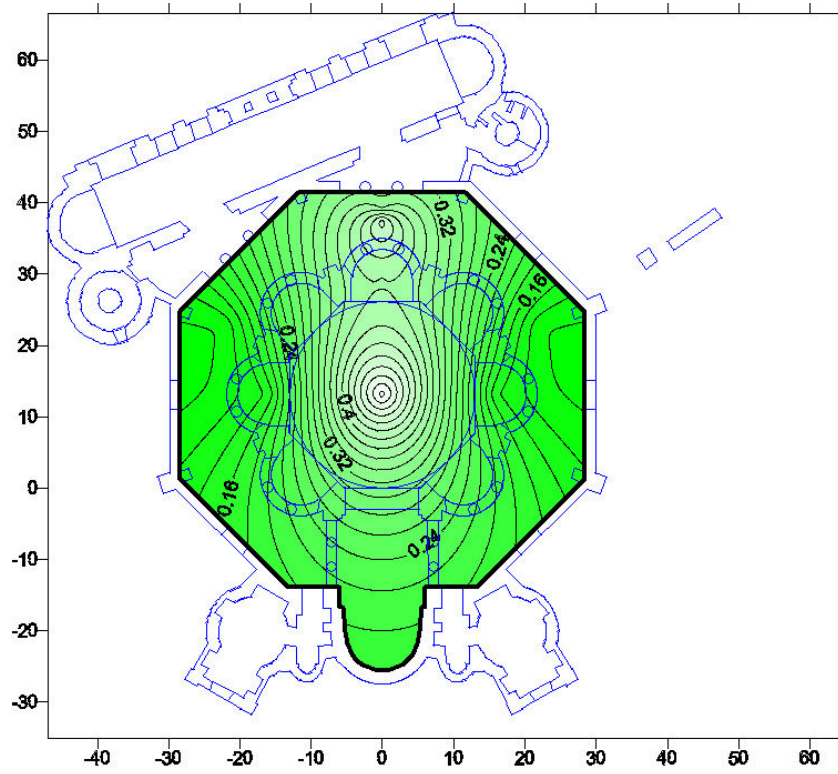


STIMALE – S3



Mappe acustiche DUMMY HEAD – S3

IACC – S3



APPENDICE B



FOTO 1



FOTO 2

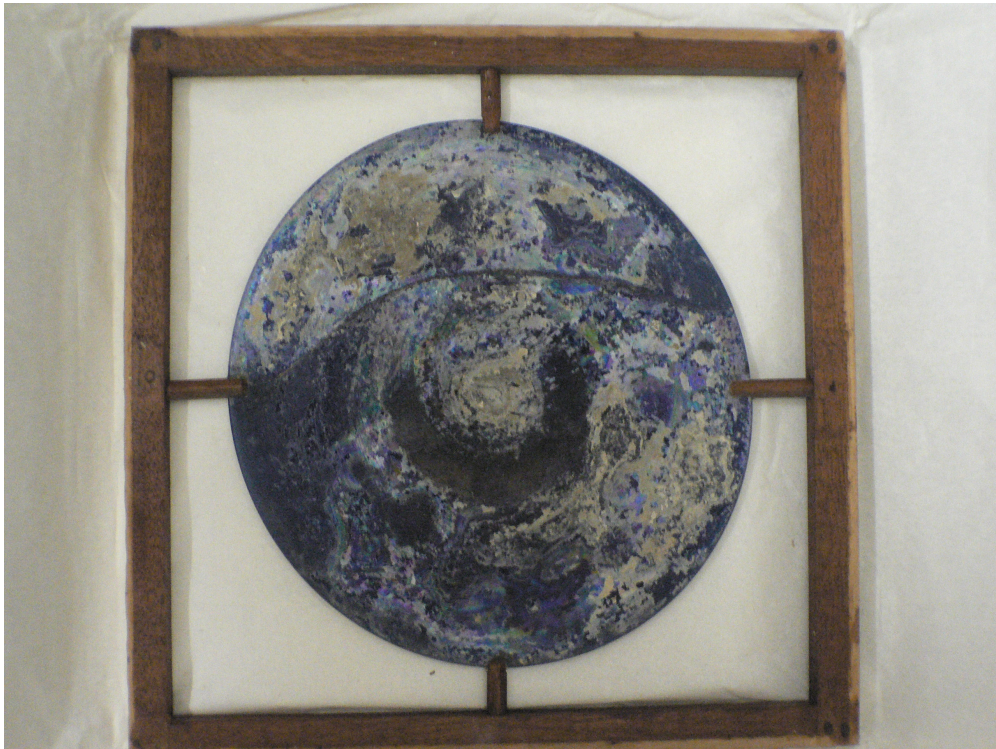


FOTO 3

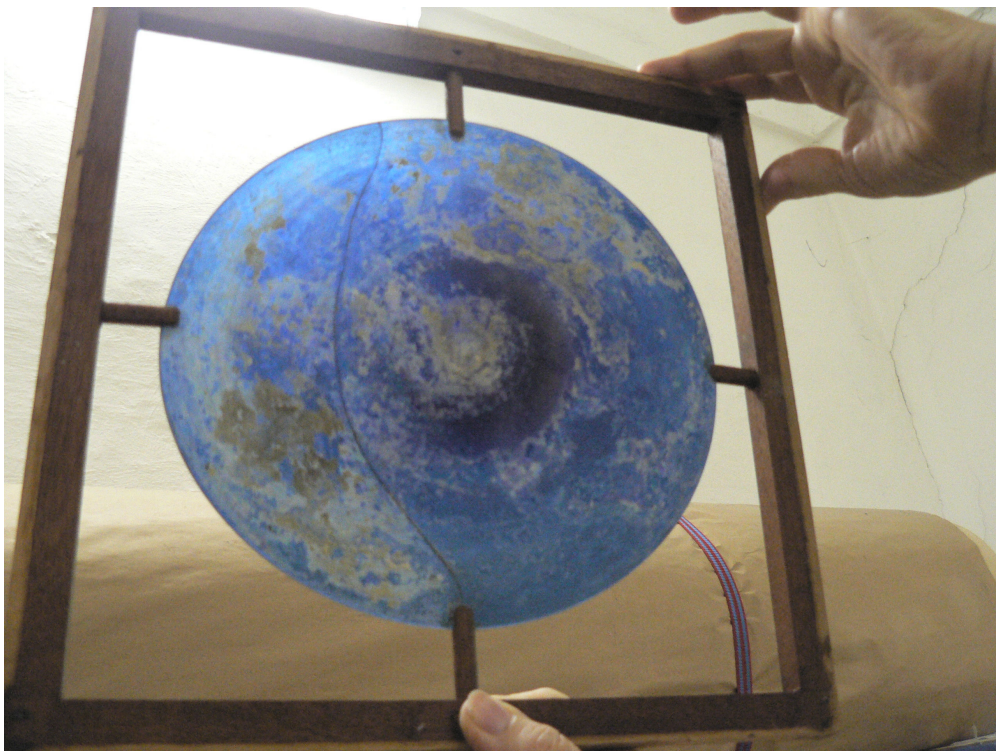


FOTO 4



FOTO 5

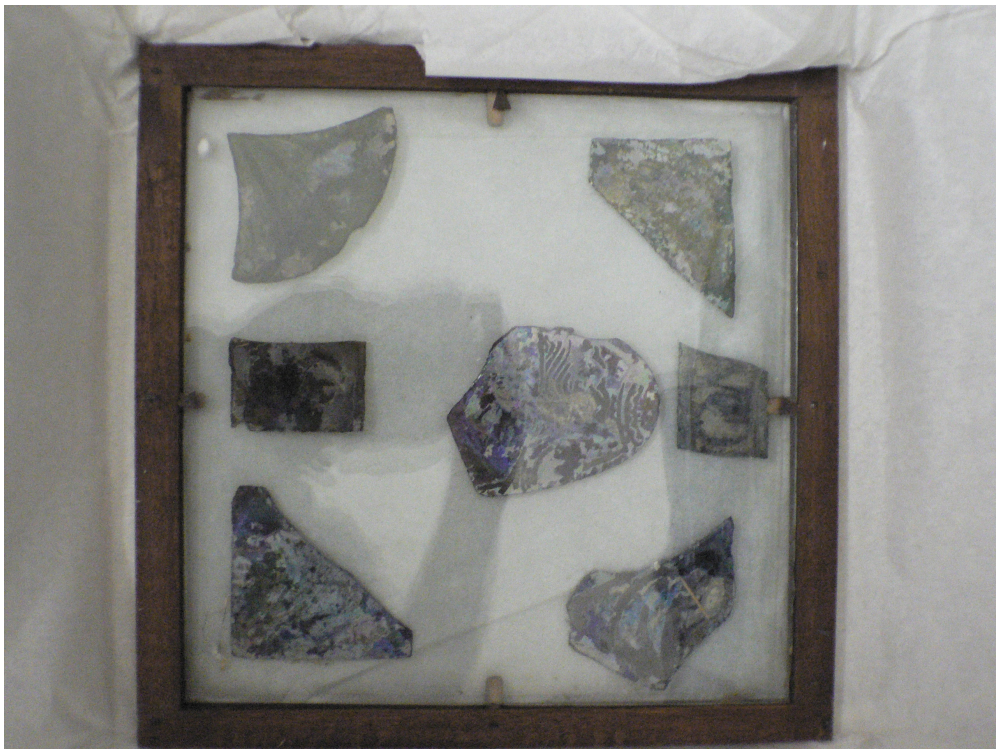


FOTO 6



FOTO 7



FOTO 8



FOTO 9



FOTO 10

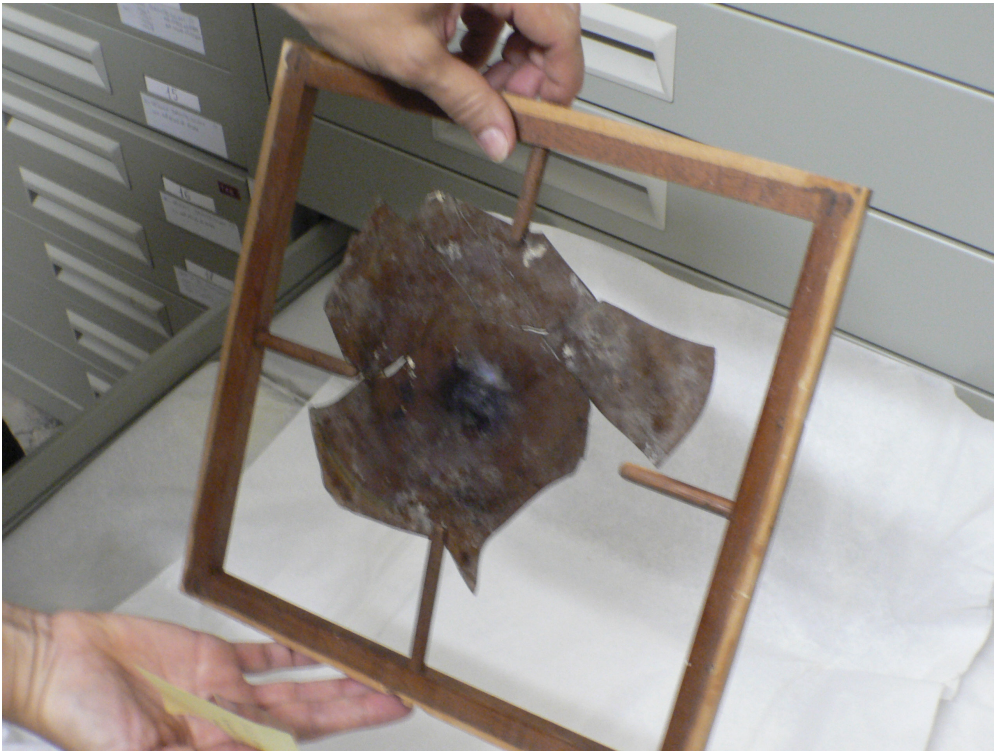


FOTO 11

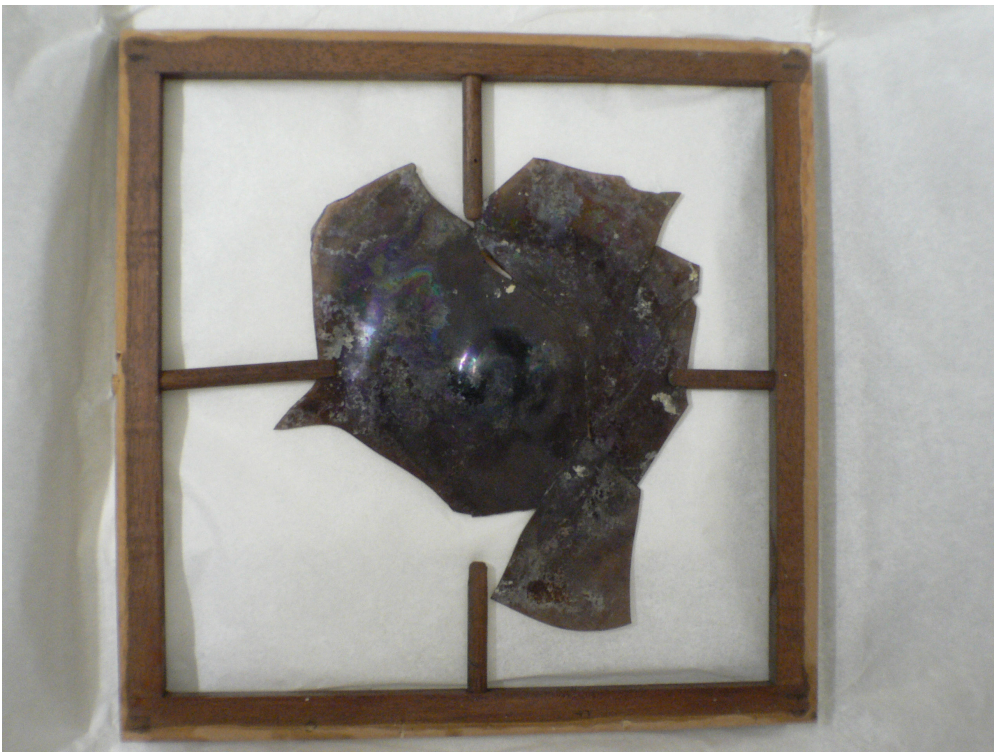


FOTO 12



FOTO 13

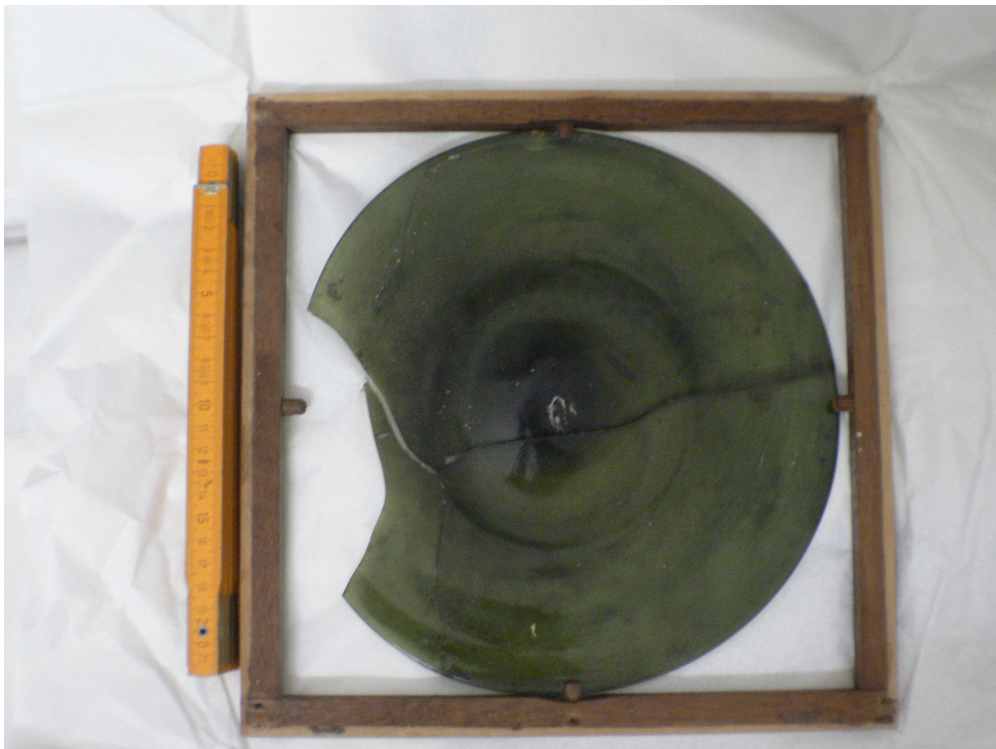


FOTO 14

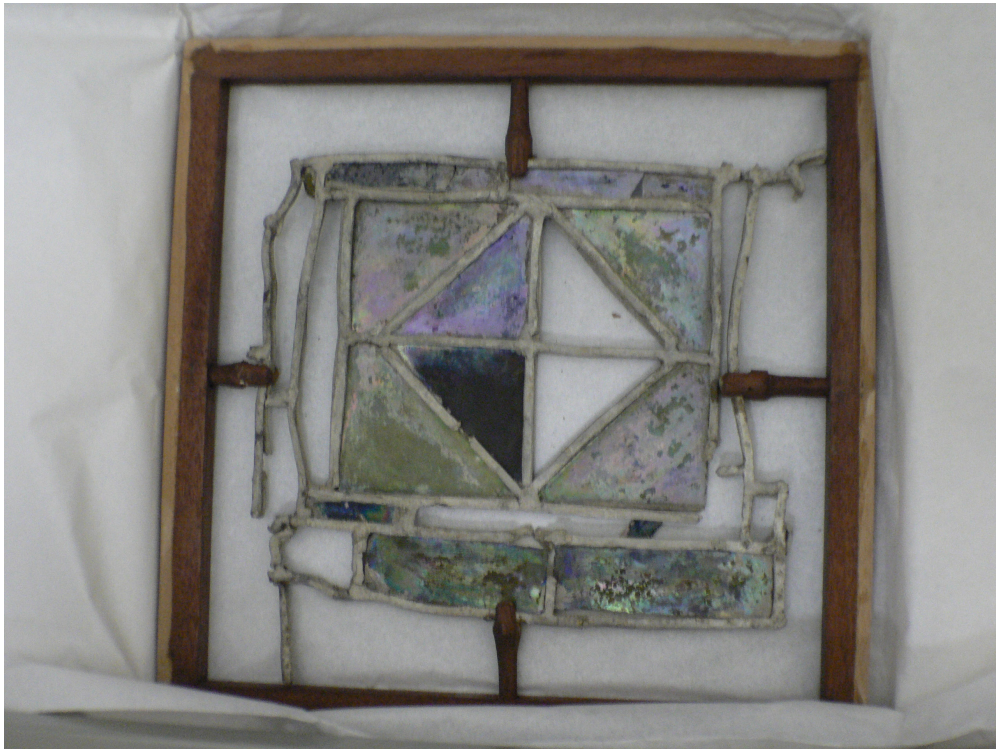


FOTO 15



FOTO 16

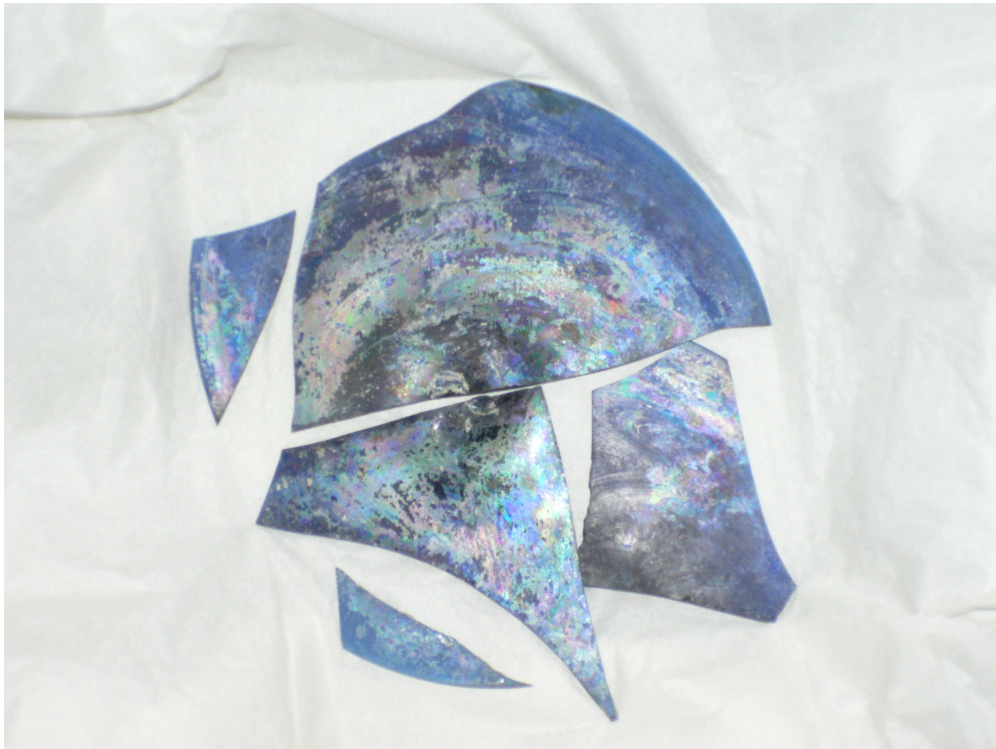


FOTO 17

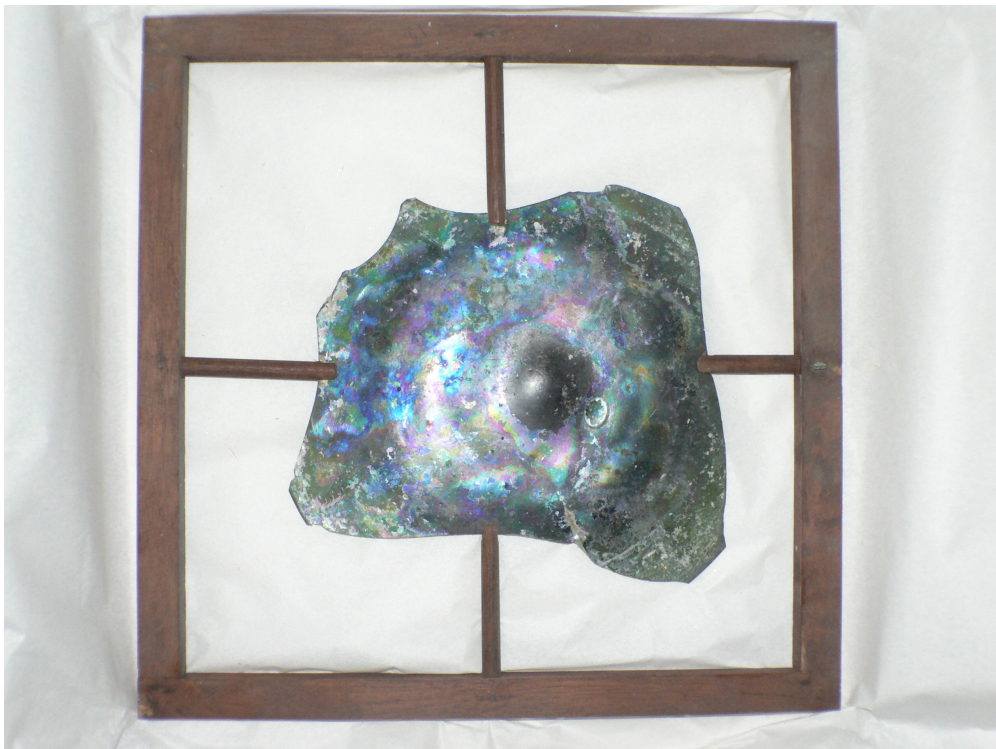


FOTO 18



FOTO 19

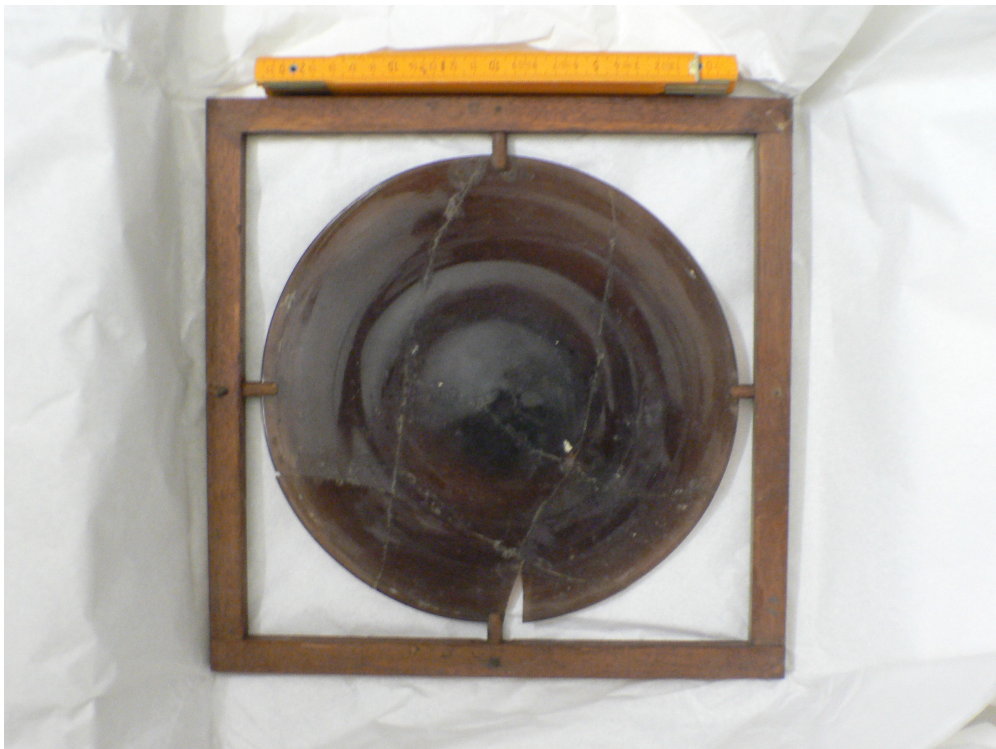


FOTO 20

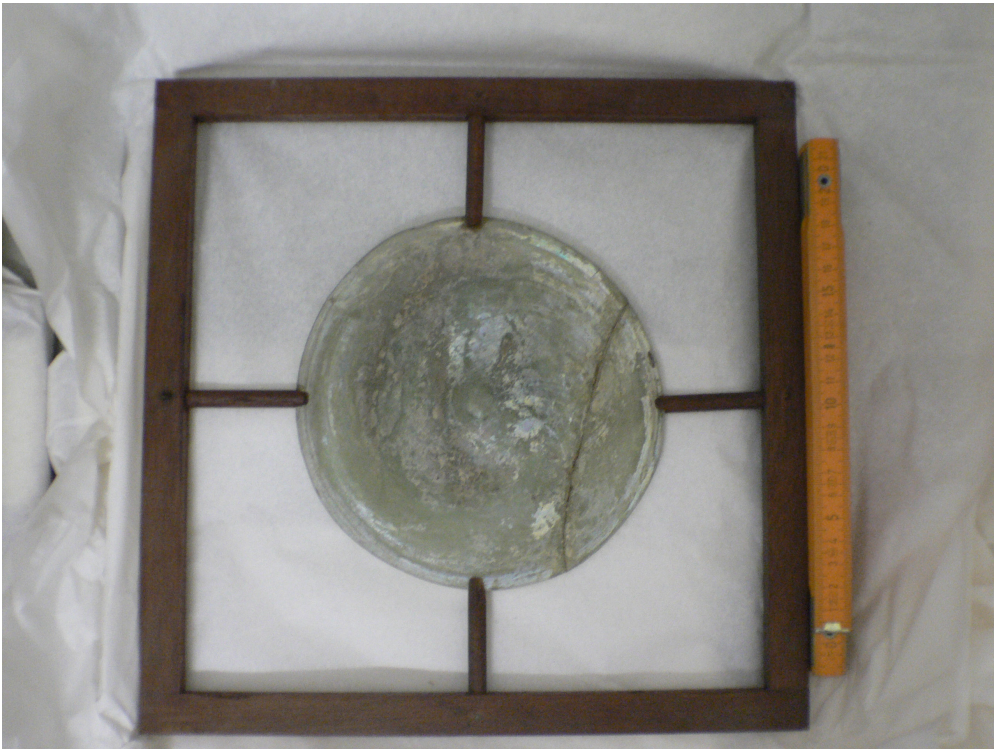


FOTO 21

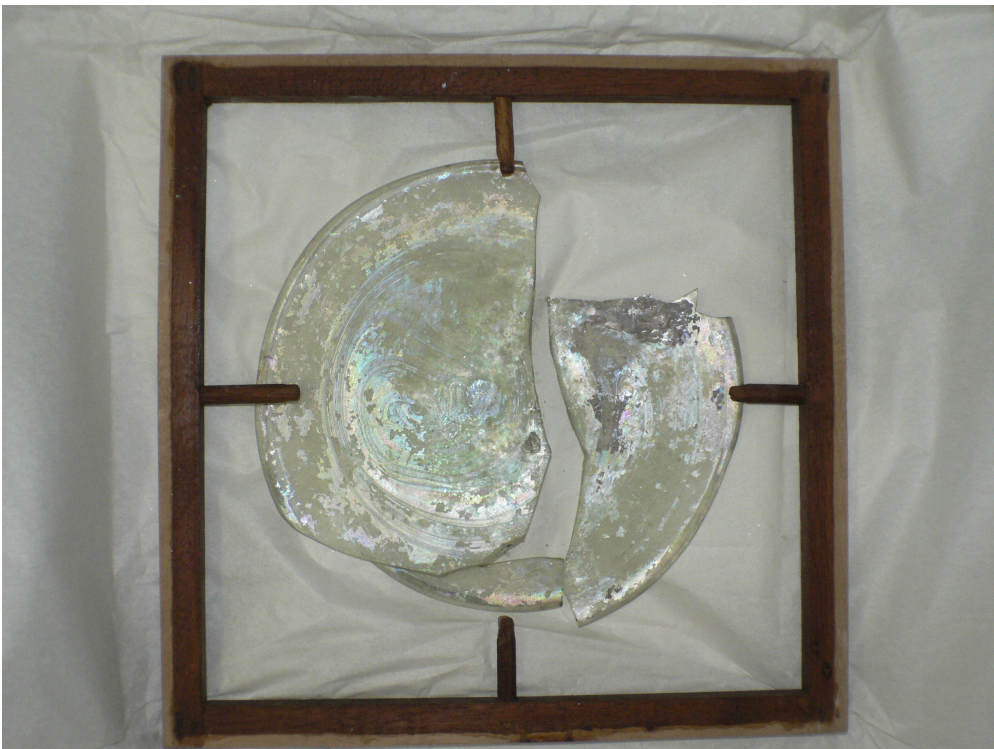


FOTO 22

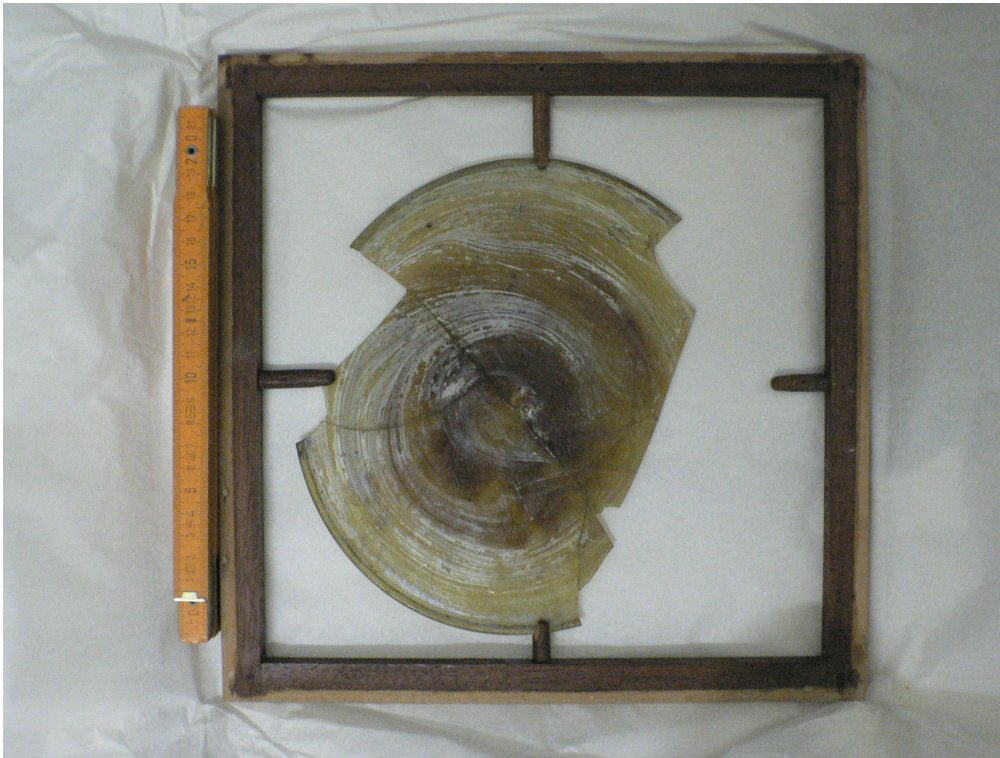


FOTO 23



FOTO 24