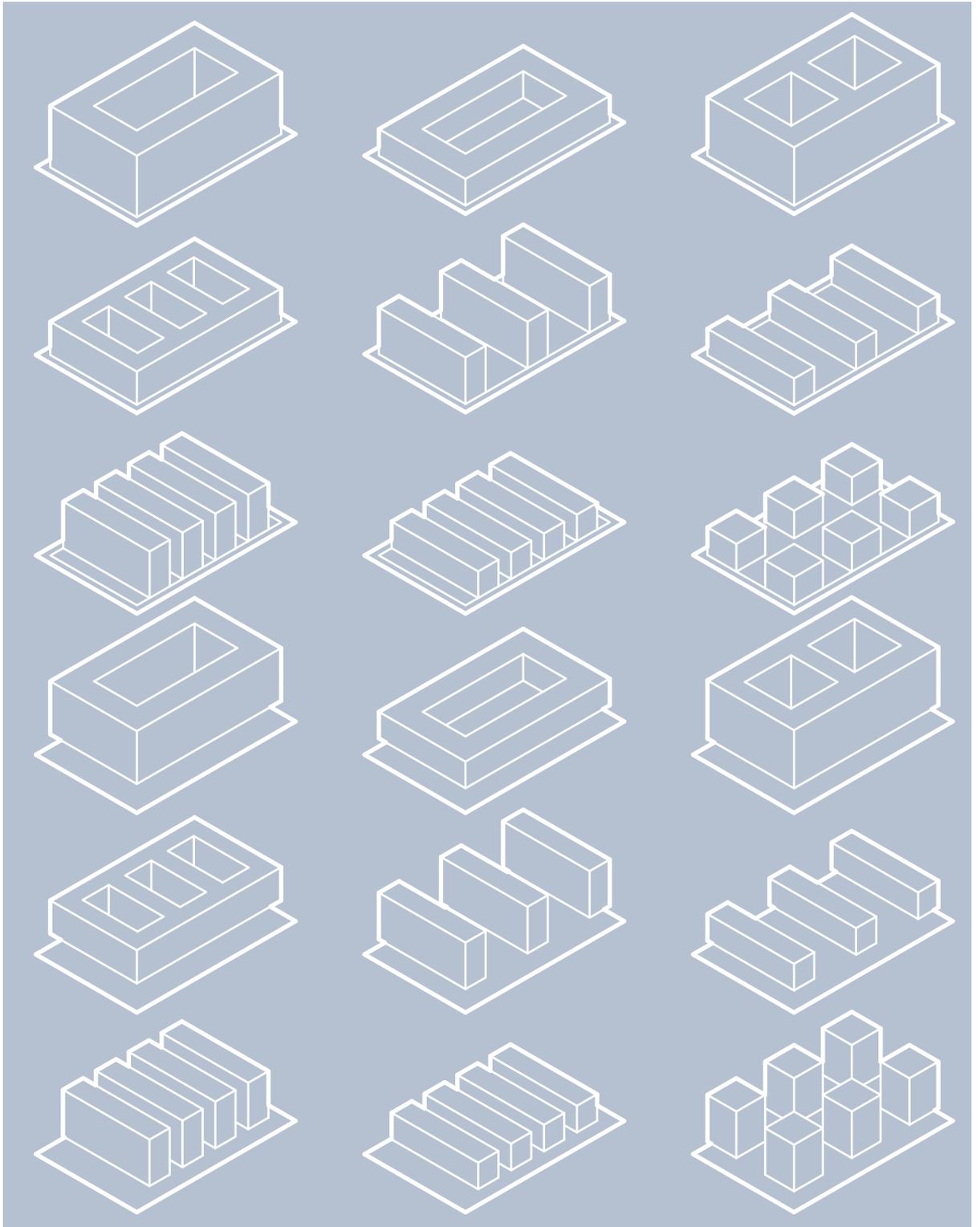


MORFOLOGIA URBANA E RUMORE

STUDIO DEGLI EFFETTI DI DIVERSE TIPOLOGIE
URBANE E TRATTAMENTI ACUSTICI DI FACCIATA
SULL'INQUINAMENTO ACUSTICO DI UN
ISOLATO DI TORINO





MORFOLOGIA URBANA E RUMORE

STUDIO DEGLI EFFETTI DI DIVERSE TIPOLOGIE URBANE E
TRATTAMENTI ACUSTICI DI FACCIATA SULL'INQUINAMENTO
ACUSTICO DI UN ISOLATO DI TORINO

Politecnico di Torino
Corso di Laurea in
Architettura per il Progetto Sostenibile
A.a. 2020/2021
Sessione di Laurea Luglio 2021

Candidato:
Francesco Primus

Relatori:
Prof.ssa Louena Shtrepi
Prof.ssa Arianna Astolfi

INDICE

01	Comfort acustico e soundscape in ambiente urbano	p. 8
	1_1 Comfort acustico, soundscape e quiet areas	p. 11
	1_2 Quiet facades e quiet areas: protezione delle abitazioni	p. 14
	1_3 Il caso di Amsterdam, politiche e casi studio	p. 15
	1_3_1 Science Park, Amsterdam	p. 16
	1_3_2 Laan van Spartaan, Amsterdam	p. 17
	1_3_3 Leeuw van Vlaanderen, Amsterdam	p. 18
	1_4 Comfort acustico e salute	p. 19
	1_5 Linee guida della World Health Organization	p. 20
02	Fenomeni acustici e trattamento delle superfici	p. 22
	2_1 Propagazione e riflessione delle onde sonore	p. 25
	2_2 Materiali e dispositivi acustici	p. 29
	2_2_1 Materiali e dispositivi fonoassorbenti	p. 29
	2_2_2 Materiali e dispositivi fonodiffondenti	p. 31
	2_3 Utilizzo di trattamenti acustici in facciata	p. 32
	2_4 Materiali e dispositivi acustici per ambienti esterni	p. 34
03	Fenomeni acustici e soundscape in ambiente urbano	p. 36
	3_1 Soundscape urbano e inquinamento acustico	p. 39
	3_2 Inquinamento acustico da traffico	p. 40
	3_3 Canyon urbani	p. 41
	3_4 Strategie di intervento architettoniche	p. 46
	3_5 Overview letteratura	p. 47
	3_5_1 Design e trattamenti di facciata	p. 56
	3_5_2 Balconi	p. 59
	3_5_3 Coperture	p. 61
	3_5_4 Coperture e facciate verdi	p. 62
	3_5_5 Barriere acustiche	p. 67

04	Termica e isola di calore urbana	p. 68	07	Analisi risultati e discussione	p. 146
	4_1 Termica degli ambienti urbani	p. 71		7_1 Confronto mappature in scala di colore	p. 149
	4_2 Caratterizzazione dell'ambiente termico urbano	p. 72		7_2 Confronto fra tipologie di isolati	p. 160
	4_2_1 Parametri descrittivi dell'ambiente termico urbano	p. 73		7_3 Confronto fra combinazioni di coefficienti	p. 170
	4_2_2 Parametri di comfort termico	p. 74		7_4 Analisi statistica	p. 184
	4_3 Strategie di mitigazione per Urban Heat Island	p. 76		7_4_1 Analisi univariata dei ricevitori esterni	p. 186
	4_3_1 Geometria urbana	p. 76		7_4_2 Analisi univariata dei ricevitori interni	p. 192
	4_3_2 Vegetazione urbana	p. 82		7_5 Conclusioni analisi statistica	p. 197
	4_3_3 Materiali riflettenti	p. 86			
	4_3_4 Corpi d'acqua	p. 88	08	Conclusioni	p. 198
	4_4 Gerarchia ed efficacia degli ambiti di intervento	p. 92			
05	Software di simulazione acustica	p. 94	09	Bibliografia	p. 206
	5_1 Programmi di simulazione acustica	p. 97			
	5_2 Simulazioni con metodi geometrici	p. 98			
	5_2_1 Image source	p. 99			
	5_2_2 Ray tracing	p. 101			
	5_2_3 Beam tracing e Radiosity	p. 105			
	5_2_4 Metodi ibridi	p. 107			
	5_3 Precisione e problematiche dei metodi geometrici in ambiente urbano	p. 108			
	5_4 Auralizzazioni	p. 109			
	5_5 Software attualmente disponibili	p. 112			
06	Caso studio e metodi	p. 116			
	6_1 Obiettivi	p. 119			
	6_2 Panoramica del caso studio	p. 120			
	6_3 Tipologie morfologia isolato	p. 122			
	6_4 Metodi	p. 123			
	6_4_1 Impostazione workflow	p. 123			
	6_4_2 Combinazione dei parametri delle simulazioni	p. 124			
	6_4_3 Modello tridimensionale	p. 126			
	6_4_4 Modello acustico	p. 130			
	6_4_5 Esportazione e gestione dati	p. 140			

Comfort acustico e soundscape | 01
in ambiente urbano |

1.1 Comfort acustico, soundscape e quiet areas

Secondo il rapporto delle Nazioni unite del 2018 sulle statistiche e le previsioni di urbanizzazione mondiale, la popolazione urbana mondiale crescerà fino a raggiungere i 6.7 miliardi di persone entro il 2050, ovvero il 68% della popolazione mondiale. Questo aumento rende ancora più urgente un'elevata attenzione alla progettazione attenta degli spazi urbani per garantire tutti quegli elementi di comfort e di benessere per la persone che li vivono. [1]

Sempre di più tra gli obiettivi di progettazione urbana si pone attenzione sul soundscape, ovvero il paesaggio sonoro che caratterizza un determinato ambiente. Negli standard iso viene specificamente definito come: "ambiente acustico così come viene percepito, vissuto e o compreso da una o più persone nel contesto specifico" [2].

Nel contesto europeo sono ormai presenti diverse direttive governative per incentivare e provare a definire gli ambiti di progettazione acustica urbana. Tra questi spicca la necessità e l'importanza della protezione e dello sviluppo di zone tranquille (quiet areas) all'interno degli ambienti urbani ("European Directive relating to the assessment and management of environmental noise" European Directive 2002/49/EC). Queste sono zone pensate come luoghi pubblici in cui le persone possano trovare condizioni acustiche confortevoli per "fuggire" dal paesaggio sonoro mediamente più aggressivo che caratterizza molti ambienti cittadini. Per questo viene definito un livello limite di esposizione sonora accettabile, non superiore a 55dB LAeq o anche più basso per zone extra urbane [2]. LAeq è il livello di pressione sonora continua equivalente, ovvero un indicazione della pressione sonora pesata determinata per un certo periodo di tempo, serve a valutare l'esposizione a lungo termine al rumore.

Gli indicatori di rumore non sono tuttavia l'unico focus nella progettazione del soundscape per le quiet areas urbane, sono infatti molto importanti anche la qualità acustica dello spazio, la tipologia di suoni e rumori predominanti e la differenza acustica relativa rispetto ai luoghi circostanti. Ad esempio suoni e rumori associati alla natura, come quello dell'acqua che scorre, il canto degli uccelli o comunque suoni di natura positiva creano, un ambiente più piacevole e rilassante.

Per quanto riguarda il confronto con altri spazi urbani circostanti è importante che gli utenti possano percepire in maniera evidente la differenza rispetto ad agli ambienti tranquilli, in questo modo gli utenti hanno una maggiore percezione di miglioramento della qualità dello spazio in cui si trovano [3].

Come dimostrato da Payne et al. 2019 [4] tramite una serie di sondaggi e misurazioni in tre zone tranquille in tre diverse città inglesi. Le interviste dimostrano

come la maggior parte delle persone che frequentano questi spazi si trovino a loro agio e provino un senso di rilassatezza, calma e riposo.

La ricerca fa inoltre notare come molti degli intervistati rispondano a domande sul luogo con descrizioni e riferimenti al proprio stato d'animo, indicazione secondo gli autori dell'efficacia di questi luoghi sullo stato d'animo delle persone. Viene inoltre confermato che gli effetti benefici siano molto più dovuti alla percezione e alla qualità dell'ambiente che al livello sonoro, infatti le misurazioni effettuate in due dei tre luoghi considerati eccedono la soglia di 55dBA. Nonostante ciò sono descritti positivamente dalle persone che li frequentano, confermando quanto sia importante la tipologia di suoni e rumori presenti (positivi in entrambi i casi) e il confronto rispetto agli altri ambienti urbani. Questo vale anche da un punto di vista dei livelli in quanto, anche se superiore ai limiti stabiliti, i livelli acustici di una quiet zone inferiori rispetto a quelli di altri spazi della città, consentono comunque alle persone di usufruire di uno spazio "migliore" rispetto alla media e di trarne quindi beneficio.

Un altro fattore importante nella percezione positiva di un ambiente è il numero suoni e rumori percepiti contemporaneamente. Emerge infatti come vengano ritenute fastidiose le situazioni in cui si sovrappongono molti suoni di tipo diverso, con un effetto cacofonico negativo, anche quando i singoli rumori in sé sarebbero considerati positivi [3].

Questo perché in ambienti complessi come quelli urbani è difficile per l'udito percepire e distinguere correttamente i diversi suoni, portando l'ascoltatore a percepire l'ambiente come "troppo complesso" o stressante. Questo può portare ad un affaticamento mentale e ad un calo dell'attenzione che sono ovvia-



Immagine 1.1

Sheaf Square, Sheffield.

Viene ricavata una piazza con un soundscape positivo usando schemi e fontane per mitigare e mascherare il traffico di una strada adiacente [6].

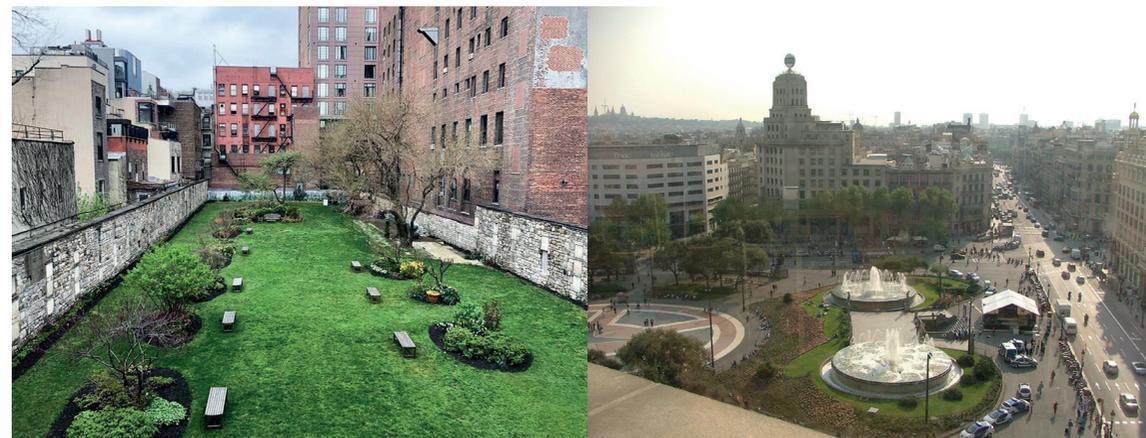


Immagine 1.2

Marble Cemetery, New York.

Un esempio di quiet space inserito in ambiente urbano ad alta densità [7].

mente controproducenti per l'obiettivo di creare luoghi piacevoli che facilitino il riposo e il relax delle persone che li frequentano.

Allo stesso tempo la percezione di troppi suoni contemporaneamente potrebbe anche essere percepita come un unico flusso di rumori indistinti fra loro, portando alla percezione dell'ambiente come noioso o fastidioso [5].

In definitiva si conferma la necessità di progettare l'acustica urbana tenendo a mente un approccio legato al paesaggio sonoro e agli aspetti percettivi e non esclusivamente limitato al rispetto dei livelli sonori che sono ovviamente necessari ma non sufficienti alla creazione delle migliori condizioni possibili per un ambiente.

Allo stesso tempo però è evidente dallo studio di Payne et al. come i luoghi valutati più positivamente nelle interviste siano anche quelli con i livelli sonori più bassi e si può quindi considerare che, anche se non forniscono un'indicazione assoluta sulla qualità acustica percepita di un luogo, possono invece essere utilizzati come indicatori della tranquillità.

I punti chiave da considerare sono quindi il raggiungimento delle condizioni sonore adeguate al tipo di attività a cui è destinato uno spazio, la caratterizzazione degli spazi tramite la loro identità sonora e la verifica delle soglie massime per la tutela della salute degli utenti [3,4,5].

Va sottolineato come l'utilizzo di quiet zones non sia una soluzione assoluta in quanto porterebbe benefici alla salute dei cittadini legati alla mitigazione dell'inquinamento acustico, in quanto tolgono spazio a zone più rumorose, e non sono quindi iniziative che agiscono all'origine del problema riducendo direttamente le sorgenti di rumore urbano. Si tratta comunque di un approccio che consente una mitigazione immediata del problema senza allo stesso tempo comportare svantaggi per uno scenario futuro in cui l'inquinamento acustico sia stato "eliminato all'origine", ad esempio come conseguenza di una riduzione del traffico urbano grazie all'impiego di modalità di mobilità alternativa e alla riduzione di motori a combustione interna in favore di mobilità elettrica [10].

Immagine 1.3

Plaza de Catalunya, Barcellona.

Definisce uno spazio pubblico animato ma relativamente lontano dal traffico, con un panorama sonoro vivace che caratterizza l'identità del luogo [8].

1.2 Quiet facades e quiet areas: protezione delle abitazioni

Parallelamente alle zone tranquille per gli spazi pubblici è altrettanto importante la disponibilità di spazi tranquilli per le abitazioni private. Diversi studi hanno evidenziato l'importanza di un lato silenzioso degli edifici, una facciata protetta che consenta di disporre strategicamente gli spazi delle abitazioni in funzione della loro necessità di silenzio.

La presenza di una facciata protetta consente infatti in fase di progettazione di posizionare le camere da letto e gli ambienti notturni/serali in un ambiente protetto, mitigando gli effetti dell'inquinamento acustico sulla salute, anche per quanto riguarda i problemi di ipertensione e ipotensione, particolarmente legati ai disturbi del sonno, soprattutto quando i livelli sonori negli altri ambienti della casa superano le soglie consigliate.

Riedel et al. [11] hanno condotto uno studio sugli effetti della presenza di una facciata protetta nelle abitazioni e della percezione di controllo sull'ambiente acustico sulla salute della popolazione più anziana, suggerendo una forte correlazione fra l'assenza di un ambiente acusticamente controllato in casa e reazioni di stress, fastidimento, e la sensazione di confinamento domestico. L'indagine evidenzia inoltre come soprattutto fra la popolazione più anziana questi problemi siano accentuati dalla maggiore incidenza di condizioni di salute preesistenti.

La definizione di quiet side è varia fra i diversi studi, generalmente viene utilizzata la differenza fra livello della facciata più esposta e della facciata più protetta come indicatore, che secondo le linee guida UE deve essere superiore almeno a 20 dB [9].

La Direttiva europea 2002/49/CE definisce i due descrittori, L_{den} e L_{night} utilizzati per verificare il rispetto delle limitazioni dei livelli acustici.

L_{den} si definisce come "livello continuo equivalente a lungo termine ponderato A" [12] è l'indicatore relativo ai livelli di rumore nell'arco delle 24 ore di una giornata ed è ricavato da una media pesata dei valori dei livelli diurni (L_{day}), dei livelli serali ($L_{evening}$) e dei livelli notturni (L_{night}). Questi ultimi (L_{night}) sono quelli a cui viene data maggiore importanza nella media pesata, seguiti dai livelli di rumore serale ($L_{evening}$).

I tre livelli ponderati indicano l'esposizione a lungo termine nelle diverse fasce orarie della giornata e vengono determinati sull'insieme dei valori della relativa fascia oraria misurati durante un intero anno solare e vengono utilizzati secondo le indicazioni della normativa europea per la realizzazione delle mappe del rumore. Le tre fasce orarie vengono definite come segue: il periodo diurno è compreso fra le 06:00 e le 20:00, il periodo serale fra le 20:00 e le 22:00, il periodo notturno è compreso fra le 22:00 e le 06:00 [12].

1.3 Il caso di Amsterdam, politiche e casi studio

Un esempio interessante nella gestione dell'acustica per la protezione delle abitazioni è quello Olandese di Amsterdam, che ha una politica molto severa in termini di inquinamento acustico. Secondo le norme urbanistiche è infatti proibita la realizzazione di nuovi edifici residenziali nelle zone in cui siano superati i limiti di rumore consentiti. Per poter fare un'eccezione a questa regola viene richiesto che gli edifici abbiano almeno una "facciata silenziosa" o che utilizzino un sistema *courtain wall* per le facciate. La definizione che viene data di facciata silenziosa è molto importante perché non si limita all'applicazione di limiti sui livelli di rumore, ma richiede un approccio di progettazione olistico al comfort ambientale, non esclusivamente di tipo acustico.

Viene infatti definita come "quiet facade" una facciata che: non presenti livelli più alti delle altre facciate dell'edificio, abbia un livello L_{den} diurno inferiore a 55 dB e un livello L_{night} notturno inferiore a 45 dB e che affacci su un ambiente di "sufficiente qualità" come ad esempio un giardino e non uno spazio di bassa qualità estetica come un parcheggio.

La "facciata tranquilla" viene quindi caratterizzata e normata non solo in funzione del rispetto degli indicatori ma in funzione anche della qualità estetica degli spazi su cui è affacciata, considerando quindi fondamentale all'efficacia dello spazio tutti gli aspetti di comfort, da quelli acustici a quelli visivi.

Questa normativa viene applicata ad edifici di nuova costruzione ma anche ad edifici già esistenti o inseriti in contesti preesistenti che impediscono la realizzazione di una facciata libera. In questo caso si adottano strategie per creare uno spazio isolato che possa fungere da quiet place su cui affacciano le facciate silenziose dell'edificio, ad esempio chiudendo gli spazi tra gli edifici e di conseguenza isolando il cortile interno dalla strada o addirittura dotando i cortili interni di coperture vetrate.

Questo tipo di limitazioni forza gli stakeholders e i progettisti ad affrontare il problema e fa sì che nella città si trovino numerosi esempi di progetti fortemente influenzati dalle necessità acustiche del contesto specifico, facendo diventare i diversi sistemi di mitigazione parte integrante dell'architettura e elemento caratterizzante degli edifici.

Va sottolineato come queste politiche comportino oltretutto un aumento del valore degli immobili e dei terreni interessati. Si stima un aumento del valore in relazione alla riduzione dei livelli di 0,5% per ogni decibel di riduzione (0,5%/dB) [14].

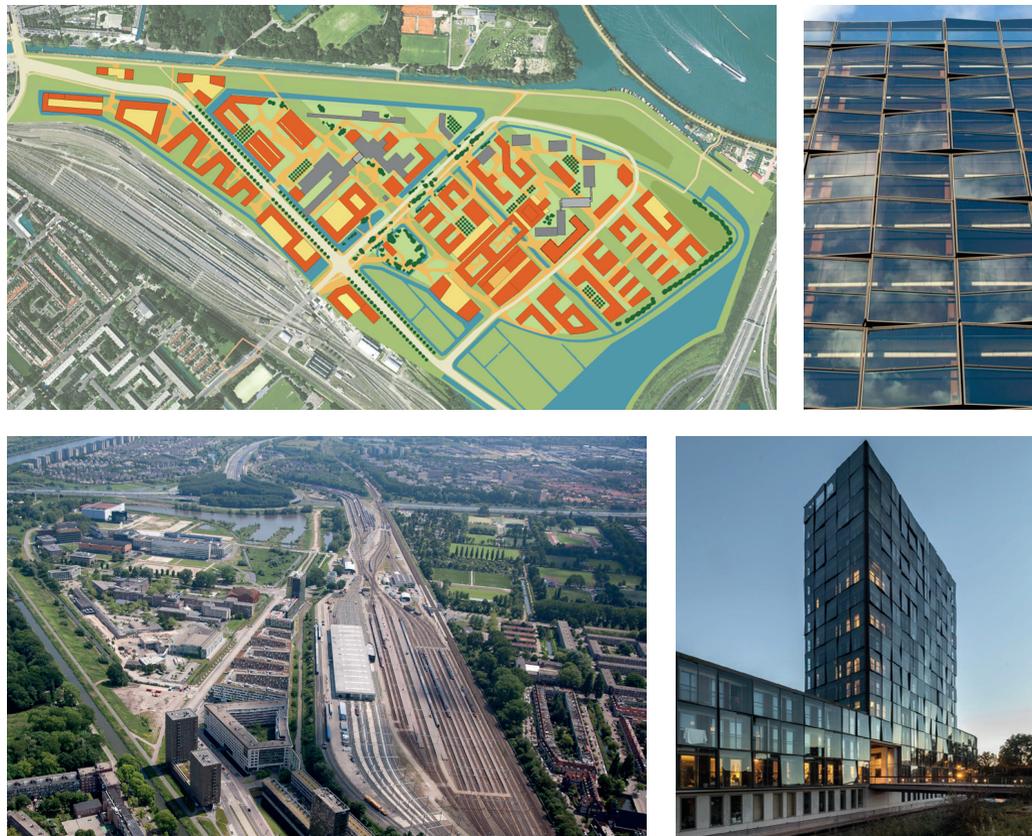
Di seguito un'analisi di alcuni esempi [13,14].

1.3.1 Science Park, Amsterdam

Il complesso costruito nel 2008, progettato da StudioNineDots e da KCAP è situato accanto a un grosso snodo ferroviario, richiedendo quindi un intensivo lavoro di schermatura. Il layout è delle funzioni è studiato in funzione della sorgente di rumore rappresentata dalla ferrovia e viene fatto uno di barriere acustiche di grandi dimensioni che si integrano con l'architettura degli edifici principali riprendendo il disegno di facciata. Per le facciate dell'edificio Eet Kasteel, progettato da StudioNineDots sono state utilizzate delle doppie facciate che utilizzano box-windows di forma poligonale, ognuna delle quali con inclinazioni diverse agendo da diffusore acustico e da schermatura per gli spazi interni e creano un disegno di facciata molto caratteristico e sfaccettato grazie alla luce riflessa in diverse direzioni dai pannelli di vetro [13, 15].

Immagine 1.4

Da sinistra a destra: masterplan del progetto e la stazione ferroviaria adiacente; dettaglio dei box-window di Eet Kasteel; foto aerea del complesso; l'edificio Eet Kasteel, si possono notare le facciate caratterizzate dalle irregolarità geometriche dei box-window [15].

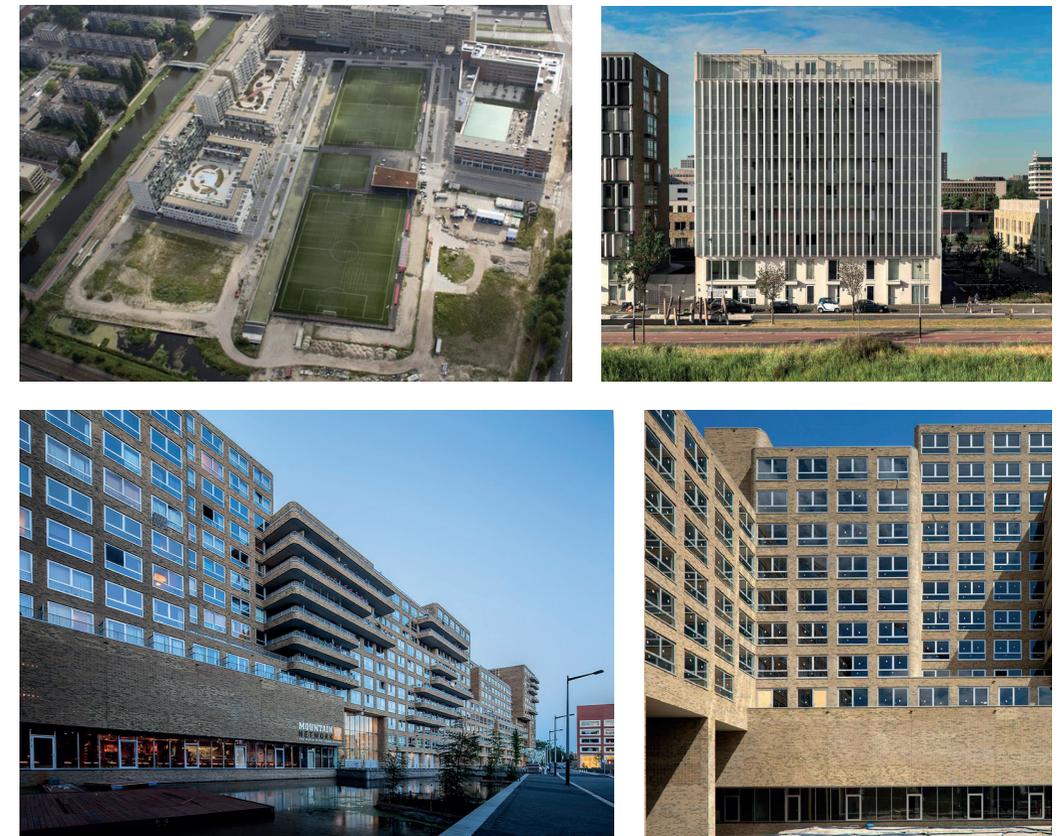


1.3.2 Laan van Spartaan, Amsterdam

Laan van Spartaan è una zona residenziale del quartiere ovest di Amsterdam sviluppata attorno a dei campi da calcio ed è delimitata da un'autostrada, una linea ferroviaria e una strada cittadina ad alto flusso di traffico. L'intero quartiere è oggetto di un progetto di riqualificazione e negli ultimi anni sono stati costruiti una serie di edifici ad alta densità, residenziali e multi funzione, che presentano una serie di interessanti strategie per la protezione e la mitigazione dal rumore per proteggere gli edifici e gli spazi pubblici interni al quartiere che vanno dalla disposizione delle diverse attività separando le zone residenziali dalle attività più rumorose e dall'utilizzo di edifici non sensibili per schermarne altri fino all'ampio utilizzo di schermi, baffle assorbenti e curtain wall per isolare le facciate. [13, 16]

Immagine 1.5

Da sinistra a destra: vista aerea del complesso ancora da terminare; uno degli edifici affacciati sull'autostrada, si possono notare i bris-soleil utilizzati come barriera assorbente; la facciata principale di De Tribune, l'edificio multifunzionale al centro del progetto; la porzione sopraelevata del De Tribune che scherma la facciata dalla strada sottostante [16].



1.3.3 Leeuw van Vlaanderen, Amsterdam

Si tratta di un edificio residenziale del 1960 posizionato ai bordi di un'autostrada, nel 2006 è stato completamente ristrutturato in funzione del miglioramento delle condizioni legate all'inquinamento acustico proveniente dall'autostrada. L'edificio stesso svolge la funzione di barriera anti rumore schermando le zone all'aperto riservate agli appartamenti e il complesso di condomini residenziali che si trovano dietro di esso.

La disposizione dell'edificio è caratterizzata da un quiet side sul lato opposto all'autostrada sul quale sono disposte tutte le unità abitative, mentre sul lato di fronte all'autostrada, schermato da una doppia facciata con un'intercapedine molto ampia che funge da insonorizzazione, sono posizionati gli spazi distributivi e di servizio.

[13, 17, 18]



Immagine 1.6

da sinistra a destra: dettaglio della doppia facciata che avvolge l'edificio e gli spazi distributivi interni; la doppia facciata principale rivolta verso l'autostrada e le barriere anti rumore ai lati dell'edificio; la facciata tranquilla sul retro dell'edificio su cui sono disposti gli appartamenti [17; 18].

1.4 Comfort acustico e salute

L'effetto della disponibilità di facciate silenziose e luoghi tranquilli è di particolare importanza se si considera l'impatto dell'inquinamento acustico sulla salute, in particolare in relazione alle proporzioni gigantesche che assume in termini di persone colpite.

Secondo l'Organizzazione Mondiale per la sanità infatti, solo all'interno dell'Unione Europea, 100 milioni di persone sono esposte ad inquinamento acustico legato al traffico.

L'esposizione ad inquinamento acustico può indurre disturbi e patologie di tipo uditivo ma è anche considerato un elemento di stress che ha effetti negativi sulla salute umana in molti altri aspetti, specialmente in seguito ad esposizioni prolungate a lungo termine, tipiche di chi vive in città. Tra gli effetti troviamo patologie cardiovascolari, disturbi del sonno, acufene, infastidimento e disturbi cognitivi fra i bambini.

Nel 2011 il WHO Regional Office for Europe e il European Commission (EC) Joint Research Centre (JRC) ha pubblicato un report sull'analisi degli effetti dell'inquinamento acustico sulla qualità della salute nei paesi europei [19]. L'impatto viene quantificato tramite l'indicatore DALYs, che somma gli anni di vita persi per mortalità prematura, rispetto alle aspettative di vita, e gli anni vissuti con disabilità per le persone che convivono con malattie o condizioni di salute indotte.

Secondo il report, solo in Europa Occidentale, si possono contare fino a 61.000 anni equivalenti persi per patologie cardiovascolari (IHD), 45.000 anni equivalenti per disturbi cognitivi infantili, 903.000 anni per patologie del sonno, 22.000 per acufene e malattie dell'udito.

Secondo questi dati almeno un milione di anni di vita in salute vengono persi ogni anno in seguito ad inquinamento acustico causato dal traffico in Europa, di cui la frazione più grande è legata ai disturbi del sonno e infastidimento.

Secondo queste valutazioni l'impatto dell'inquinamento acustico è secondo solo a quello legato all'inquinamento dell'aria.

I sondaggi europei sulla qualità della vita del 2016-2017 [20] riportano che, su quasi 37000 partecipanti, da cinque diversi paesi europei, un terzo (32%) lamenta qualche problematica relativa al rumore nelle vicinanze della propria abitazione (principalmente a livello di quartiere). Questa percentuale varia dal 14% al 51% nei singoli paesi e rappresenta principalmente ambienti urbani e periferici. Un sondaggio del 2010, promosso dalla Commissione Europea, effettuato invece su 27 paesi europei (già membri) e cinque paesi candidati ad entrare nell'Unione Europea, ha riportato che l'80% dei partecipanti ritiene che la propria salute risenta, più o meno gravemente, dell'inquinamento acustico [2].

1.5 Linee guida WHO

Nel 2013 l'Ufficio Regionale per l'Europa dell'Organizzazione Mondiale per la Sanità ha avviato, tramite il Centro Europeo per l'Ambiente e la Salute, lo sviluppo delle linee guida per il rumore ambientale, con lo scopo di definire limiti, soglie e indicazioni per gli organi legislativi europei.

Le linee guida sono specificamente sviluppate in base alla tipologia di sorgente sonora, non in base ai luoghi, che tuttavia vengono presi in considerazione, in quasi tutte le situazioni in cui le persone trascorrono periodi prolungati di tempo, come abitazioni, scuole, uffici e luoghi pubblici. Vengono esclusi gli ambienti ospedalieri, a causa della particolare eterogeneità degli utenti, e le sorgenti legate ad attività industriali e lavorative, vista l'elevata specificità delle diverse situazioni. Inoltre si tratta da un punto di vista legislativo di situazioni in cui l'esposizione degli operatori al rumore viene regolata dalle leggi sulla sicurezza sul lavoro [2].

L'altra categoria per cui non vengono fornite indicazioni specifiche è proprio quella del rumore a scala di quartiere (neighborhood noise), e di conseguenza non vengono fornite indicazioni circa la protezione della salute dall'esposizione a esso. Questo perché in numero di potenziali sorgenti sovrapposte è molto alto e le diverse condizioni locali e sorgenti variano tantissimo da caso a caso. Per questi motivi sarebbero necessari molti più dati e misurazioni dei livelli interni alle abitazioni di quelli disponibili per poter stilare delle linee guida efficaci. Non vengono inoltre fornite indicazioni circa l'esposizione alla sovrapposizione di diverse sorgenti sonore.

Le soglie massime di esposizione fornite dalle linee guida sono basate su una serie di indicatori acustici, i più utilizzati nello specifico sono L_{den} e L_{night} , ovvero i due indicatori più utilizzati in Europa per la definizione delle soglie di legge. L_{den} è la media pesata del livello di pressione sonora misurato nel corso di 24 ore, a cui vengono aggiunti 10dB negli orari notturni (23-7) e 5 dB nelle ore serali (19-23). Le quantità aggiunte servono a tenere in considerazione la sensibilità più elevata delle persone in quelle fasce orarie.

L_{night} fa invece riferimento al solo periodo notturno e corrisponde alla media pesata del livello di pressione sonora misurato durante le otto ore notturne, ovvero dalle 23.00 di sera alle 7.00 del mattino.

Nella quasi totalità dei casi le misurazioni e le simulazioni vengono effettuate all'esterno delle facciate più esposte degli edifici, per questo motivo le linee guida non danno indicazioni circa i livelli indoor.

In alcuni casi gli indicatori dei valori medi vengono affiancati da indicatori come LA_{max} specialmente per quelle sorgenti per cui può essere utile valutare il li-

vello istantaneo di rumore, come d'esempio per i casi nelle vicinanze di ferrovie e aeroporti, ovvero sorgenti di rumori molto forti ma saltuari, che si verificano per un periodo limitato di tempo. In ogni caso resta però prioritaria la valutazione delle esposizioni a lungo termine in quanto ritenute quelle responsabili dei maggiori rischi per la salute.

Le linee guida forniscono una serie di indicazioni e soglie riguardanti le diverse perle seguenti tipologie di sorgente: traffico stradale, ferrovie, aeroporti e aerei, turbine eoliche, rumore legato alle attività ricreative (leisure noise, definito come l'insieme di rumori a cui si può essere esposti durante attività ricreative o durante le ore non-lavorative).

Le raccomandazioni vengono divise in due categorie: forti e condizionali. Una raccomandazione forte viene definita come "una raccomandazione che può essere adottata come legge nella maggior parte delle situazioni. La linea guida è basata sulla convinzione che gli effetti benefici desiderati superino le conseguenze non desiderate".

Una raccomandazione condizionale viene definita come "una raccomandazione che richiede un processo legislativo con un sostanziale dibattito ed il coinvolgimento delle diverse parti interessate. C'è una certezza più bassa circa la sua efficacia a causa di una minore qualità delle evidenze scientifiche a sostegno di un beneficio effettivo, Valori e preferenze opposte degli individui e delle popolazioni influenzati o le alte risorse implicate nell'applicazione della raccomandazione, di conseguenza ci potrebbero essere circostanze in cui la raccomandazione non verrà applicata" [2].

Per quanto riguarda l'inquinamento acustico da traffico le linee guida dell'organizzazione mondiale della salute fanno una forte raccomandazione di mantenere l'esposizione media al rumore inferiore a 53dB L_{den} , in quanto valori superiori sono associati con effetti negativi sulla salute, e al di sotto di 45dB L_{night} per evitare ripercussioni negative sul sonno. Viene inoltre raccomandato ai legislatori di ridurre l'esposizione della popolazione urbana tramite interventi mirati sia alla fonte, ovvero il traffico, sia sul "percorso di propagazione del rumore" agendo quindi con strategie di modifica dell'ambiente costruito.

La struttura stessa delle linee guida e il tipo di indicazioni che forniscono sono un'evidente rappresentazione della necessità di maggior ricerca su questi temi per poter arrivare a linee guida di progettazione più specifiche, che siano in grado di fornire indicazioni pratiche ai progettisti, andando al di là di semplici indici e soglie generalizzate, che non sono in grado di inquadrare nello specifico la complessità dei contesti urbani e di fornire indicazioni sulla buona riuscita di un progetto dal punto di vista del soundscape.

Fenomeni acustici e | 02
trattamento delle superfici |

2.1 Propagazione e riflessione delle onde sonore

I suoni e i rumori che siamo in grado di udire sono nella maggior parte dei casi la combinazione di una componente diretta emessa da una sorgente, le cui onde sonore viaggiano direttamente dal punto sorgente fino all'ascoltatore, e da una componente riflessa, composta dalle onde sonore che viaggiando nello spazio impattano contro qualunque superficie e vengono riflesse fino a raggiungere l'ascoltatore.

Per questo motivo, le caratteristiche acustiche di un ambiente sono determinate da come i suoni e i rumori si propagano nello spazio e da come vengono riflessi dalle superfici presenti nello spazio. Uno degli scopi principali dell'acustica da camera è di controllare le caratteristiche acustiche di un ambiente andando ad intervenire sulle superfici al suo interno. Per comprendere in che modo questo accade è necessario comprendere come avvengono le interazioni fra onde sonore e superfici.

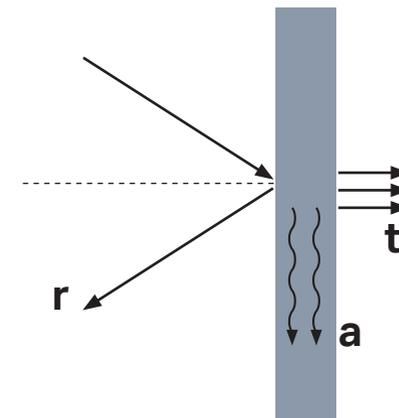


Immagine 2.1 Immagine N: i tre fenomeni di riflessione, assorbimento e trasmissione [22].

Come ogni altra forma di energia, quando un'onda sonora impatta contro una superficie avvengono tre fenomeni distinti: una parte dell'energia viene riflessa dalla superficie, una parte viene trasmessa attraverso la superficie e infine una parte viene assorbita. Ognuno di questi fenomeni è determinato dalle caratteristiche e dalla geometria del materiale superficiale e viene descritto attraverso dei coefficienti. Il coefficiente di assorbimento, o coefficiente alfa, indica la porzione di energia che viene assorbita dalla superficie (alfa), i coefficienti sono compresi da 0 a 1 e indicano la rispettiva percentuale di energia, per cui un valore pari a 1 corrisponderebbe al 100% dell'energia. Il

coefficiente di trasmissione (t) indica invece la porzione di energia sonora che viene trasmessa attraverso la superficie. Infine il coefficiente di riflessione (r) indica la componente di energia che viene riflessa dalla superficie al momento dell'impatto; questa può essere riflessa dalle superfici in diversi modi in base alle caratteristiche della superficie interessata. Le onde sonore possono infatti essere riflesse specularmente (riflessione speculare) dalla superficie simmetricamente alla direzione normale della superficie al punto di impatto, generalmente nel caso di superfici grandi e lisce, la cui dimensione supera quella della lunghezza d'onda del suono riflesso. In alternativa il suono può essere diffuso dalla superficie, ovvero "una sua porzione significativa viene dispersa nello spa-

zio e nel tempo” [22] e in questo caso la superficie viene definita come fono-difondente o diffusiva.

La capacità di una superficie di riflettere le onde sonore in modo diffuso viene indicata attraverso il coefficiente di scattering (s) che indica la porzione di suono che viene riflesso in modo diffuso dalla superficie e non in modo speculare. Questo non va confuso con il coefficiente di diffusione (d) che fornisce invece un’indicazione sull’uniformità del suono riflesso da una superficie e viene generalmente usato nella progettazione acustica di elementi diffusori [22; 23;24].

Il tre fenomeni relativi all’interazione fra onde sonore e una superficie dipendono da molte caratteristiche del materiale di cui è composta la superficie, come densità, porosità e texture superficiale del materiale. Ad esempio materiali compatti e lisci hanno la tendenza a riflettere maggiormente in modo speculare le onde sonore, mentre superfici irregolari tendono a diffonderle. Densità e porosità tendono invece ad influenzare maggiormente le caratteristiche di assorbimento di un materiale.

Le riflessioni dell’energia sonora dipendono inoltre dalle caratteristiche geometriche della superficie, ad esempio dalle sue forme, dalla presenza di irregolarità o sporgenze e dalla loro dimensione in rapporto alla lunghezza d’onda del suono interessato. Infatti la lunghezza d’onda sonora determina pesantemente il suo comportamento e viene utilizzata per prevedere gli effetti dell’interazione con una superficie in funzione delle sue dimensioni relativamente al valore della lunghezza d’onda.

Ad esempio, una superficie le cui dimensioni sono molto più grandi della lun-

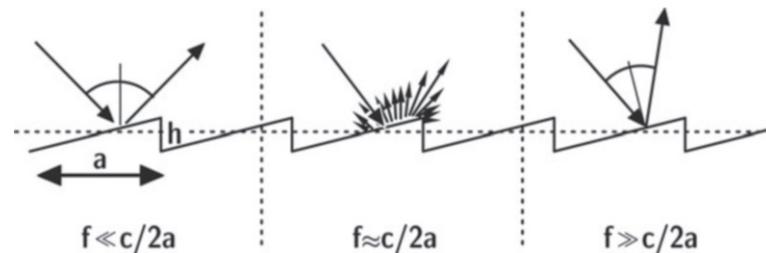


Immagine 2.2 rapporto fra la lunghezza d’onda e dimensione delle irregolarità superficiali, fonte Vorlander 2020 [26].

ghezza d’onda tenderà a riflettere le onde in maniera speculare, nel caso invece di una superficie o un oggetto molto più piccolo rispetto alla lunghezza d’onda, le onde sonore continueranno il loro tragitto scorrendo attorno alla superficie senza particolari interferenze.

In modo simile il fenomeno di diffrazione ai bordi, molto rilevante nel caso di ambienti urbani, è determinato dal rapporto fra le dimensioni della lunghezza d’onda e degli oggetti con cui interagisce. Si tratta del fenomeno che si verifica

quanto un’onda incontra un ostacolo che si trova lungo il percorso di propagazione. Qui l’onda viene diffratta, trasformando ogni spigolo dell’ostacolo in una sorgente di altre onde sferiche, consentendo alle onde sonore di propagarsi attorno un ostacolo. [22; 25]

Questo fenomeno è apprezzabile quando le dimensioni dell’oggetto che viene

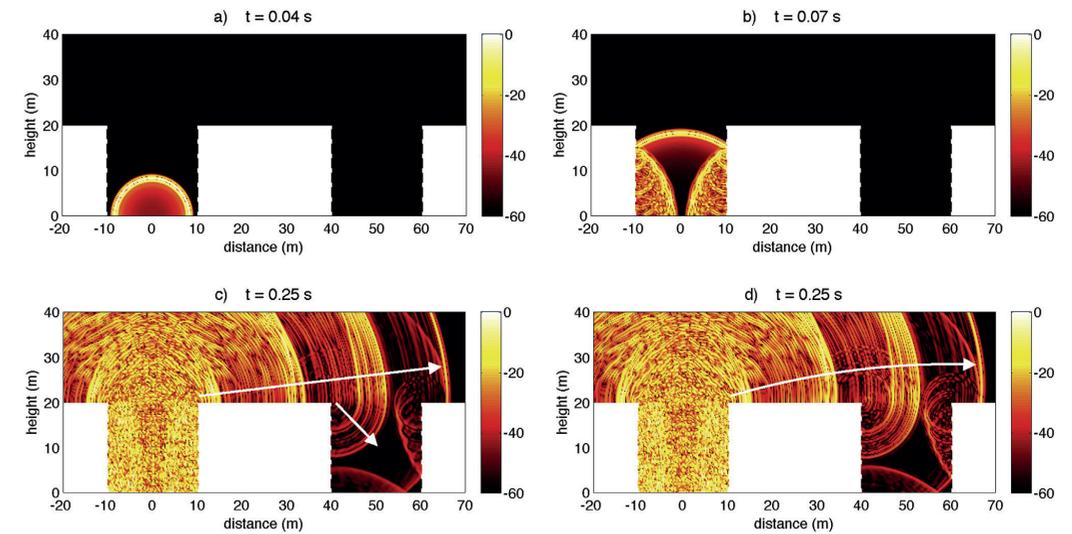


Immagine 2.3 visualizzazione della propagazione delle onde acustiche per diffrazione ai bordi in un ambiente urbano [80].

colpito dalle onde sono comparabili con la lunghezza d’onda.

Di conseguenza la geometria superficiale di diversi materiali avrà effetti diversi su onde sonore caratterizzate da diverse lunghezze d’onda e allo stesso la geometria di oggetti di diverse dimensioni avrà effetti diversi sulla propagazione del suono in funzione della lunghezza d’onda.

Visto il grande effetto delle proprietà dei materiali sulle onde sonore, i materiali vengono classificati in relazione all’acustica in funzione del fenomeno predominante (riflessione, assorbimento, diffusione) che li caratterizza.

Le caratteristiche e la qualità acustica di uno spazio sono determinate essenzialmente dal modo in cui le onde sonore vengono riflesse e si propagano al suo interno, di conseguenza dipendono dalla composizione globale delle superfici che delimitano l’ambiente o che si trovano al suo interno. Le onde sonore provenienti dalle riflessioni sulle superfici infatti aumentano i livelli sonori nell’ambiente rispetto a quelli esclusivamente legati alle onde sonore dirette. Nella quasi totalità dei casi in un ambiente si verifica una combinazione di riflessioni speculari, di riflessioni diffuse e di assorbimento. In base alle funzioni

di uno spazio e al tipo di ambiente acustico che si desidera ottenere è preferibile un diverso equilibrio fra questi tre fenomeni, tutti dipendenti da materiali, superfici e geometria dello spazio in questione.

Risulta quindi chiaro come il controllo e la progettazione dell'acustica di uno spazio sia basata sul controllo delle superfici, selezionando materiali e geometrie a seconda dei fenomeni acustici che si vogliono controllare.

Nell'ambito dell'acustica da camera il fenomeno principale che si cerca di controllare è quello della riverberazione, ovvero il decadimento delle onde sonore che continuano a essere riflesse all'interno di uno spazio dopo che la sorgente ha cessato di emetterle. Quando il tempo necessario a terminare le riflessioni è troppo lungo ci si trova in un caso di eccesso di riverberazione che può deteriorare notevolmente la qualità acustica dello spazio, riducendo la distinguibilità dei suoni, ad esempio delle conversazioni, rendendo l'ambiente spiacevole e faticoso da un punto di vista uditivo [22]. Si tratta di fenomeni tipici di locali caratterizzati da ampi spazi aperti che non presentano una quantità sufficiente di superfici assorbenti, come nel caso di palestre, piscine e chiese. Allo stesso modo un'ambiente caratterizzato da un livello di riverberazione troppo basso genera un ambiente acustico indesiderabile in molte situazioni, portando anche a situazioni di discomfort fisico in situazioni estreme.

Il riverbero è direttamente dipendente dalle dimensioni di uno spazio (e dalle relative proporzioni fra dimensioni) e dalla quantità di superfici assorbenti presenti al suo interno e di conseguenza la soluzione più diretta e semplice per il controllo di questo fenomeno è l'inserimento di superfici assorbenti

Le caratteristiche di riverbero di uno spazio vengono definite tramite il tempo di riverberazione RT o T60, ovvero la misura del tempo necessario perché l'energia sonora in un ambiente diminuisca di 60dB, rispetto al suo valore massimo raggiunto, a partire dal momento in cui la sorgente termina l'emissione del suono. Spesso si utilizzano varianti dell'indicatore che considerano un delta acustico inferiore come ad esempio T30 (riduzione di 30dB) per facilitarne la misurazione, specialmente nel caso in cui il T60 sia troppo elevato.

2.2 Materiali e dispositivi acustici

I materiali e i dispositivi acustici utilizzati per controllare l'acustica di uno spazio tramite le riflessioni dei suoni si dividono in due categorie in funzione del loro comportamento: fono-assorbenti e fono-diffondenti. Questi possono semplicemente sfruttare le proprietà del materiale e il loro effetto sull'acustica, oppure può trattarsi di dispositivi che sfruttano diversi fenomeni fisici per riflettere o assorbire le onde acustiche.

2.2.1 Materiali e dispositivi fonoassorbenti

I dispositivi fonoassorbenti si possono suddividere generalmente in due ampie categorie, materiali porosi e dispositivi risonanti.

I primi sono materiali che grazie alla loro natura porosa hanno un alto coefficiente di assorbimento. La struttura a pori aperti infatti dissipa l'energia delle onde sonore che si propagano all'interno della struttura dei pori interconnessi.

Questo avviene principalmente grazie agli effetti di strato limite viscoso che si verificano quando l'aria (ovvero il fluido viscoso in cui si propagano le onde sonore) si muove all'interno dei pori generando attrito sulle pareti e di conseguenza dissipando energia. La capacità assorbente dei materiali porosi è direttamente proporzionale al loro spessore, specialmente alle basse frequenze, e diventa inefficace al di sotto di un certo spessore. Inoltre perché questo meccanismo funzioni in modo ottimale il materiale poroso deve essere posizionato dove le particelle hanno una velocità elevata e quindi idealmente il più lontano possibile dalle superfici perimetrali rigide dello spazio dove le particelle hanno velocità nulla. Per questo motivo si possono aumentare le prestazioni di questi materiali inserendo un'intercapedine tra il materiale assorbente e le pareti, aumentando quindi la distanza dalla superficie perimetrale. [22]

I materiali porosi sono una soluzione molto diffusa per applicazioni architettoniche, soprattutto grazie alla buona efficacia e alla semplicità di utilizzo; uno degli esempi più diffusi è quello della lana di roccia, utilizzata per moltissime applicazioni.

La seconda grande categoria è quella dei dispositivi fonoassorbenti risonanti e comprende due tipologie di dispositivi: i risonatori di Helmholtz e i dispositivi a membrana. Entrambi i sistemi sfruttano il principio degli smorzatori a massa risonante, e di conseguenza consistono essenzialmente in una massa che vibra contro una molla, sfruttando l'inerzia della massa per smorzare dinamicamente l'energia delle onde sonore.

Nel caso dei risonatori di Helmholtz la massa vibrante è costituita dall'aria contenuta in un'intercapedine costituita su uno dei due lati da uno strato perfo-

rato che consente all'aria di passare. L'effetto ammortizzante è in genere fornito da uno strato di materiale assorbente poroso, che può essere costituito da uno strato di materiale interno all'intercapedine o può essere riprodotto dall'uso di pannelli microforati. Questi sono caratterizzati da fori abbastanza piccoli da riprodurre l'effetto della struttura porosa di materiali come la lana di roccia, sono particolarmente apprezzati in ambito architettonico in quanto garantiscono un'ampia flessibilità nella scelta del materiale superficiale utilizzato lasciando un'ampia flessibilità progettuale.

I dispositivi a membrana funzionano in modo simile con la differenza che la massa vibrante è costituita dal pannello o dalla membrana superficiale dell'intercapedine.

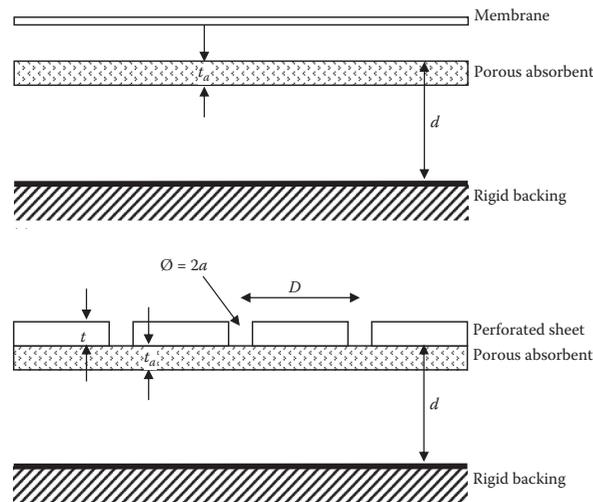


Immagine 2.4 sezione tipica di un risuonatore a membrana [22].

Immagine 2.5 sezione tipica di un risuonatore di Helmholtz [22].

A differenza dei materiali porosi questi sistemi hanno un range di frequenze di funzionamento limitato, compreso fra basse e medie frequenze. Tuttavia presentano un grande vantaggio rispetto ai materiali fonoassorbenti porosi quando si tratta di assorbire suoni alle basse frequenze. Infatti, sotto una certa frequenza lo spessore di materiale poroso necessario per essere efficace sarebbe eccessivo per applicazioni pratiche e presenterebbe comunque prestazioni inferiori rispetto a sistemi risonanti, che invece hanno un ingombro molto più contenuto. Inoltre l'efficacia dei sistemi risonanti aumenta quando sono posizionati contro le pareti superficiali rendendoli più pratici da utilizzare in alcune applicazioni, e la frequenza di risonanza può essere regolata intervenendo sulle diverse componenti del sistema [22;25].

2.2.2 Materiali e dispositivi fonodiffondenti

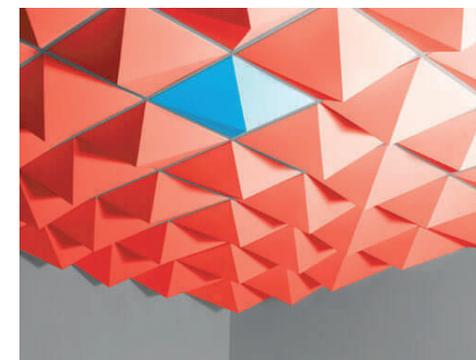
I trattamenti acustici di tipo diffondente vengono utilizzati per controllare determinati fenomeni acustici all'interno ambienti, come ad esempio eco e risonanze indesiderate, andando a rendere diffusiva una o più superfici per impedire che si verifichino multiple riflessioni speculari, generalmente fra superfici parallele, disperdendo l'energia riflessa nello spazio e nel tempo di risposta. A differenza dei trattamenti fonoassorbenti, i diffusori non rimuovono energia acustica dall'ambiente ma semplicemente la redistribuiscono riflettendola in maniera diffusa nello spazio.

Gli elementi fonodiffondenti possono essere anche normali elementi architettonici presenti all'interno di un ambiente che diffondono le onde sonore con una lunghezza d'onda comparabile alle loro dimensioni, oppure di superfici o dispositivi generalmente applicati alle superfici perimetrali dell'ambiente. Esistono molte tipologie di dispositivi diffondenti, tutte quante utilizzano diverse variazioni geometriche per creare una superficie irregolare o curva che riflette in modo diffuso una certa banda di frequenza, che può essere regolata durante la progettazione dei dispositivi.

Una delle tipologie più importanti è quella dei diffusori di Schroeder, si tratta di diffusori che usano una serie di lamelle per creare dei pannelli caratterizzati da recessi di profondità diverse, la cui geometria e la flessibilità costruttiva consentono una regolazione prevedibile delle loro prestazioni [25].



Immagine 2.6 da sopra a sotto, un diffusore di Schroeder, esempi di diffusori geometrici integrati nelle superfici degli ambienti trattati.



2.3 Utilizzo di trattamenti acustici in facciata

I principi adottati nella progettazione dell'acustica degli spazi interni possono essere trasposti per applicazioni esterne. Così come si adottano trattamenti specifici alle pareti di una stanza o di una sala da concerto per ottimizzare le condizioni acustiche ed intervenire su fenomeni specifici dello spazio, si possono adottare strategie progettuali per trattare le condizioni acustiche urbane tramite la progettazione di superfici, geometrie e materiali utilizzati per le facciate degli edifici urbani, con l'obiettivo di controllare la propagazione e le riflessioni delle onde sonore e modificare le condizioni dell'ambiente acustico cittadino. Questo tipo di approccio consentirebbe allo stesso tempo di ridurre l'esposizione degli utenti degli spazi interni agli edifici, che siano questi di tipo residenziale o commerciale, e di ridurre l'esposizione dei pedoni e dei fruitori degli spazi pubblici urbani.

Inoltre, come ci dimostrano gli esempi di molti ambienti performativi, quali teatri e sale concerti, la prestazione acustica di uno spazio impone limiti e necessità che possono essere un'ottimo elemento di guida per soluzioni formali architettoniche uniche e all'avanguardia.

Un esempio è il Pavilion 21 MINI Opera Space, padiglione progettato dallo studio di architettura austriaco Coop Himmelb(l)au per ospitare delle esibizioni temporanee in occasione di eventi della Bavarian State Opera. Realizzato per essere facilmente smontabile e rilocabile per spettacoli musicali itineranti, può contenere fino a 700 persone.



Immagine 2.7 Pavilion 21 MINI Opera Space [29].

Le scelte formali per il progetto sono state guidate principalmente dai vincoli di smontabilità e dalle performance acustiche. Riguardo queste ultime il padiglione ha un duplice scopo, ottimizzare l'ambiente acustico interno e il suo isolamento da rumori esterni e schermare gli spazi esterni adiacenti al padiglione dalla strada presente nel suo contesto originario (Immagine 2.8, Immagine 2.9).

Per soddisfare questi obiettivi la geometria esterna del padiglione presenta una serie di elementi triangolari, la cui geometria e orientamento sono progettati in modo che il rumore proveniente dalla strada non venga riflesso dalle facciate verso il basso, contro il suolo dove creerebbe fenomeni di risonanza, o verso la piazza dove esporrebbe maggiormente i pedoni. Le onde riflesse verso l'alto vengono invece disperse e non aumentano i livelli acustici dell'ambiente.

Il guscio esterno del padiglione è realizzato con pannelli metallici e vista la necessità di mantenere contenuti peso e ingombri sono stati utilizzati pannelli microforati come elementi assorbenti [29].

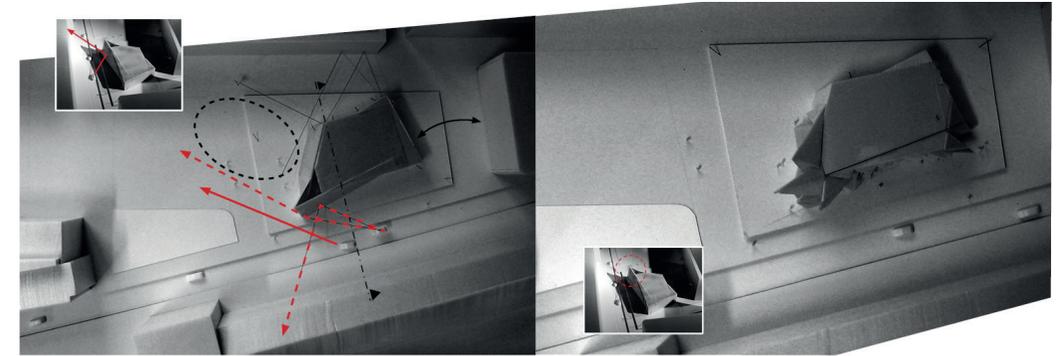


Immagine 2.8 modelli di studio e sezioni schematiche del rapporto delle facciate con la strada adiacente [29].

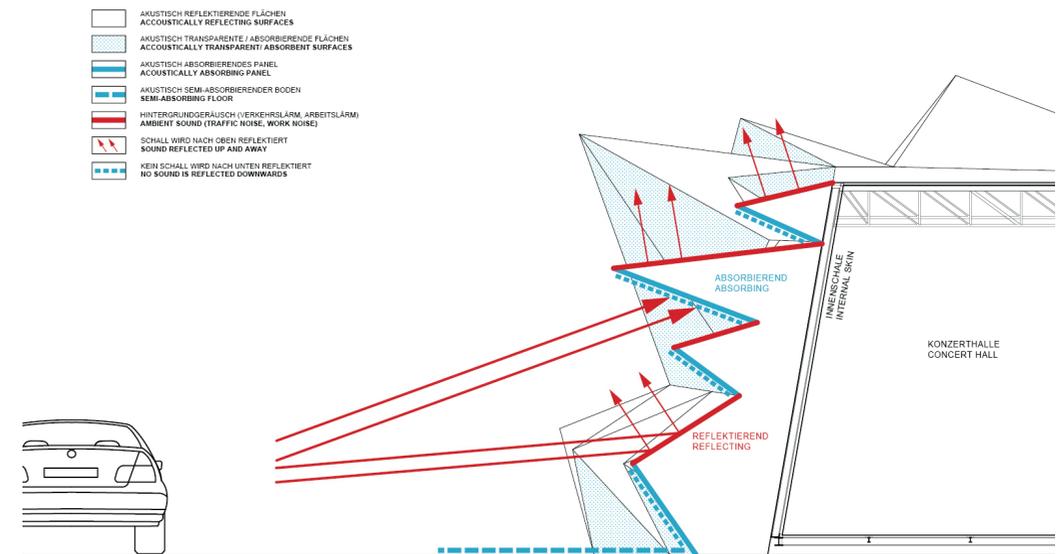


Immagine 2.9 sezione schematica del padiglione, le superfici di facciata riflettono il rumore proveniente dalla strada verso l'alto, le riflessioni verso il basso sono smorzate da pannelli di facciata fonoassorbenti e dalla pavimentazione semi assorbente [29].

2.4 Materiali e dispositivi acustici per ambienti esterni

Attualmente vi è una vasta gamma di materiali disponibili in commercio, con diverse destinazioni d'uso, che possono rispondere alle diverse esigenze dei progettisti e agli intenti formali di progetto per gli ambienti interni. Inoltre, visto il tipo di materiali utilizzati generalmente per soluzioni fonoassorbenti e fono-diffondenti, anche la realizzazione di sistemi su misura per progetti specifici è una possibilità facilmente accessibile e ampiamente utilizzata.

Per quanto riguarda gli ambienti esterni invece, è molto difficile poter scegliere sistemi di facciata commercialmente disponibili che abbiano caratteristiche fonoassorbenti [41]. Questo è legato da un lato alla poca domanda da parte dei progettisti per questo tipo di sistemi e materiali, in quanto l'attenzione alla progettazione acustica delle facciate è un ambito relativamente recente. Allo stesso tempo però, è molto difficile reperire o sviluppare materiali fonoassorbenti in grado di resistere ed adattarsi alle esigenze di un ambiente esterno. Infatti i materiali porosi tradizionalmente utilizzati per funzioni di fonoassorbimento non presentano caratteristiche di resistenza meccanica adeguata e sono inoltre esposti a degradazione se esposti alle intemperie e al sole. Infine la necessità di esporre direttamente la superficie porosa del materiale alle onde sonore rende virtualmente impossibile il loro utilizzo all'interno di stratigrafie di facciata che li possano proteggere.

Tra le soluzioni attualmente disponibili quelle che più si prestano ad un reale utilizzo, sono quelle che fanno ricorso all'uso di vegetazione, come pareti e coperture verdi, queste sfruttano infatti il substrato necessario alla crescita della vegetazione come materiale poroso fonoassorbente.

Anche se non si tratta di soluzioni disponibili in commercio, diversi studi hanno testato diverse opzioni per materiali e pacchetti di facciata con buone prestazioni di fonoassorbimento per l'uso in ambienti esterno [27; 28].

Una possibilità che garantirebbe una facile integrazione in molti dei sistemi di facciata attualmente utilizzati è quella riguardante l'uso di pannelli metallici perforati montati di fronte ad una cavità d'aria o riempita con materiale fonoassorbente, facendo funzionare il sistema come un elemento fonoassorbente risonante. Un esempio è quello studiato da Krimm et al. [27] che ha studiato l'uso di pannelli metallici forati in una configurazione molto simile a quella utilizzata per le facciate ventilate (Immagine 2.10).

Lo studio non ha mostrato una buona efficacia del sistema nelle configurazioni testate ma ha tuttavia riportato come il sistema possa essere potenzialmente

tarato per condizioni acustiche specifiche andando a modificare le dimensioni dei fori sui pannelli.

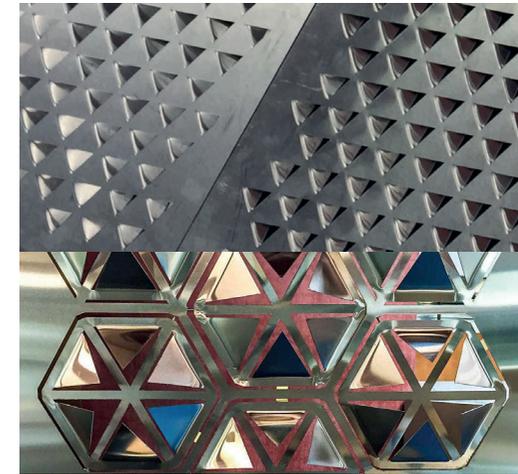


Immagine 2.10 (a sinistra) foto dei pannelli forati usati per i moduli fonoassorbenti testati da Krimm [27].
Sezioni verticali dei moduli montati in facciata (a destra).

Un'altra possibilità molto promettente è l'utilizzo di calcestruzzo poroso ottimizzato per migliorarne le caratteristiche di fonoassorbimento. Si tratta di una tipologia di materiale simile a quanto già utilizzato per la realizzazione di pavimentazioni permeabili, ampiamente diffuse per il controllo delle acque meteoriche in ambienti urbani. In un recente studio Shtrepi et al. [28] ha testato l'efficacia di diversi calcestruzzi porosi (Immagine 2.11) come materiale fonoassorbente, testando diverse variazioni di mix design, diverse configurazioni con pannelli a più strati e metodi di montaggio dei pannelli, per ottimizzarne il coefficiente di assorbimento, dimostrando come alcune tipologie di aggregati consentano di raggiungere prestazioni molto vicine a quelle di materiali porosi fonoassorbenti tradizionali. Infatti la selezione tramite la selezione degli aggregati è possibile ottenere diversi tipi di strutture porose nel materiale, ottenendo delle strutture capaci di dissipare una quantità maggiore di energia sonora con un conseguente maggiore coefficiente di assorbimento.

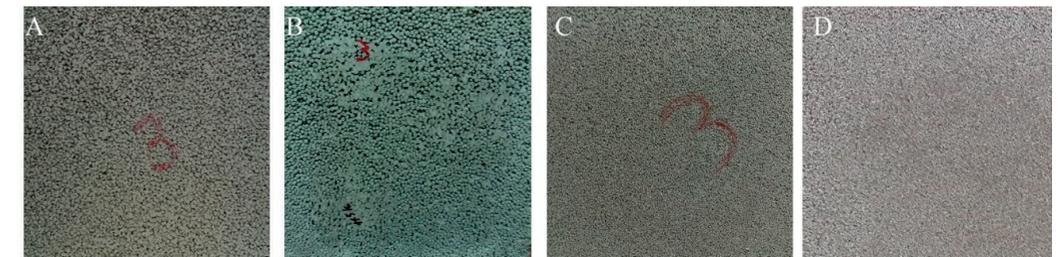


Immagine 2.11 le diverse superfici delle tipologie di calcestruzzo poroso [28].

**Fenomeni acustici e
soundscape in ambiente
urbano** | **03**

3.1 Soundscape urbano e inquinamento acustico

Come riportato da Cohelo [30] e da Sanchez et al. [31] è pratica comune, nella progettazione di interventi urbani, considerare gli aspetti di soundscape e di inquinamento acustico in modo subordinato agli altri fattori considerati nella progettazione. Su una scala gerarchica infatti aspetti di tipo economico, distributivo ed energetico sono, a parte casi particolari, gli elementi che guidano un progetto. Questo porta alla pratica comune di considerare gli aspetti di acustica e soundscape, sia degli ambienti esterni che interni, a posteriori con misure di tipo correttivo, come barriere acustiche, manti stradali assorbenti, infissi insonorizzati. Gli approcci di tipo architettonico come la distribuzione degli edifici, il design ed il trattamento delle facciate è molto raro nella pratica e non vengono integrati nelle fasi di progettazione iniziale.

Tuttavia la gestione degli aspetti acustici è ormai ampiamente riconosciuta come un aspetto fondamentale per la gestione di un ambiente e per questo le criticità legate a questo approccio tardivo diventano particolarmente evidenti quando si tratta di ambienti urbani, dove il numero e la complessità delle diverse attività vanno ad interferire con gli ambienti utilizzati e vissuti ogni giorno da migliaia di persone, composte da gruppi con le più disparate esigenze.

Le norme e le limitazioni generalmente in uso per la valutazione e l'approvazione dei grandi progetti urbanistici sono basate su soglie limite, suddivise per le diverse parti della giornata, da rispettare per il controllo dell'inquinamento acustico. Nel caso in cui queste non siano rispettate l'approccio diffuso è quello di utilizzare misure di mitigazione dell'impatto delle diverse sorgenti sul rumore. Le misure progettuali per l'acustica e la gestione del rumore anche in questo caso sono generalmente studiate "al momento del bisogno" e se anche consentono di rientrare entro le soglie di legge, non garantiscono una percezione, acustica e visiva, positiva degli spazi progettati da parte degli utilizzatori, che può risultare quindi spesso nell'abbandono e nel disuso degli spazi.

Gli aspetti che definiscono la componente percettiva di un ambiente non sono purtroppo semplificabili al semplice rispetto di un valore, comunque importante per gli aspetti relativi alla salute pubblica, ma non in grado di rappresentare il complesso impatto dei suoni e dei rumori sull'ambiente valutato e la conseguente riuscita e completezza del progetto in tutti i suoi aspetti.

Risulta quindi evidente che la progettazione del soundscape di un ambiente progettato debba essere considerata fin dalle prime fasi di progettazione, insieme agli aspetti "tradizionali" che già vengono considerati come illuminazione e qualità dell'aria, per garantire un impatto efficace sulla percezione e la conseguente vivibilità degli spazi progettati, risultando anche più conveniente da un punto di vista economico rispetto ad interventi e modifiche progettate e realizzate a posteriori.

3.2 Inquinamento acustico da traffico

Per quanto riguarda le sorgenti di rumore, il rumore legato al traffico, grazie alla sua diffusione e alla sua natura quasi perpetua in certe zone delle città, è quello che comporta gli effetti maggiori in termini di inquinamento acustico. Da tempo ormai l'aumento costante del traffico nelle città è fonte di preoccupazione per le sue conseguenze sull'ambiente, anche quello sonoro, e sebbene di recente stiano iniziando a prendere piede movimenti e politiche per ridurre e rivoluzionare il modo in cui ci si sposta all'interno delle città, si prevede che il trend di crescita del numero di veicoli continuerà ancora per molto tempo.

Secondo Ogren et al. [10] le misure di intervento più efficaci sono quelle che agiscono alla sorgente, che nel caso delle automobili è il rumore di rotolamento dei pneumatici sull'asfalto che produce la maggior parte del rumore emesso, soprattutto ad alte frequenze. Secondo un confronto fra diversi scenari di interventi per la mitigazione del rumore da traffico la strategia che consentirebbe la riduzione maggiore di esposizione all'inquinamento acustico sarebbe quella di sostituire tutti gli interventi di sviluppo urbano in zone a bassa intensità di traffico, soluzione però irrealistica nella maggior parte degli scenari.

Secondo lo studio la miglior opzione realisticamente possibile, che comporterebbe un crollo dell'inquinamento, sarebbe l'introduzione generalizzata di pneumatici "silenziosi" o in alternativa l'utilizzo di manti stradali fonoassorbenti. Altre strategie come la riduzione del traffico infatti richiederebbero un abbattimento significativo del numero di veicoli per produrre un miglioramento percepibile. È anche interessante notare come la prospettiva futura di completa elettrificazione dei veicoli non porti ad un miglioramento significativo, se non nelle zone a bassa velocità. Infatti le auto elettriche eliminano il rumore del motore (basse frequenze) ma non risolvono il problema del rumore da rotolamento (alte frequenze), e anche se elettrici, l'aumento previsto del numero di veicoli nelle città, conseguenza dell'aumento di popolazione, abbasserebbe notevolmente i benefici delle auto più silenziose.

Un altro aspetto considerato dallo studio di Ogren et al. che risulta molto importante in queste valutazioni è la quantità di popolazione che viene esposta al rumore, ad esempio una riduzione della velocità di 10km/h risulterebbe in una riduzione significativa dei livelli di rumore, i cui effetti verrebbero però controbilanciati in 20 anni a causa del previsto aumento della popolazione urbana e il conseguente aumento delle persone esposte. Questo evidenzia ulteriormente quanto sia importante e necessario implementare un approccio e delle politiche che tengano in considerazione il soundscape urbano nell'ottica di una più ampia "revisione" delle nostre città e dell'impatto che gli ambienti urbani hanno sulla vita e sul benessere delle persone che li abitano.

Questi fenomeni sono ancora più evidenti nei paesi in via di sviluppo, la cui espansione della popolazione urbana comporta fenomeni che sono paragonabili a quelli delle città occidentali dello scorso secolo.

In questo senso è interessante considerare come si sia evoluta la morfologia delle città nell'ultimo secolo creando, sinergicamente con altri fattori come la diffusione di automobili e l'industrializzazione delle città, un ambiente decisamente sfavorevole in termini di soundscape.

3.3 Urban canyon

Come riportato da Raimbault et al. [32] "l'identità sonora di un ambiente riflette le attività a cui è adibito e si evolve con l'evolversi delle città" e, nelle città moderne, si rispecchia in grandi percentuali dello spazio adibite al passaggio delle automobili insieme ad edifici sempre più densi per sfruttare al massimo le superfici disponibili. Questo porta ad un ambiente "tridimensionale" molto denso in ogni direzione, dagli edifici sempre più alti all'utilizzo del sottosuolo per la costruzione e il passaggio di infrastrutture, limitando quindi la quantità di ambienti e materiali "naturali" presenti in città (Immagine 3.1).

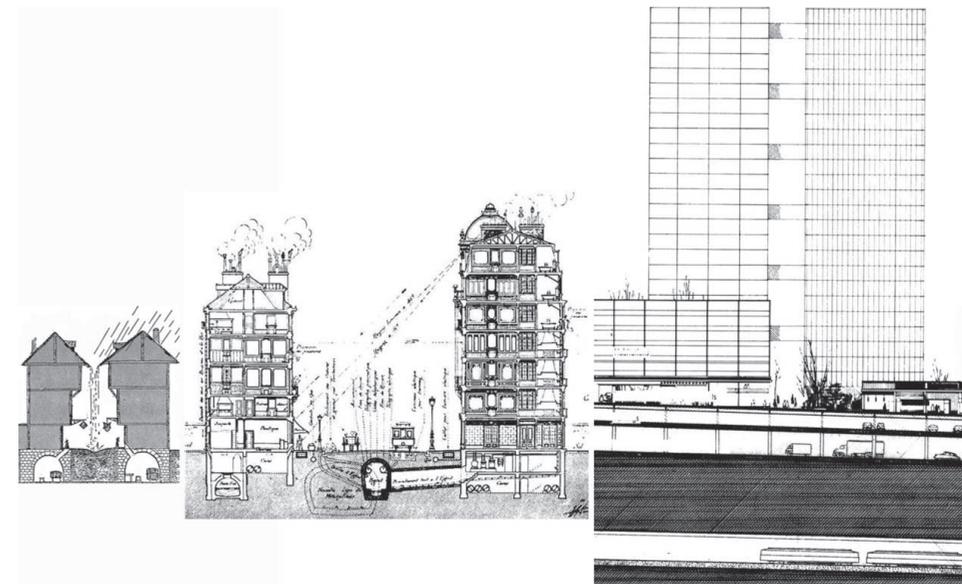


Immagine 3.1 Disegno da Raimbault et al. [32] Esempio delle tipiche morfologie urbane europee in diverse fasi storiche, dall'impianto medioevale, ai palazzi di Haussmann per finire con la moderna morfologia urbana. Si può notare come la morfologia e le diverse sorgenti di rumore antropico siano cambiate con l'evoluzione delle nostre città.

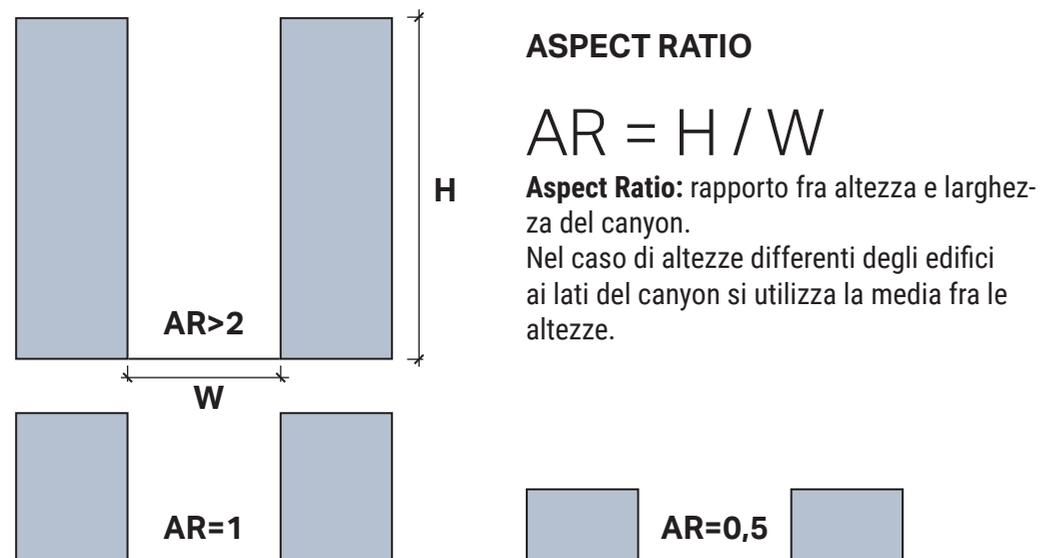
Proprio questa evoluzione morfologica delle città ha portato ad una serie di ambienti tipici degli spazi urbani, come nel caso dei canyon urbani.

Si definisce canyon urbano lo spazio che si crea quando le strade sono chiuse su ogni lato da edifici alti, creando la tipica sezione a forma di U la cui sezione è caratterizzata dai lati molto più alti della larghezza. Questa relazione fra le dimensioni in sezione viene descritta tramite l'Aspect Ratio, una misura che indica il rapporto fra l'altezza e la larghezza del canyon.

Questa particolare morfologia urbana è responsabile di una serie di fenomeni climatici e termici in particolare legati all'aggravamento del fenomeno dell'isola di calore urbano ed è inoltre una delle principali cause morfologiche di molti fenomeni acustici urbani.



Immagine 3.2 esempi di urban canyon nella città contemporanea.



3.3 Canyon urbano e acustica

A differenza degli spazi aperti tipici delle zone non urbanizzate dove la propagazione del suono è simile alla propagazione in campo libero, dove le onde sonore non interagiscono con nessuna superficie che le rifletta fatta eccezione per il suolo e si propagano liberamente nello spazio, in ambiti urbani la propagazione dei suoni e dei rumori, e il conseguente ambiente sonoro che si genera, sono determinati dalle numerose riflessioni contro le numerose superfici orizzontali e verticali che caratterizzano lo spazio. In questo senso i canyon urbani imbottigliano le riflessioni delle onde sonore che hanno una superficie aperta da cui disperdersi molto piccola, affiancata invece da ampie superfici riflettenti. Le riflessioni multiple che si verificano fra le facciate opposte causa quindi un aumento dei livelli di pressione sonora all'interno del canyon.

Il fenomeno è direttamente collegato alle proporzioni geometriche della strada, in particolare il rapporto fra altezza e larghezza del canyon è un buon indicatore del fenomeno, infatti il numero di riflessioni cresce quando gli edifici sono più alti e la strada più stretta. Il fenomeno è legato inoltre alla natura generalmente liscia e riflettente delle superfici urbane, in cui è difficile trovare materiali con caratteristiche assorbenti o diffusive, la componente diffusa delle riflessioni è perciò dovuta alle irregolarità geometriche degli edifici come balconi, davanzali e tetti [31].

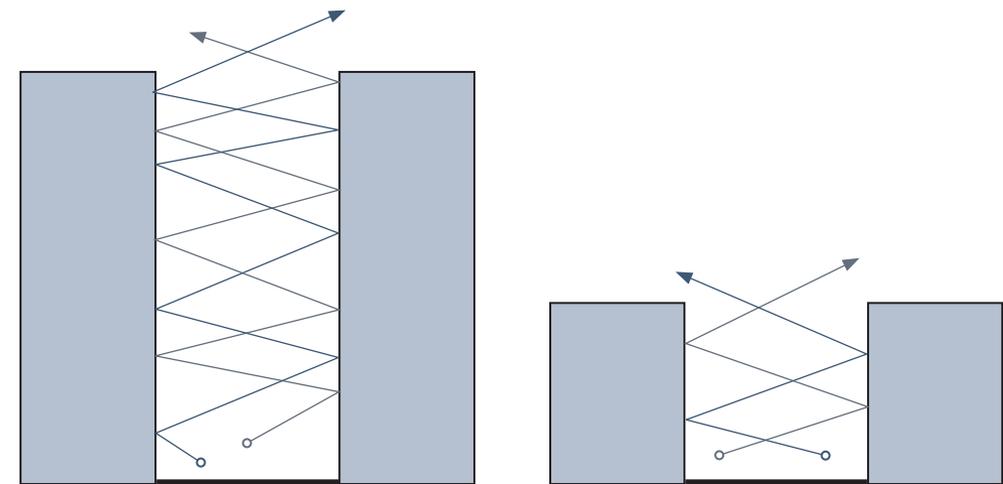


Immagine 3.3 Effetti delle proporzioni di un canyon urbano sulla riflessione delle onde acustiche contro le facciate degli edifici. Un canyon più aperto consente alle onde sonore di essere riflesse verso l'alto fuori dal canyon molto prima, con un minor numero di riflessioni. Questo emerge chiaramente dalle differenze nei tempi di riverberazione T_{30} in diverse configurazioni [31].

La propagazione del suono nei canyon urbani è stata oggetto di ricerca, specialmente negli ultimi decenni, inizialmente tramite misure sperimentali con modelli in scala ma anche e soprattutto tramite l'utilizzo di modelli digitali, portando ad alti livelli di accuratezza dei modelli di diffusione e propagazione del suono in ambiente urbano.

Picaud et al. [33] hanno indagato l'effetto di superfici diffusive all'interno di canyon urbani tramite l'utilizzo di modelli in scala realizzati con blocchi di legno per modificare le facciate con diversi livelli di diffusività (Immagine 3.4), con l'intento di determinare l'effetto delle irregolarità in facciata degli edifici come balconi, davanzali e cornicioni.

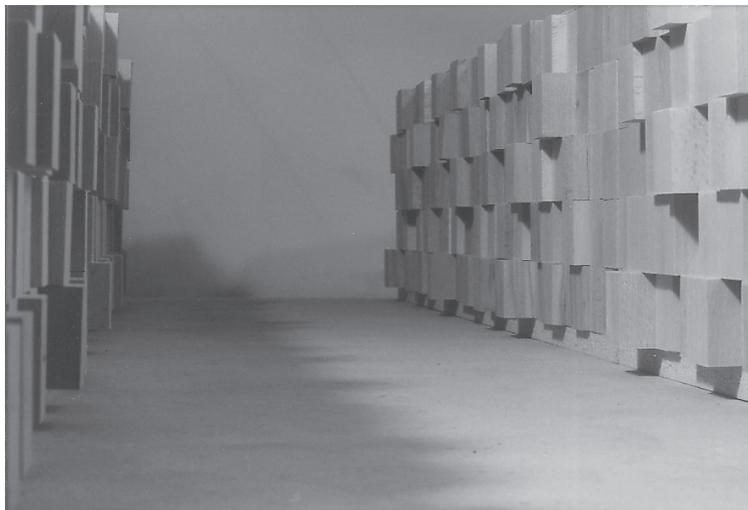


Immagine 3.4 Foto dei modelli in scala del canyon urbano ideale usati per le misurazioni da Picaud et al. [33].

Lu et al. [34] hanno studiato in che modo gli effetti di interferenza fra riflessioni multiple influisca sui livelli di pressione effettuando misure in camera anecoica su un modello di canyon urbano stretto, all'epoca ancora poco studiato, determinando come gli effetti di interferenza siano rilevanti in caso di canyon di larghezza inferiore a 0 metri e caratterizzati da superfici riflettenti, e la conseguente necessità di usare per questi casi modelli a sorgente immagine completi che in questo caso offrivano una maggiore accuratezza rispetto ai modelli energetici.

Hornikx et al. [35] hanno svolto uno studio con misurazioni su un modello in scala per confrontare i fenomeni di diffusione fra canyon direttamente esposto e un canyon parallelo schermato e con un cortile schermato, e per verificare l'efficacia nei diversi casi di porzioni di facciata trattate con materiali assorbenti e diffusivi. Ne è risultata l'importanza di sorgenti anche molto lontane nei casi di trasmissione del suono fra canyon paralleli, infatti i livelli nei canyon paralleli

sono grossomodo costanti lungo tutta la lunghezza del canyon (con sorgente puntiforme). Per quanto riguarda i trattamenti alcuni dei risultati confermano l'importanza dei fenomeni di diffrazione ai bordi fra spazi schermati e risulta inoltre evidente la maggior efficacia dei diversi trattamenti nei canyon schermati e ancora di più nel caso del cortile, rispetto all'efficacia degli stessi nel canyon direttamente esposto.

I primi modelli per la simulazione di urban canyon erano basati sul calcolo di riflessioni puramente speculari, assumendo che le superfici delle facciate fossero prive di irregolarità e perfettamente riflettenti. Nella maggior parte delle situazioni però questo assunto non porta a risultati accurati e realistici, non comparabili con le misurazioni effettuate in loco in città, in quanto le facciate degli edifici sono in molti casi ricche di irregolarità ed elementi geometrici che causano scattering. È quindi iniziato uno sviluppo di diversi modelli che tenessero in considerazione le riflessioni diffuse e che si avvicinassero maggiormente alla realtà.

Secondo Kang et al. [36] il reale modello di propagazione all'interno di un urban canyon è un insieme di riflessioni geometriche e diffuse. In uno studio hanno svolto un confronto tra gli effetti in un canyon considerando le superfici esclusivamente riflettenti, per le quali venne utilizzato un metodo image source, e considerando le superfici come esclusivamente diffusive, calcolato con un modello radiosity, andando a verificare alcuni parametri come l'attenuazione lungo la lunghezza del canyon, negli incroci ortogonali fra due vie, gli effetti di altezza e larghezza di strada ed edifici.

Nonostante i due casi non siano realistici sono utili per dimostrare alcuni meccanismi, nel caso di superfici riflettenti l'attenuazione del suono è infatti inferiore rispetto al caso puramente diffusivo, dal momento che la dispersione delle riflessioni sulle superfici diffusive fa sì che una quantità maggiore di energia sia dissipata e una quantità maggiore di riflessioni venga indirizzata fuori dal canyon.

Onaga et al. [37] per dimostrare la relazione fra scattering e caratteristiche acustiche di un urban canyon ha combinato image source e radiosity per calcolare un caso di riflessioni speculari e diffuse combinate, con l'intento di ottenere una ricostruzione realistica della propagazione sonora ricavando conclusioni molto utili circa il funzionamento dell'acustica all'interno di un canyon urbano. Lo studio dimostra infatti come lo scattering determini un aumento dei livelli a breve distanza dalla sorgente e una diminuzione all'aumentare delle distanze. Inoltre gli effetti dello scattering sono influenzati dalla geometria della via, nel caso di edifici bassi la maggiore diffusività genera una riduzione dei livelli, mentre nel caso di facciate alte l'aumento di SPL a breve distanza è maggiore.

Questo si verifica perché nei canyon con facciate basse le riflessioni speculari tardive costituiscono la parte dominante di energia e in questo caso i tempi di riverberazione sono determinati allo stesso modo dai coefficienti di scattering e di assorbimento. Nel caso opposto quando si hanno delle facciate più alte le riflessioni diffuse costituiscono la frazione prevalente di energia e i tempi di riverberazione sono quindi determinati solo dal livello di assorbimento delle superfici.

Can et al. [38] hanno ripreso i concetti esplorati da Onaga realizzando uno studio con un modello di particle tracing per indagare sui fenomeni di scattering legati agli elementi di arredo urbano, generalmente non considerati nelle simulazioni, e il loro impatto sull'acustica, tramite il confronto fra modelli con arredi urbani e senza arredi urbani. Riprendono inoltre i parametri geometrici di altezza e larghezza del canyon, i coefficienti di scattering e assorbimento sia per le facciate sia per le pavimentazioni e il suolo, e studia gli effetti reciproci che le diverse combinazioni di parametri producono. Lo studio conferma inoltre l'effetto legato allo scattering degli arredi urbani, la cui presenza nei modelli di simulazione comporta differenze notevoli nei livelli di pressione rispetto ai modelli in cui non vengono considerati.

3.4 Strategie di intervento architettoniche

Le strategie di riduzione del rumore vengono generalmente divise in tre categorie in funzione di dove mitigano la propagazione del rumore: alla sorgente (ad esempio l'abbassamento dei limiti di velocità di una strada), lungo il tragitto, come nel caso di barriere acustiche, o al ricevitore, ad esempio con diversi trattamenti di insonorizzazione interna degli edifici. Ovviamente l'eliminazione o la mitigazione delle sorgenti è la strategia generalmente più efficace anche se spesso difficilmente applicabile, soprattutto nel momento in cui l'acustica di un progetto viene valutata a posteriori quando il range delle possibilità di intervento è ormai ridotto [30].

Come si è visto i canyon urbani sono ambienti riverberanti caratterizzati da riflessioni multiple che si sommano ai suoni diretti amplificandoli, e, come dimostrato dai lavori di ricerca precedentemente riportati, le caratteristiche geometriche e i livelli di assorbimento e di scattering possono influenzare la propagazione dei suoni. Negli ambienti urbani tradizionali i livelli di assorbimento e di diffusione che caratterizzano materiali e superfici di edifici e strade sono generalmente molto bassi, contribuendo quindi ai fenomeni di inquinamento acustico. Negli ultimi decenni molti studi e lavori di ricerca hanno studiato un gran numero di possibili soluzioni architettoniche per mitigare i fenomeni di

riflessione multipla e di propagazione dei rumori nei canyon urbani, in modo da fornire delle linee guida da seguire ai progettisti, nell'ottica di una progettazione consapevole che consideri l'acustica come parte integrante dell'architettura e non come problema da risolvere a posteriori.

I principali ambiti di ricerca riguardano il trattamento delle facciate degli edifici, a partire dagli aspetti geometrici come la forma della facciata o il design dei balconi come elementi acustici o la geometria delle coperture, fino ad interventi sui materiali per modificare la capacità di assorbimento degli edifici e delle strade.

3.5 Overview letteratura

La Tabella 3.1 raccoglie i principali articoli disponibili in letteratura, raccolti nella fase di ricerca bibliografica in preparazione alle simulazioni svolte per questa tesi. Si tratta dei principali articoli che trattano la simulazione e lo sviluppo di soluzioni acustiche per l'ambiente urbano, principalmente per la mitigazione dei livelli acustici in facciata, tramite l'intervento sull'ambiente costruito e sugli elementi architettonici che lo caratterizzano. Per ognuno degli articoli vengono riportate le metodologie di simulazione o di misurazione acustica, l'ambito di intervento valutato, la tipologia di sorgente sonora utilizzata e un riassunto delle principali conclusioni.

Gli articoli sono ordinati in base alle categorie di intervento che distinguono gli interventi su facciate, coperture, balconi, barriere acustiche e infine facciate e coperture vegetate.

OVERVIEW LETTERATURA

IMPATTI DEL DESIGN ARCHITETTONICO SULL'ACUSTICA URBANA

autori	anno	titolo	metodo simulazione	sommario	interventi acustici	conclusioni	tipologia sorgente	ambito intervento
Gemma Maria Echevarria Sanchez, Timothy Van Renterghem, Dick Botteldooren [31]	2016	The effect of street canyon design on traffic noise exposure along roads.	FDTD (velocity-pressure Finite Difference Time Domain)	valutazione numerose tipologie di soluzioni architettoniche in canyon urbano	1_inclinazione/forma facciata 2_arretramento piani bassi 3_geometria e materiali balconi 4_sporgenze triangolari 5_inclinazione finestre schermate 6_barriere a bordo strada 7_strada interrata	1_facciate inclinate equivalenti a facciate verticali assorenti, efficaci a livello pedonale 2_obiettivo delle geometrie la riflessione verso l'alto delle onde sonore 3_Larretramento dei piani bassi efficace per le facciate, poco per i pedoni 4_design dei balconi molto importante, punti chiave: parapetti inclinati verso l'alto e materiale assorbente sui soffitti 5_finestre schermate e sporgenze triangolari forniscono riduzione del rumore sulle facciate 6_barriere assorbenti a bordo strada efficaci nel ridurre l'esposizione pedonale 7_l'attenuazione del rumore può essere condizionata fortemente tramite elementi di design del canyon urbano e delle facciate	traffico	• facciate • balconi • barriere
Armin Taghipour, Tessa Sievers, Kurt Eggenschwiler [43]	2019	Acoustic Comfort in Virtual Inner Yards with Various Building Facades	ODEON (Image source Ray Tracing) + Auralab (test di ascolto)	valutazione di interventi per l'acustica sul comfort acustico in un cortile interno, tramite auralizzazioni e test di ascolto	1_Variazioni fra facciate vetrate e assorbenti con diverse configurazioni 2_Utilizzo di porte e finestre assorbenti 3_trattamento balconi con materiale assorbente 4_diverse sorgenti interne al cortile con l'uso di diversi suoni/rumori	1_moderato assorbimento delle facciate migliora il comfort acustico nel cortile, livelli di assorbimento troppo alti potrebbero peggiorare la percezione dello spazio 2_necessari ulteriori studi per determinare quali parametri acustici influenzano direttamente il comfort acustico percepito	sorgenti puntuali di diverso tipo	• facciate • balconi
Tommaso Crippa, Edoardo Dagnini, Gareth Davies, Harry Rees [41]	2019	Façade Engineering and Soundscape	CATT acoustics (metodo geometrico)	ottimizzazione acustica cortile interno del complesso Central St Giles a Londra, valutando l'applicazione di materiale assorbente per facciate e avimentazione e variazioni geometriche cortile	1_materiale assorbente per tutte le facciate 2_materiale assorbente su tutta la facciata dei piani alti (>7m) 3_facciata completamente assorbente al piano terra 4_diverse percentuali di superficie assorbente al piano terra, con distribuzione casuale 5_diverse forme e materiali per il tunnel di accesso 6_soluzione migliore combinando i diversi interventi	1_gli scenari con la maggior superficie assorbente sono i più efficaci anche se irrealistici in ottica di fattibilità 2_tramite l'ottimizzazione della superficie assorbente e della geometria degli ingressi alla piazza si raggiunge una soluzione con il miglior rapporto di efficacia e fattibilità	traffico, due diverse sorgenti puntuali	• facciate
Maarten Hornikx, Jens Forssén [39]	2009	Noise abatement schemes for shielded canyons	2.5D equivalent sources method (2.5D ESM)	simulazione di diversi metodi per la mitigazione del rumore da traffico proveniente da una via parallela in due cortili schermati considerando gli effetti di diffrazione	1_materiale assorbente in facciata: diversi materiali e posizioni del materiale 2_schermature orizzontali in facciata 3_schermi verticali sulle coperture 4_copertura verde/pavimentazione vegetata	1_mitigazione rumore aumenta con a superficie assorbente 2_barriere verticali copertura più efficaci di quelle orizzontali	traffico	• facciate

Tabella 3.1 overview letteratura ambiti di intervento acustica.

autori	anno	titolo	metodo simulazione	sommario	interventi acustici	conclusioni	tipologia sorgente	ambito intervento
Maarten Hornikx , Jens Forssén [59]	2010	Numerical study to the effects of facade properties on sound propagation to a tree-dimensional urban courtyard	Fourier PSTD	simulazione diverse configurazioni di facciate per la schermatura di un cortile e di un canyon parallelo	1_facciate lisce riflettenti 2_facciate lisce assorbenti 3_facciate con irregolarità geometriche che causano riflessioni diffuse	1_la soluzione assorbente risulta la più efficace, quella diffusiva presenta una leggera riduzione	traffico	•facciate
Maarten Hornikx, Jens Forssén [40]	2011	Modelling of sound propagation to three-dimensional urban courtyards using the extended fourier PSTD method	Fourier PSTD 2d/3d	simulazione 3 sistemi di mitigazione del rumore in un canyon parallelo, in un cortile e in un cortile con un lato aperto. confronto risultati di simulazioni bi e tri-dimensionali	1_assorbimento facciate 2_schermi orizzontali facciate 3_schermi verticali coperture	1_Livelli inversamente proporzionali a superficie assorbente 2_schermi coperture più efficaci che schermi in facciata 3_simulazione 2d sottostima effetti dei primi due trattamenti	traffico	•facciate
Cristina Calleri, Louena Shtrepi, Alessandro Armando, Arianna Astolfi [42]	2018	Evaluation of the influence of building façade design on the acoustic characteristics and auditory perception of urban spaces	ODEON (Image source Ray Tracing)	Studio degli effetti sulla percezione degli ascoltatori di diversi materiali di facciata in una piazza, svolto tramite auralizzazioni e test di ascolto	1_variazione di tre materiali di facciata con diversi coefficienti di assorbimento e scattering	1_il coefficiente di assorbimento influenza visibilmente i tempi di riverberazione 2_posizione dell'ascoltatore parametro più influente sulla percezione soggettiva, in funzione delle posizioni cambia fra t30 e C50 il parametro più influente sulla percezione	sorgente puntuale omnidirezionale (registrazione anecoica di persone che parlano)	•facciate
Elena Badino, Roberto Manca, Louena Shtrepi, Cristina Calleri, Arianna Astolfi [44]	2019	Effect of façade shape and acoustic cladding on reduction of leisure noise levels in a street canyon	Grasshopper+Pachyderm, image source+raytracing+Biot Tolstoy Medwin edge diffraction model (pachyderm)	ottimizzazione design facciata in canyon urbano	1_pattern balconi/logge 2_geometria balconi 3_materiali balconi 4_combinazione materiali assorbenti facciata/pavimentazione	1_i balconi risultano efficaci ai piani alti della facciata 2_i parametri chiave sono la profondità dei balconi e l'aumento del coefficiente di assorbimento delle superfici	sorgente puntuale omnidirezionale (persone che parlano)	• balconi
Shinichi Sakamoto, Ami Aoki [46]	2015	Numerical and experimental study on noise shielding effect of eaves louvers attached on building façade	finite-difference time-domain method 2d + misurazioni su modello 1:20	ottimizzazione parametri geometrici schermature in facciata tipiche dell'architettura tradizionale giapponese.	1_schermi piatti orizzontali 2_schermi inclinati 3_schermi lamellari tipo bris soleil	1_schermi orizzontali efficaci ma possono interferire coi piani inferiori 2_schermi inclinati efficaci con meno interferenze 3_brisoleil efficaci ai piani superiori 4_tutte le soluzioni guadagnano efficacia con l'altezza degli edifici	sorgente lineare a centro strada	•balconi

Tabella 3.1 overview letteratura ambiti di intervento acustica.

autori	anno	titolo	metodo simulazione	sommario	interventi acustici	conclusioni	tipologia sorgente	ambito intervento
Sk Tang [45]	2005	Noise screening effects of balconies on a building facade	misurazione su modelli in scala	misurazione degli effetti schermanti di balconi con geometrie diverse in funzione di distanza e posizione della sorgente	1_balcone chiuso su tre lati 2_balcone chiuso ssu lato anteriore 3_balcone chiuso ai lati 4_bacone aperto	1_a breve distanza dalla sorgente il solaio del balcone svolge l'azione schermante 2_all'aumentare della distanza i lati diventano più importanti 3_i balconi posso riflettere il suono verso i balconi sottostanti 4_l'effetto di schermatura aumenta con la distanza dalla sorgente	sorgente lineare tramite array amplificatori	• balconi
Xu Wang, Dongxing Mao, Wuzhou Yu, Zaixiu Jiang [47]	2015	Acoustic performance of balconies having inhomogeneous ceiling surfaces on a roadside building facade	image source + raytracing; FEM Finite Element Modelling	valutazione trattamento con superfici riflettenti irregolari del soffitto di balconi per evitare riflessioni verso i piani inferiori che compromettono l'effetto schermante dei balconi	1_utilizzo di un array di tubi come smorzatore per ricreare un risonatore che riproduce una superficie con impedenza disomogenea ideale	1_miglioramento della schermatura offerta dai balconi risetto ad una superficie rigida rilette 2_la prestazione della superficie teorica è superiore a quella della soluzione pratica simulata	n. a.	• balconi
Timothy Van Renterghem, Dick Botteldooren [48]	2010	The importance of roof shape for road traffic noise shielding in the urban environment	full wave method (finite difference time domain FDTD) (2D)	studio degli effetti di diverse tipologie di copertura con variazione di alcuni parametri geometrici sulla trasmissione alla facciata schermata di un canyon parallelo	1_tetti piani 2_tetti a falde 3_tetti a una falda 4_tetti curvi 5_tetti shed	1_Le coperture risultano fondamentali nella trasmissione fra ambienti paralleli schermati 2_classificazione di tutte le possibili soluzioni, la più efficace per la schermatura del "quiet side" risultano essere le coperture a shed. 3_i risultati sono indicativi ma non assoluti, per determinare le opzioni migliori in casi reali ogni progetto va analizzato in quanto le caratteristiche del contesto circostante sono molto influenti.	traffico, due sorgenti omnidirezionali secondo modello il modello Harmonoise/Imagine	• coperture
Timothy Van Renterghem, Dick Botteldooren [49]	2009	Reducing the acoustical façade load from road traffic with green roofs	full wave method (finite difference time domain FDTD) (2D)	applicazione di coperture verdi a de casi studio per migliorare schermatura facciata con esposizione diretta e facciata schermata in un canyon parallelo	1_applicazione di tetto verde su una terrazza posta di fronte alla facciata analizzata (schermatura da suono diretto e effetto assorbente tetto verde): -tipologia tetto verde -spessore substrato -geometria 2_tetto verde su copertura per schermatura canyon parallelo: -inclinazione falde -tipologia tetto verde -spessore substrato	1_ -schermatura aumenta con terrazza più lunga (zona d'ombra maggiore) -anche effetto tetto aumenta con dimensioni terrazza (maggior superficie trattata) -differenze fra substrati e spessori apprezzabili solo son una certa superficie 2_ -miglior risultato con tetto piatto, l'effetto del tetto verde diventa più evidente con tetti a falde -efficacia tetto verde estensivo maggiore -per entrambe le tipologie l'efficacia aumenta al crescere dello spessore	traffico, due sorgenti omnidirezionali secondo modello il modello Harmonoise/Imagine	• coperture

Tabella 3.1 overview letteratura ambiti di intervento acustica.

autori	anno	titolo	metodo simulazione	sommario	interventi acustici	conclusioni	tipologia sorgente	ambito inter-vento
Timothy Van Renterghem, Maarten Hornikx, Jens Forssen, Dick Botteldooren [50]	2013	The potential of building envelope greening to achieve quietness	simulazioni 3d e 2d, full wave method (finite difference time domain FDTD, pseudo spectral time domain PSTD)	valutazione dell'efficacia di facciate e coperture verdi per ridurre l'esposizione di un cortile schermato	1_schermi verdi tetto 2_tetti verdi 3_facciate verdi 5_combinazione delle soluzioni	1_I tetti verdi hanno il maggior potenziale di riduzione della trasmissione fra cortili paralleli al canyon sorgente 2_Efficacia delle pareti verdi nel cortile condizionata dalle caratteristiche acustiche delle facciate nel canyon sorgente 3_Facciate verdi più efficaci se usate nel canyon sorgente, riduzione della trasmissione verso ambienti schermati applicando vegetazione alla facciata dei piani più alti	traffico, due sorgenti omnidirezionali secondo modello il modello Harmonoise/Image	• facciate verdi • coperture verdi • barriere
Yuliya Smyrnova, Jian Kang, Maarten Hornikx, Jens Forssén [60]	2012	Effect of vegetation on noise propagation in streets and squares	combined ray tracing radiosity (CRR) / finite difference time domain FDTD (2D)	valutazione diversi approcci di trattamento acustico di una piazza e di una via tramite applicazione di vegetazione in facciata e l'uso di barriere acustiche vegetate	1_Applicazione vegetazione in facciata: facciata completa, solo metà superiore della facciata, solo metà inferiore della facciata 2_Barriere vegetate basse a bordo strada	1_Facciate vegetate meno efficaci nella strada rispetto alla piazza 2_Riduzione rumore con facciate modesto a causa del coefficiente di assorbimento basso alle basse frequenze	traffico, tre sorgenti puntuali ad altezze diverse	•facciate vegetate •barriere vegetate
Hyung Suk Jang, Ho Jun Kim, Jin Yong Jeon [61]	2015	Scale-model method for measuring noise reduction in residential buildings by vegetation	misurazione su modello in scala 1:10 + ODEON (Image source Ray Tracing)	valutazione degli effetti dell'applicazione di facciate vegetate in un canyon urbano, confronto fra misurazioni con modello in scala e simulazione Odeon	1_Applicazione vegetazione in facciata	1_leggera riduzione livelli in facciata 2_differenze molto leggere fra misurazioni e simulazione	sorgente lineare tramite array amplificatori	•facciate vegetate
Timothy Van Renterghem, Dick Botteldooren, Maarten Hornikx, Philippe Jean, Jerome Defrance, Yuliya Smyrnova, Jian Kang [58]	2012	Road traffic noise reduction by vegetated low noise barriers in urban streets	FDTD (finite-difference time-domain), PSTD (pseudo-spectral time-domain), BEM (boundary element method), combined ray tracing radiosity (CRR)	simulazione di barriere vegetate a bordo strada e confronto fra diversi metodi di simulazione	1_barriere schermanti a bordo e centro strada con diversi setup	1_ad un maggior numero di barriere corrisponde una riduzione maggiore del rumore 2_coefficiente di assorbimento delle barriere requisito fondamentale per l'efficacia della riduzione 3_i metodi wave based danno risultati comparabili e accurati mentre il CRR sottostima o sovrastima gli effetti in funzione delle diverse posizioni delle barriere	traffico, due sorgenti omnidirezionali secondo modello il modello Harmonoise	•barriere vegetate

Tabella 3.1 overview letteratura ambiti di intervento acustica.

3.5.1 Design e trattamenti di facciata

Hornikx e Forssen [39, 40] hanno testato in due articoli diverse soluzioni per la schermatura e la mitigazione del rumore da traffico in un canyon parallelo schermato e in un cortile schermato. Sono state testate, con un metodo wave based bidimensionale, nel caso del cortile abbinato ad un metodo tridimensionale, diverse soluzioni che prevedevano il trattamento delle facciate con materiali assorbenti, testando diversi livelli di assorbimento e l'applicazione dei materiali a diverse porzioni di facciata per individuare la posizione più efficace per i trattamenti. Inoltre viene valutata l'applicazione di schermi orizzontali in facciata al di sopra delle finestre e schermi verticali sui colmi delle coperture. I risultati evidenziano una diretta relazione tra il livello di assorbimento e la posizione delle porzioni assorbenti in relazione alle diverse posizioni delle sorgenti, risulta anche che gli schermi verticali sulle coperture siano più efficaci di quelli in facciata.

Inoltre viene confermata nel caso del cortile interno la necessità di metodi tridimensionali per una simulazione accurata data la sezione non costante. Lo studio evidenzia anche come i fenomeni di diffrazione fra canyon paralleli siano significativi, specialmente nelle vie più strette e per le alte frequenze, e come possano ridurre l'efficacia dei materiali assorbenti in facciata.

Sanchez et al. [31] hanno svolto uno studio esaustivo di un gran numero di soluzioni possibili, con l'obiettivo di fornire una panoramica completa su tutte le soluzioni architettoniche che potrebbero influenzare l'acustica di un canyon urbano, valutando i livelli sonori in facciata e a livello strada. Per quanto riguarda le facciate sono state considerate diverse forme globali dell'edificio (facciata concava, convessa, inclinata, a gradoni), l'arretramento della facciata in corrispondenza dei primi piani degli edifici, l'utilizzo di finestre inclinate schermate o di strutture triangolari per rendere irregolare la facciata e indirizzare le riflessioni verso l'alto.

Di queste soluzioni l'arretramento di primi piani consentirebbe il vantaggio più grande per l'esposizione dei pedoni e dei primi piani, principalmente grazie alla distanza maggiore dalla sorgente, mentre le finestre schermate e "schermature" triangolari sono efficaci nella protezione dei piani più alti degli edifici, tuttavia il livello di efficacia dipende fortemente dalla geometria e dall'inclinazione delle superfici, inoltre in alcuni casi può causare un aumento della pressione sonora a livello pedonale.

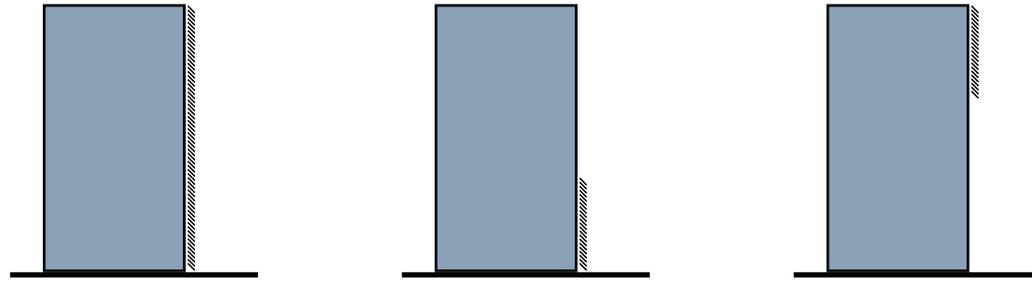
Crippa et al. [41] hanno svolto uno studio sul caso studio del complesso di St. Giles a Londra, per ottimizzare l'acustica della piazza interna. Utilizzando un approccio parametrico computazionale, con un software custom per collega-

re l'ambiente di modellazione tridimensionale con il software di simulazione CATT Acoustics, che consentiva di valutare una grande quantità di iterazioni. Sono infatti state testate diverse soluzioni consistenti in una combinazione di trattamenti fonoassorbenti delle facciate e della pavimentazione con diverse soluzioni di layout delle aperture sulla piazza. Inoltre sono state testate diverse posizioni per l'applicazione di materiale fonoassorbente e diverse percentuali di superficie trattata al fine di identificare la miglior soluzione anche da un punto di vista di costi-benefici.

Calleri et al. [42] hanno svolto una valutazione dell'effetto dei coefficienti di scattering e assorbimento delle facciate sulla percezione di un ascoltatore degli spazi urbani, nello specifico di una piazza, tramite una serie di auralizzazioni utilizzare per dei test di ascolto che hanno evidenziato come cambiamenti del coefficiente di assorbimento abbia un'influenza sulla percezione uditiva degli ascoltatori. La valutazione degli aspetti percettivi viene spesso trascurata in questo tipo di ricerche, molto incentrate sulla riduzione dei livelli di pressione sonora senza valutare quelle che possono essere le conseguenze di questo tipo di interventi sui fruitori degli spazi trattati, parametro che dovrebbe essere invece centrale in una progettazione in ottica di soundscape [43].

Sommario:

- Il parametro relativo alle facciate più efficace sembra essere quello del **coefficiente di assorbimento**, direttamente collegato all'uso di materiale fonoassorbente per trattare le superfici di facciata. L'efficacia di questa strategia aumenta con l'aumentare della superficie trattata.
- In applicazioni reali la **posizione delle superfici assorbenti** può essere ottimizzata in base al contesto specifico.
- La presenza di superfici irregolari e sporgenze in facciata ha un impatto, i cui effetti sembrano però variare in base al caso specifico.
- L'efficacia dei trattamenti sembra diminuire all'aumentare dell'altezza dei ricevitori, ovvero in corrispondenza dei piani più alti degli edifici. Diminuisce quindi all'aumentare della distanza dalla sorgente.
- L'**arretramento delle facciate** ai piani bassi sembra promettente per la riduzione dei livelli in facciata. Se abbinato a soffitti assorbenti ridurrebbe anche l'esposizione degli spazi pedonali. Un esempio è quello dei **portici**, tipici in ambienti urbani e potenzialmente indicati per interventi di retrofit con materiale fonoassorbente.



Posizionamento superfici fonoassorbenti

Facciata completa

- Prestazioni migliori grazie alla maggior superficie assorbente
- Riduce globalmente i livelli all'interno del canyon
- Soluzione più pesante economicamente, difficilmente fattibile in scenari reali

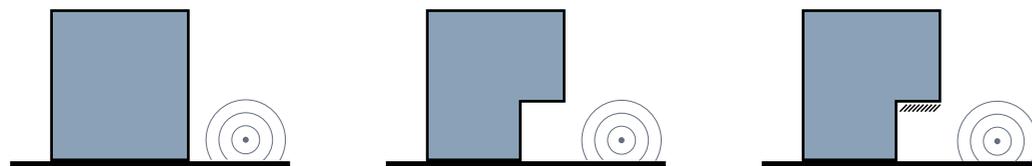
Facciata inferiore

- Consente di ridurre il rumore a livello pedonale
- Probabilmente sufficiente in ambienti non esposti a propagazione diretta del rumore
- Intervento efficiente mirato ai piani maggiormente esposti vista la ridotta distanza dalle sorgenti

Facciata superiore

- Soluzione che sembrerebbe aiutare a ridurre la trasmissione verso uno spazio parallelo schermato dagli edifici
- Secondo la letteratura la sua efficacia può dipendere dalle condizioni del contesto circostante

.....> **NOTA:** L'abbassamento dei livelli acustici è ricollegato in molti studi all'aumento delle superfici assorbenti, tuttavia il trattamento della facciata completa può essere irrealistico in termini economici e di fattibilità tecnica. Il posizionamento strategico delle superfici assorbenti può quindi aiutare a rendere più efficiente il loro impiego.



Arretramento piani terra

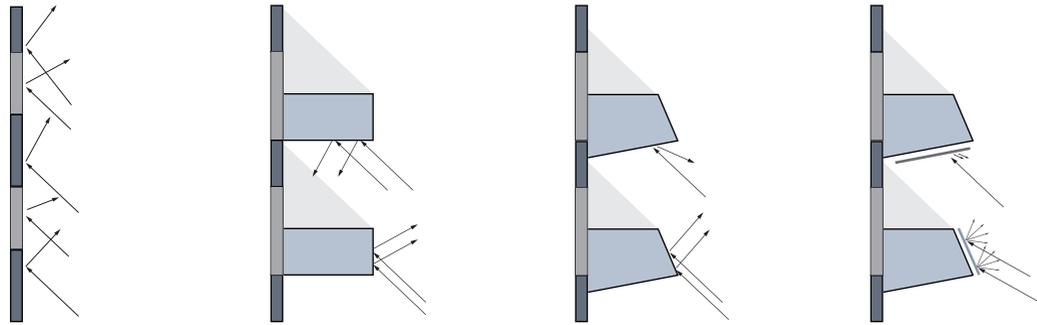
- Soluzione che consente di ridurre i livelli in facciata al piano terra grazie alla maggior distanza dalla sorgente.
- Riduce i livelli acustici dei marciapiedi e quindi l'esposizione dei pedoni
- Fornisce la superficie del soffitto, protetta contro fenomeni atmosferici, ad eventuali trattamenti acustici, riducendo le riflessioni verso il marciapiede.
- Se la parte arretrata è sufficientemente alta si riscontrano riduzioni dei livelli in facciata

3.5.2 Balconi

Uno degli aspetti architettonici più studiati in relazione con l'acustica è quello dei balconi sulle facciate che allo stesso tempo possono svolgere la funzione di schermi per le finestre e di riflettori per dirigere le riflessioni fuori dal canyon. Secondo lo studio di Sanchez et al. [31], dove sono stati simulati gli effetti di diverse variazioni geometriche e di materiali dei balconi di una facciata in un canyon urbano variando le inclinazioni di parapetti e soffitti dei balconi, si possono ottenere buoni risultati di riduzione del rumore di facciata principalmente grazie all'effetto schermante dei balconi che viene accentuato dalle superfici inclinate nella corretta posizione. La diminuzione dei livelli cresce con l'altezza dell'edificio, non si ottengono invece benefici considerevoli sul rumore a piano strada.

Badino et al. [44] hanno ripreso alcuni dei concetti esplorati da Sanchez et al. e svolto l'ottimizzazione acustica di una facciata andando ad operare su geometria e materiali dei balconi utilizzando un modello parametrico per la modellazione e la simulazione che consente di valutare una gran numero di combinazioni di diversi parametri. Lo studio ha confrontato l'uso di balconi o di logge e anche l'uso combinato di entrambi con diversi pattern di distribuzione in facciata, valutando poi la variazione di numerosi parametri geometrici caratterizzanti i balconi, come la profondità dell'aggetto, le inclinazioni di parapetto e soffitto delle logge e dei balconi e infine ottimizzando diverse combinazioni di materiali riflettenti, assorbenti e diffusivi per le diverse superfici dei balconi. Secondo lo studio i balconi sono particolarmente efficaci per schermare i piani superiori dell'edificio, mentre non si notano riduzioni significative ai piani inferiori, e i parametri che comportano differenze maggiori sono la profondità dei balconi e l'aumento del coefficiente di assorbimento ottenuto tramite i materiali di rivestimento che consente un significativo miglioramento prestazionale rispetto alle sole opzioni geometriche.

[45, 46, 47]



Effetto schermante

- I balconi creano una zona d'ombra sulle facciate che schermano porte e finestre, elementi particolarmente sensibili per la trasmissione del rumore all'interno degli edifici.
- Le riflessioni sul soffitto dei balconi dei piani superiori però in molti casi annulla l'effetto di schermatura del balcone.
- L'effetto di schermatura dipende dall'altezza del piano e dalla posizione relativa della sorgente.

Controllo delle riflessioni

- La geometria dei balconi può essere ottimizzata per migliorare la schermatura della facciata.
- L'inclinazione di soffitti e parapetti consente di indirizzare le riflessioni lontano dal balcone inferiore e verso l'alto, fuori dal canyon urbano.
- L'uso combinato di geometria e materiali acustici assorbenti e diffusivi può consentire di calibrare e ottimizzare i balconi nel ruolo di elementi schermanti.

Sommario:

- Il design dei parapetti e dei soffitti inclinati dei balconi sembra avere un modesto effetto, particolarmente ai **piani bassi** degli edifici, maggiormente esposti alla propagazione diretta del rumore.
- La combinazione di **geometria e materiali assorbenti** consente di migliorare le prestazioni dei balconi
- L'effetto schermante è **proporzionale** alla dimensione dei balconi, in particolare la profondità rispetto alla facciata
- L'efficacia dei trattamenti sembra diminuire all'aumentare dell'altezza dei ricevitori, ovvero **diminuisce con l'aumento della distanza dalla sorgente**.

3.5.3 Coperture

Le coperture sono particolarmente importanti nei fenomeni acustici urbani soprattutto in relazione alla trasmissione delle onde sonore fra canyon paralleli e altri ambienti schermati come ad esempio i cortili interni. Secondo Van Renterghem et al. [48] la forma dei tetti ha un impatto significativo sulla propagazione del rumore fra traffico sulle facciate schermate di un canyon parallelo non direttamente esposto, specialmente in quanto la geometria degli spigoli, l'inclinazione e la forma del tetto possono essere usati per mitigare i fenomeni di diffrazione responsabili della trasmissione del rumore verso ambienti schermati. Lo studio valuta infatti tramite simulazioni con metodo wave based, necessario per una corretta valutazione della diffrazione, diverse tipologie di coperture (a due falde, a falda singola, a padiglione, ecc) e l'impatto di parametri geometrici sui singoli come inclinazione delle falde e altezza. Vengono individuate alcune combinazioni più efficaci anche se, vista la specificità dei singoli casi legata alla combinazione con altri fattori legati al singolo contesto (come ad esempio i tetti circostanti), viene raccomandata una valutazione specifica delle singole situazioni.

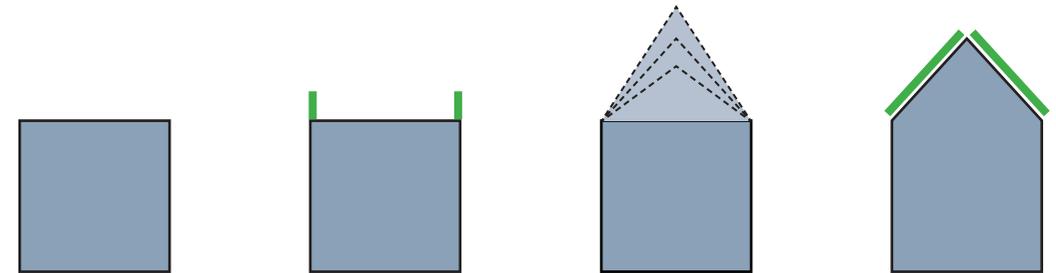


Immagine 3.5 schemi delle variabili riguardanti le coperture.

Sommario:

- La tipologia e la geometria delle coperture sembra avere un grande impatto sulla **trasmissione per diffrazione** fra canyon paralleli.
- I **tetti piatti** sembrano essere i **più efficaci** nel ridurre la trasmissione
- L'efficacia delle coperture a falde risulta **dipendente dal contesto** circostante
- L'uso di barriere verticali ai bordi del tetto o sul colmo riducono ulteriormente la trasmissione
- Anche in questo caso l'uso di **materiale assorbente** riduce notevolmente i livelli

3.5.4 Coperture e facciate verdi



a.



b.

Immagine 3.6 a. Un esempio di facciata vegetata a base geotessile, Madrid. b. Una facciata verde modulare, i contenitori per il substrato sono appesi alla facciata.

L'uso di vegetazione in ambito urbano non è certo una novità in ambito urbanistico e i suoi campi di impiego non si limitano all'acustica, è anzi una delle tecnologie più versatili in ambito di progettazione sostenibile degli spazi urbani, dal momento che presenta benefici sotto molti aspetti, come elemento isolante di involucro per l'ottimizzazione energetica di edifici, di mitigazione e gestione delle acque meteoriche, di filtrazione dell'aria, e infine come materiale per il trattamento acustico, tutto questo accompagnato da caratteristiche estetiche che generalmente migliorano la piacevolezza dell'ambiente.

Per quanto riguarda l'acustica l'uso di pareti e tetti verdi si può considerare una delle poche tecnologie disponibili per il trattamento acustico delle superfici esterne di edifici. Infatti la disponibilità di prodotti commerciali fonoassorbenti sviluppati per il rivestimento di facciate è estremamente limitata se non praticamente inesistente, a differenza dei materiali acustici per uso indoor che ormai offrono una ampia gamma di possibilità e caratteristiche ai progettisti. Un'altra opzione può essere l'utilizzo di rivestimenti perforati che agiscono come superfici semi trasparenti sopra uno strato di isolante in lana di roccia che ha caratteristiche fonoassorbenti, tuttavia un sistema simile presenta pre-

stazioni generalmente inferiori ai materiali sviluppati per l'isolamento interno e si tratterebbe in ogni caso di sistemi realizzati su misura e di conseguenza molto costosi.

Visto il potenziale di pareti e coperture verdi diversi studi hanno analizzato quello che potrebbe essere il loro utilizzo in ambito urbano.

Van Renterghem e Botteldooren [49] hanno studiato l'utilizzo di coperture vegetate per mitigare la trasmissione del rumore da traffico verso facciata schermate, nel caso di coperture piane su edifici a gradino e nel caso di falde inclinate per attutire la trasmissione fra canyon paralleli, dimostrando una buona efficacia dell'uso di coperture vegetate per attutire la propagazione, ottenendo una riduzione dei livelli di pressione. L'efficacia è direttamente legata in questi casi alla superficie del tetto verde e all'inclinazione delle facciate, e particolarmente più marcata alle alte frequenze.

In un altro articolo Van Renterghem et al. [50] hanno simulato diverse opzioni per l'utilizzo di vegetazione per la schermatura nel caso del cortile interno di un edificio affacciato su un canyon urbano. Sono state simulate molte opzioni tra cui la tipologia di tetto (piano, a falde, ecc) e diversi parametri geometrici relativi, diverse tipologie di tetto verde (intensivo ed estensivo), l'uso di facciate verdi nel cortile e nella via e anche l'applicazione di barriere acustiche sugli spigoli delle coperture. Dai risultati delle simulazioni risulta che l'utilizzo di tetti verdi sia una delle opzioni più efficaci per a schermatura del cortile, mentre l'uso di facciate verdi avrebbe un'efficacia inferiore, specialmente se usate per le facciate interne; inoltre la loro efficacia è fortemente influenzata dal tipo di materiali utilizzati per le altre superfici, ad esempio una facciata verde interna



a.



b.

Immagine 3.7

a. un esempio di tetto verde estensivo.
b. tetto verde / giardino estensivo.

al cortile diventa leggermente più efficace nel caso in cui le superfici del canyon sorgente sono di tipo riflettente.

In generale le combinazioni più efficaci sarebbero quelle che aumentano l'assorbimento delle superfici adiacenti agli spigoli del tetto, responsabili del fenomeno di diffrazione colpevole della propagazione delle onde sonore verso spazi schermati.

Nell'ultimo decennio sono stati pubblicati i risultati di una serie di ricerche mirate alla misurazione dei parametri acustici di tetti e pareti verdi in modo da avere dei dati di riferimento precisi per le diverse opzioni che un progettista può avere a sua disposizione. Esistono infatti numerose soluzioni tecnologiche diverse sia per quanto riguarda le coperture che le pareti verdi, che vengono distinte fra loro, con capacità fonoassorbenti diverse nei vari casi. Le diverse tipologie si differenziano in base al tipo di substrato che utilizzano, ovvero il materiale in cui è piantata e cresce la vegetazione.

Nel caso delle coperture la distinzione maggiore è tra sistemi intensivi e sistemi estensivi, i primi sono caratterizzati da un substrato di elevata profondità (>15cm), nella maggior parte dei casi costituito da suolo e consentono di utilizzare anche arbusti e piante a basso fusto di medie dimensioni, i secondi utilizzano invece un substrato molto più sottile (6-20cm) che può essere costituito da suolo o da altri materiali, di solito tappetini di materiale fibroso di origine naturale o sintetica (Immagine 3.8) [51, 52].



Immagine 3.8 Da sinistra a destra: sezioni di un tetto verde estensivo, semi-intensivo, intensivo. Si può notare la grande differenza in spessore dei diversi substrati e quantità di vegetazione sulla superficie [38].

Azkorra et al. [39] riportano che le strutture vegetate riducono i livelli di pressione sonora grazie a tre meccanismi distinti. Il primo consiste nella riflessione e diffusione del suono contro i vari elementi delle piante e della vegetazione (tronchi, rami, foglie...), il secondo consiste nell'assorbimento del suono da parte delle stesse piante, legato alle vibrazioni causate dalle onde sonore della vegetazione che quindi dissipa energia. Il terzo meccanismo è quello legato al

substrato e consiste di una componente di assorbimento da parte del suolo stesso e una componente legata all'effetto suono, ovvero l'interferenza distruttiva fra le onde che si propagano nello spazio e le onde rifratte dal terreno. Secondo Yang et al. [54] anche il più sottile strato di terreno garantisce un coefficiente di assorbimento significativo e l'aumento dello spessore del substrato garantisce solo un piccolo miglioramento del coefficiente. Un fattore invece determinante per la capacità fonoassorbente del substrato è la percentuale di umidità contenuta. La porosità del substrato è infatti ciò che determina le sue caratteristiche fonoassorbenti, e varia fra diverse tipologie di substrato. Ad esempio substrati più densi a base di argilla o calcare presentano coefficienti di assorbimento più bassi rispetto a terreni o materiali meno densi con una maggiore porosità. Per questo motivo la presenza di acqua nel terreno fa sì che i pori vengano saturati diminuendo le caratteristiche di attenuazione del substrato [55].

Per lo stesso principio la presenza di vegetazione aumenta invece le capacità assorbenti del substrato, in quanto la presenza di radici e di elementi organici nel terreno ne aumentano la porosità.

Per quanto riguarda la vegetazione secondo Horoshenkov et al. [56] i fattori più influenti nella determinazione del coefficiente di assorbimento delle piante sono la "leaf area density", che corrisponde alla superficie totale delle foglie per unità di volume e restituisce quindi una misura di quanto sono grandi e dense le foglie, e l'angolo di orientazione della foglia, definito come l'angolo caratteristico di ogni foglia rispetto al piano orizzontale. Rispetto al substrato la vegetazione risulta piuttosto efficace nell'assorbire le alte frequenze, tuttavia la presenza di piante in un substrato e le loro caratteristiche determinano, generalmente migliorandole, le proprietà di assorbimento alle basse frequenze del substrato.

Anche per quanto riguarda le pareti verdi si possono distinguere due principali sistemi costruttivi, quello basato sull'utilizzo di un feltro geotessile a cui si attaccano le radici delle piante senza ricorrere ad un substrato, e il sistema in cui vengono utilizzati contenitori che vengono ancorati alla parete, contenenti il substrato e le piante. Questa seconda tipologia è quella attualmente più diffusa e anche quella con più potenzialità per applicazioni acustiche. Infatti il substrato consente l'assorbimento delle frequenze più basse ed è complessivamente responsabile della maggior parte della capacità assorbente del sistema. Tuttavia secondo un articolo Azkorra et al. [39] a differenza di una copertura il substrato, trovandosi all'interno di un contenitore, ha una superficie esposta decisamente minore, motivo per cui le prestazioni di facciate e coperture devono essere valutate separatamente e non si possono considerare equivalenti. Lo studio ha confermato l'efficacia delle facciate vegetate che utilizzano moduli,

testando e misurando l'efficacia di diversi tipi di piante e substrati. La quantificazione esatta delle capacità di questi sistemi è tuttavia suscettibile ai metodi costruttivi, ai materiali e alle specie utilizzate nei singoli casi, inoltre influiscono anche le caratteristiche delle superfici e dei materiali dell'ambiente in cui viene inserita la facciata, richiedendo quindi un'attenta valutazione e progettazione dell'applicazione nei diversi casi specifici [57].

Sommario:

- L'impiego di soluzioni che usano della vegetazione è una delle poche soluzioni attualmente utilizzabili per il **fonoassorbimento in ambienti esterni**
- si tratta di soluzioni generalmente costose ed esigenti da un punto di vista della manutenzione
- L'efficacia di questi sistemi dipende dal contesto, dal **tipo di substrato** utilizzato, dal **tipo di piante** utilizzate e dalla quantità d'**acqua contenuta nel substrato**
- Le prestazioni variano nel tempo
- L'uso di tetti verdi sembra molto promettente per la riduzione di trasmissione da diffrazione
- Si tratta di sistemi particolarmente efficaci anche nella **mitigazione degli effetti dell'isola di calore urbano** e con numerosi benefici al di là delle proprietà acustiche

3.5.5 Barriere acustiche

L'applicazione di basse barriere acustiche a bordo strada per schermare i pedoni dal rumore del traffico è stata valutata in diversi studi. Van Renterghem et al. [58] hanno valutato l'efficacia di una serie di basse barriere vegetate per schermare i marciapiedi, sia con un modello wave based che con modello geometrico, riscontrando una buona efficacia delle barriere. La presenza della vegetazione e del suo substrato sembrano cruciali nel raggiungimento di certi livelli di prestazione. Il confronto fra i due metodi di simulazione ha mostrato che l'approccio bi-dimensionale è affidabile se si considerano i livelli medi per tutta la lunghezza della strada, tuttavia sovrastima l'effetto delle barriere nel caso in cui queste presentino delle aperture, inevitabili in un caso reale. Anche Sanchez et al. [31] hanno studiato diverse variazioni geometriche per delle barriere acustiche, valutando anche l'applicazione di una copertura di vegetazione per aumentarne l'assorbimento. Dai risultati si riscontra una buona efficacia per la protezione dei pedoni e dei primi piani delle facciate, specialmente quando le barriere sono inclinate, aiutando ad indirizzare le riflessioni verso l'alto, l'aggiunta di vegetazione sul lato della strada migliora ulteriormente le prestazioni delle barriere. Le simulazioni dello studio non considerano interruzioni nelle barriere e secondo quanto riportato dagli autori queste potrebbero compromettere l'efficacia delle barriere.

Sommario:

- Le barriere acustiche sono particolarmente efficaci nelle situazioni in cui serve **schermare una sorgente precisa**, come una strada o una ferrovia
- Funzionano bene per **schermare i pedoni** dal traffico, poco efficaci sulle facciate
- L'applicazione di **materiale assorbente** alle barriere è molto importante per aumentarne l'efficacia

Termica e isola di calore | **04**
urbana |

4.1 Termica degli ambienti urbani

Quando si parla di comfort in ambiente urbano l'ambito più importante per importanza e diffusione degli effetti è sicuramente quello termico, in quanto caratterizzante moltissimi aspetti che vanno dal benessere e comfort delle persone al consumo energetico e le prestazioni degli edifici.

Gli ambienti urbani sono infatti caratterizzati e affetti dal fenomeno climatico dell'isola di calore urbano (Urban Heat Island UHI), ormai ben documentato e ampiamente studiato che può tranquillamente essere definito come il più impattante sulle condizioni ambientali urbane. Questo consiste in un aumento delle temperature negli ambienti cittadini rispetto alle zone periferiche e rurali confinanti con la città, specialmente al di sotto dello strato limite corrispondente all'incirca all'altezza degli edifici. A causa del bilancio termico urbano positivo, causato dal maggior assorbimento di calore e radiazione solare, e il conseguente immagazzinamento di calore dovuto alla ridotta dispersione di calore legato alla grande inerzia termica che caratterizza gli ambienti fortemente antropizzati ed edificati, si crea un microclima che caratterizza "l'atmosfera" urbana delimitata dagli edifici e dalla loro altezza [62].

A questo si aggiungono poi ovviamente tutte quelle emissioni di calore legate alle diverse attività antropiche, molto più concentrate in città. Questo porta a temperature significativamente maggiori in città ed una maggior esposizione a fenomeni climatici estremi come le ondate di calore estive. Di conseguenza i periodi estivi corrispondono con l'aumento dei consumi energetici legati alla climatizzazione estiva degli edifici causando anche significativi blackout nei momenti di picco della richiesta che le reti elettriche non riescono a soddisfare. Inoltre l'utilizzo massiccio di climatizzazione negli edifici contribuisce a sua volta all'immissione di calore nell'ambiente esterno, creando un circolo vizioso che peggiora ulteriormente il fenomeno, andando a colpire le fasce di popolazione più povera che vivono in abitazioni non dotate di aria condizionata.

L'altra conseguenza principale dell'UHI è la deteriorazione del comfort termico, sia degli ambienti interni ma soprattutto degli ambienti esterni, portando città di alcune zone climatiche con climi caldi o tropicali con condizioni termiche estreme, i cui spazi aperti rasentano l'inabitabilità proprio nei periodi in cui un maggior numero di persone utilizza gli spazi all'aperto delle città. Inoltre l'aumento delle temperature provoca l'aumento di sostanze inquinanti nell'aria a cui vengono esposti gli abitanti.

Tutti questi fenomeni tra cui soprattutto l'esposizione estiva a temperature eccessive comportano gravi rischi per la salute umana e sono quindi legate ad un aumento dei tassi di mortalità fra la popolazione urbana nei periodi estivi. Secondo Santamouris et al. [62] alcuni studi hanno anche riscontrato effetti ne-

gativi del surriscaldamento del sottosuolo, dovuto all'accumulo di calore dagli ambienti urbani, anche sulla potabilità dell'acqua.

Come conseguenza del cambiamento climatico e della rapida urbanizzazione che si prevede nei prossimi decenni, soprattutto in paesi in via di sviluppo, le proporzioni di questo problema non possono che peggiorare insieme alla quantità di persone esposte agli effetti delle condizioni ambientali derivanti dal problema, ad esempio secondo Santamouris et al. [62] si prevede che "entro il 2050 il carico di climatizzazione necessario del settore commerciale e residenziale aumenti fino ad un massimo rispettivamente del 275% e del 750%".

Trattandosi di un fenomeno climatico di micro-scala i suoi effetti e le sue proporzioni possono essere controllate tramite il design dell'ambiente urbano, in quanto fortemente dipendenti dalle caratteristiche del contesto in cui si verifica, consentendo potenzialmente di disinnescare alcuni fenomeni di natura iterativa che lo caratterizzano come ad esempio quelli riguardanti l'uso massivo di climatizzazione.

In questo senso la letteratura scientifica identifica una serie di ambiti principali di intervento con lo scopo di mitigare o compensare gli effetti dell'isola di calore, a partire da quelli strettamente applicabili in fase di nuova progettazione fino a quelli utilizzabili come strategie di riparazione e mitigazione per ambienti urbani costruiti su cui non è possibile intervenire in maniera più profonda. Nello specifico si interviene principalmente sulla geometria urbana, sulla vegetazione degli spazi urbani (a partire da parchi urbani e viali alberati, la vegetazione per il trattamento del suolo, fino all'applicazione di vegetazione sugli edifici tramite facciate e coperture verdi), con l'utilizzo di dispositivi passivi e attivi per il rinfrescamento e il controllo dell'umidità relativa che utilizzano l'acqua (fontane, nebulizzatori, corpi d'acqua, ecc), ed infine l'utilizzo di materiali riflettenti, che sfruttano l'albedo per ridurre la quantità di radiazione solare assorbita dalle superfici [63].

4.2.1 Parametri descrittivi dell'ambiente termico urbano

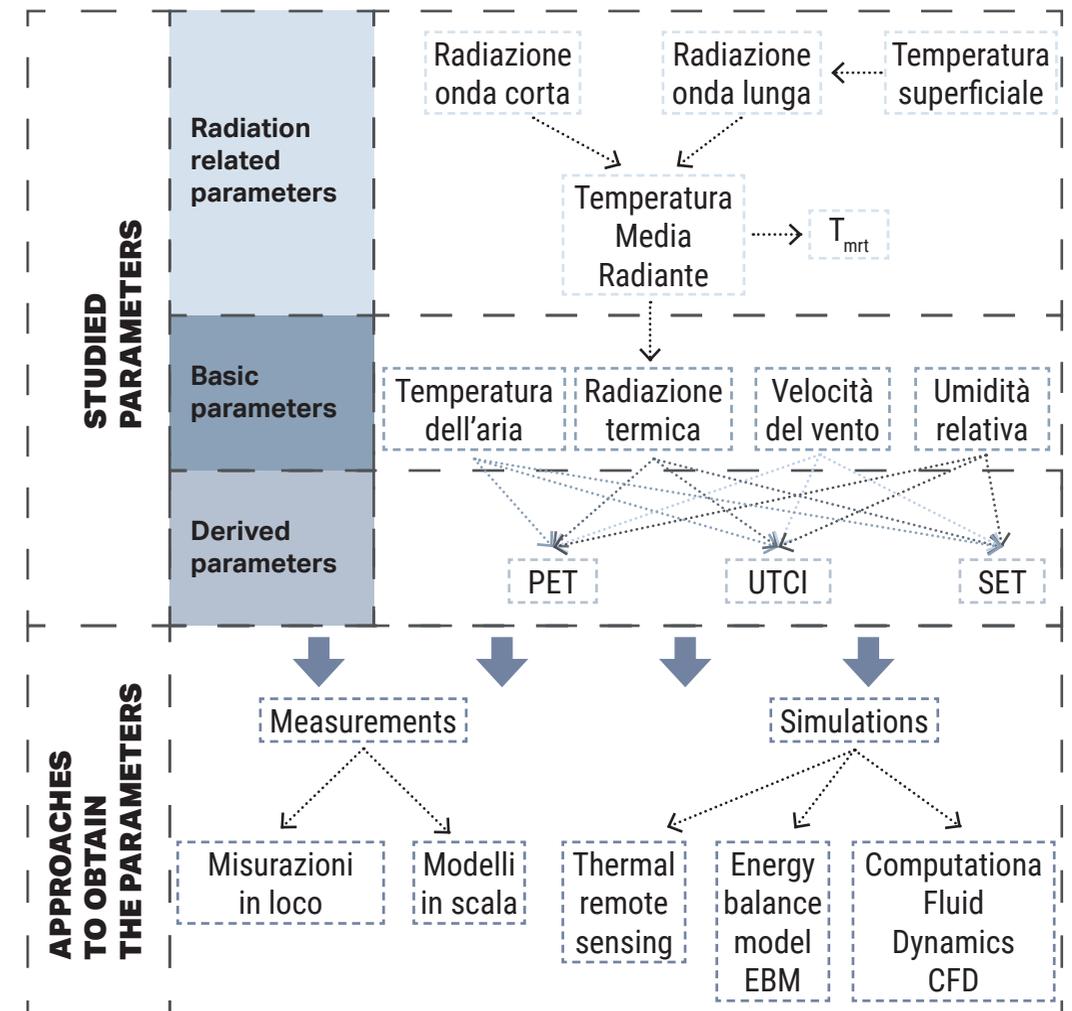


Immagine 4.1 Sommario dei parametri termici, schema da Lai et al. [63], traduzione dell'autore della tesi.

4.2.2 Parametri di comfort termico

PET

Temperatura fisiologica equivalente, temperatura percepita dall'uomo, è influenzata da diversi fattori come umidità relativa e velocità del vento.

È il parametro più diffuso negli studi sul comfort termico.

UTCI

Universal Thermal Climate Index, Indice universale termico, indice per la valutazione del comfort termico, considera temperatura, velocità del vento, radiazione solare diretta.

SET

Standard Effective Temperature, modello per la valutazione della percezione termica, considera oltre ai normali parametri ambientali personali per il vestiario e il tasso metabolico.

T_{mrt}

Mean Radiant Temperature, temperatura media radiante, misurata in funzione della temperatura e dell'emissività delle superfici "viste" dal punto di misura. In uno spazio urbano rappresenta la somma di radiazione ad onda lunga e radiazione ad onda corta a cui viene esposto un umano.

SVF

Sky View Factor, percentuale di volta celeste visibile da un punto su una superficie. È direttamente proporzionale alla quantità di radiazione solare diretta che raggiunge le superfici urbane ombreggiate).

ALBEDO

Percentuale di radiazione incidente su una superficie che viene riflessa, maggiore l'albedo, minore è la quantità di calore del materiale. Dipende fondamentalmente dal colore superficiale di un materiale.

Il comfort termico risponde alla definizione di "condizione mentale che esprime soddisfazione e benessere con l'ambiente termico" (Jamei et al. [64]) e viene determinato principalmente da tre fattori: una componente psicologica legata alla soddisfazione circa la condizione ambientale, una componente termofisiologica, ovvero la percezione che il corpo umano ha della temperatura ambientale esterna tramite il feedback fornito dai termorecettori presenti nella pelle e infine una componente legata allo scambio fisico di calore fra il corpo umano e l'ambiente circostante. Questo avviene tramite i fenomeni di convezione, radiazione ed evaporazione ed è legato sia a parametri specifici dell'individuo come abbigliamento e livello di attività fisica, sia alle caratteristiche termiche dell'ambiente in cui si trova, descritte dalla radiazione termica, dal livello di ventilazione espresso tramite la velocità del vento e infine dalla temperatura e dall'umidità relativa dell'aria (Immagine 4.1).

Di questi parametri, e conseguenti fenomeni fisici, la radiazione è la più difficile da caratterizzare in quanto composta dalla somma delle onde a radiazione lunga e da quelle a radiazione corta. Le prime sono quelle indirette irradiate dal cielo e dalle superfici dei solidi che radiano calore accumulato, ovvero gli edifici. Le radiazioni ad onda corta sono invece le radiazioni dirette, riflesse o diffuse che arrivano dal sole. La combinazione delle due in ambito urbano viene misurata tramite la temperatura media radiante. La temperatura media radiante o T_{mrt} viene definita come "la temperatura superficiale uniforme di uno spazio ideale dove il trasferimento netto di calore fra un corpo umano e lo spazio è uguale allo scambio di calore in un ambiente reale con temperature non uniformi".

Per quantificare l'effetto della combinazione di temperatura, umidità, radiazione e velocità del vento su un corpo umano si utilizzano delle temperature equivalenti, ovvero la temperatura di un ambiente standardizzato di riferimento che produce gli stessi effetti su una persona che si verificherebbero nell'ambiente reale. Le tre misure equivalenti più utilizzate sono la PET, temperatura fisiologica equivalente, è la misura più utilizzata nell'ambito del comfort termico, la UTCI ovvero l'indice termico universale del clima, che considera tutti e quattro i fattori determinanti, e la SET, temperatura effettiva standard. Queste unità di misura sono le grandezze generalmente utilizzate per la misurazione e la comparazione delle diverse strategie di mitigazione dell'UHI. [62, 63, 64]

4.3.1 Strategie di mitigazione per UHI: Geometria urbana

Anche per quanto riguarda le caratteristiche termiche degli ambienti urbani, come nel caso dell'acustica, le strutture dei canyon urbani sono uno degli elementi chiave che causano e influenzano diversi fenomeni climatici, di conseguenza andando ad agire su alcuni parametri progettuali è possibile mitigare o eliminare gli effetti negativi legati alla geometria degli edifici.

da un punto di vista geometrico ci sono alcuni parametri critici nella determinazione delle condizioni termiche. Il più importante è l'Aspect Ratio (AR) ovvero il rapporto fra altezza e larghezza del canyon. Parallelamente all'aspect ratio si utilizza il parametro SVF, ovvero Sky View Factor, per descrivere la geometria urbana, di solito per spazi con una struttura più irregolare e aperta dei canyon urbani come ad esempio una piazza. Lo Sky View Factor è un parametro adimensionale che esprime la percentuale di cielo libero visibile da un punto specifico su una superficie rispetto all'emisfera completa potenzialmente visibile. In ambito urbano alberi, edifici e altri ostacoli riducono la percentuale di cielo visibile.

In generale un valore più basso di SVF e quindi una porzione libera di cielo minore è associata ad una riduzione delle temperature diurne, in quanto con minore SVF si ha un minore irraggiamento del suolo e un maggior ombreggiamento che è preferibile per un maggior comfort termico nelle ore diurne in quanto riduce l'esposizione di pedoni e utenti degli spazi aperti.

Allo stesso tempo però nelle ore notturne, in cui la T_{mrt} è determinata esclusivamente dalle onde corte, un basso SVF causa un innalzamento delle temperature, in quanto riduce la ventilazione che consente di smaltire il calore immagazzinato durante il giorno, infatti lo Sky View Factor è anche uno dei parametri che più condizionano la velocità del vento che tende a diminuire insieme al SVF.

Queste conclusioni che potrebbero sembrare contrastanti servono ad evidenziare come la complessità del microclima urbano non possa essere descritta efficacemente da uno o pochi parametri ma necessiti una attenta analisi di insieme dei diversi contesti.

Per quanto riguarda l'aspect ratio valori più alti del parametro, corrispondenti a canyon più alti e stretti garantirebbero un maggior livello di comfort termico a livello pedonale nei periodi estivi, anche in questo caso grazie all'effetto di

schermatura dalla radiazione solare diretta. La geometria dei canyon inoltre influenza pesantemente le correnti e la velocità del vento, specialmente ad altezza pedonale dove i canyon più stretti tendono a intrappolare l'aria calda e ridurre la ventilazione. Infatti la distribuzione del vento all'interno di ambienti costruiti dipende fortemente dalla geometria dello spazio costruito che incanalando e influenza la ventilazione. Infatti il vento perde velocità quando incontra degli ostacoli che fa sì che la velocità del vento tenda a crescere con valori di SVF maggiori e quindi quando lo spazio è più aperto.

Grazie a questi meccanismi un tessuto urbano compatto con canyon alti e stretti tende a ridurre l'esposizione a radiazione diretta risultando quindi vantaggioso nei periodi estivi ma non in quelli invernali in cui si vuole aumentare gli apporti derivanti dalla radiazione solare e di conseguenza particolarmente consigliabile per zone con climi caldi e umidi che necessitano di forte mitigazione estiva ma senza presentare condizioni invernali estreme.

Un altro fattore fondamentale che influenza radiazione e velocità del vento è l'orientazione delle strade rispetto ai punti cardinali (ombreggiamento) e rispetto alle correnti dei venti prevalenti che ha una grandissima influenza sugli equilibri termici degli spazi urbani.

L'orientazione delle strade est-ovest è quella che presenta un periodo di esposizione a radiazione diretta maggiore e beneficia di un alto aspect ratio, che garantisce che almeno un lato della strada sia in ombra, nonché una parziale schermatura reciproca fra gli edifici, o da altri metodi di ombreggiamento come l'uso di vegetazione o di pergole. Nel caso di un'orientazione sull'asse nord-sud si riscontrano invece condizioni termiche estive migliori grazie ad una minore esposizione diretta. Per quanto concerne la radiazione solare l'orientazione diventa insignificante nel caso di strade con un AR superiore a 6, in cui l'altezza degli edifici è tale da schermare la strada a prescindere dalla direzione [63]. Nel caso di strade sugli assi "obliqui" intermedi (ne-so/no-se) si possono riscontrare caratteristiche "di compromesso" fra i due casi precedenti che possono risultare ottimali in climi temperati che richiedono un compromesso fra condizioni estive e invernali.

La direzione delle strade ha anche un pesante impatto sulla velocità del vento in base a quelle che sono le direzioni prevalenti del vento nei singoli contesti. Infatti se la strada è parallela o obliqua rispetto alla direzione del vento si registrano velocità superiori rispetto alle strade orientate perpendicolarmente alle correnti perché la strada agisce come un canyon naturale incanalando e accelerando il vento. Nel caso in cui la direzione della strada sia perpendicolare

si formano dei vortici d'aria che tendono a ricircolare limitando la velocità del vento. In questo caso la ventilazione nel canyon può essere migliorata aumentando lo spazio tra gli edifici consentendo ai flussi d'aria di ricircolare e "uscire" dal canyon al punto che non vengono osservate interferenze fra il vento superiore e gli edifici quando l'aspect ratio è maggiore di 0.05 [64].

Nel caso di strade oblique l'interazione fra le correnti e gli edifici all'inizio del canyon può generare dei vortici a spirale che risalgono lungo il canyon che possono risultare benefici o negativi per il microclima a livello pedonale in funzione delle condizioni precise dei singoli casi.

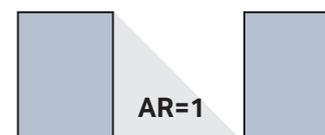
Bisogna sottolineare che tutti gli aspetti riguardanti la geometria urbana difficilmente presentano una singola soluzione generalmente vantaggiosa rispetto alle altre in quanto influiscono su molti aspetti, a volte in maniera contraddittoria, con effetti diversi a livelli di micro e macro scala ed è quindi necessaria una attenta analisi del contesto di intervento al fine di scegliere ed adattare queste linee guida di massima. Un esempio lampante è ad esempio il compromesso richiesto in molte zone climatiche fra le condizioni estive e invernali, che richiedono caratteristiche opposte e sono allo stesso modo responsabili di grosse conseguenze sul comfort urbano e sugli aspetti di consumo energetico degli edifici.

[62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 69,70]

GEOMETRIA URBANA

Aspect Ratio

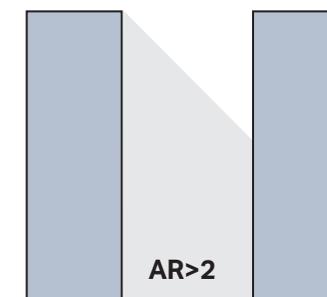
Aspect ratio:
rapporto fra l'altezza e la larghezza del canyon urbano.



Canyon uniforme.



Canyon poco profondo.



Canyon profondo.

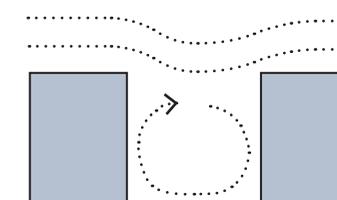
IMPATTI

Irraggiamento / SVF

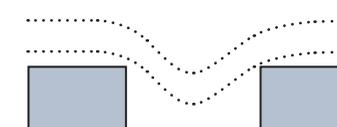
- Lo sky view factors diminuisce al crescere dell'aspect ratio, ovvero al crescere della profondità del canyon. In questo modo l'irraggiamento diretto viene drasticamente ridotto.
- Drastica riduzione PET nei canyon più profondi nelle ore diurne.
- Temperature notturne più elevate all'aumentare della profondità del canyon, a causa della minore ventilazione.
- Condizioni più svantaggiose per i climi invernali.

Velocità del vento

- L'aspect ratio ha un impatto significativo anche sulla ventilazione.
- Diversi effetti in funzione della direzione dei venti prevalenti rispetto alla geometria urbana.
- Il vento tende ad essere accelerato significativamente nei canyon profondi paralleli alla direzione del vento.
- La velocità del vento diminuisce con venti perpendicolari.
- La ridotta ventilazione può portare ad un aumento dell'umidità relativa.



Ventilazione ridotta, canyon profondo



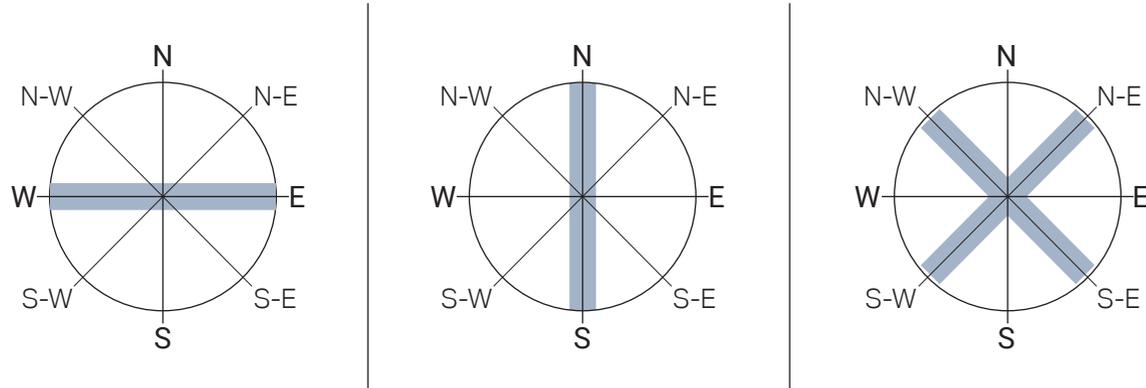
Ventilazione maggiore, canyon poco profondo

SOLUZIONI ARCHITETTONICHE

- Nei periodi estivi un aumento dell'aspect ratio garantisce una riduzione delle temperature a livello pedonale e della PET.
- È necessario valutare ogni intervento dopo accurate analisi del contesto dal quale dipendono fortemente gli effetti legati alle modifiche di questo parametro.
- Tra i possibili effetti negativi si sottolineano l'aumento delle temperature notturne, legate alla ridotta ventilazione, e il ridotto irraggiamento solare nei periodi invernali.
- Eventuali interventi dell'Aspect Ratio possono essere molto utili per controllare il microclima urbano se abbinate alla progettazione dell'orientazione delle strade in funzione del contesto. (presenza di corpi d'acqua, venti prevalenti, ecc)

GEOMETRIA URBANA

Orientazione strada



IMPATTI

E-W

Condizione termica estiva peggiore, a causa del maggior numero di ore con insolazione diretta all'interno del canyon urbano. Condizione invernale migliore.

N-S

Condizione termica estiva migliore, garantisce il maggior numero di ore in ombra possibile. Condizioni invernali sfavorevoli.

NE-SW NW-SE

Ottima condizione per climi temperati in cui è necessario bilanciare le condizioni estive e invernali. Consente nei periodi di estivi di avere almeno un lato della strada in ombra nelle ore di picco termico.

.....> **NOTA:** alcuni studi evidenziano come l'effetto dell'orientazione della strada sia particolarmente notevole nei canyon urbani più stretti e alti. In canyon bassi e molto larghi si arriva quasi ad avere condizioni paragonabili fra strade N-S e E-W.

SOLUZIONI ARCHITETTONICHE

E-W

- Viste le cattive condizioni estive si può compensare l'orientazione con un aspect ratio maggiore.
- Sono opportune misure di ombreggiamento come l'utilizzo di vegetazione o di tettoie, pergole, gallerie.

N-S

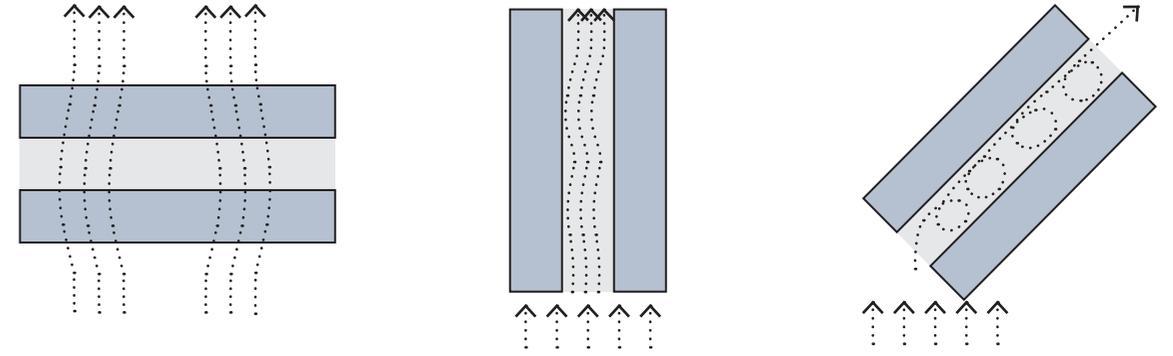
- Generalmente è sconsigliato l'utilizzo di alberi in canion stretti per evitare limitazioni eccessive alla ventilazione.
- Orientazione da preferirsi in climi caldi e umidi.

NE-SW / NW-SE

- Orientazione che può essere un buon compromesso in climi in cui è necessario bilanciare le condizioni estive e invernali.

GEOMETRIA URBANA

Direzione del vento



IMPATTI

Normale

Se la direzione del vento è perpendicolare al canyon non si verificano interazioni quando $AR > 0,05$.

Parallelo

Quando la direzione del canyon è parallela a quella del vento si ottiene un flusso d'aria regolare che garantisce una buona ventilazione e migliora il comfort termico estivo. Tuttavia in canyon molto profondi si può verificare un'eccessiva velocità dell'aria, che in climi temperati causa discomfort d'inverno.

Obliquo

Quando il vento è obliquo rispetto all'asse del canyon si verificano moti turbolenti d'aria. In base all'angolo possono essere svantaggiosi o vantaggiosi per la ventilazione. In climi caldi e asciutti si è identificata l'inclinazione ideale attorno a 45° .

SOLUZIONI ARCHITETTONICHE

- Nel caso di canyon perpendicolari alla direzione dei venti prevalenti estivi può essere conveniente allargare la strada per consentire una maggiore ventilazione.
- Se si vuole mantenere una velocità del vento più alta si consiglia di non superare i 30° di inclinazione rispetto alla direzione del vento nelle città ad alta densità.
- Nel caso voglia rallentare la velocità del vento, specialmente nel caso di canyon paralleli alla direzione del vento si può aumentare l'attrito dell'aria attraverso l'uso di vegetazione.

4.3.2 Vegetazione urbana

La vegetazione è una soluzione naturale che può apportare grandi benefici sia in termini di comfort termico urbano, sia da un punto di vista di piacevolezza estetica e di vivibilità degli spazi. Per quanto riguarda gli impatti sul clima urbano l'utilizzo di vegetazione può influire schermando dal sole e dal vento e agendo sulla temperatura dell'aria e sull'umidità relativa. Inoltre contribuiscono alla riduzione dell'inquinamento dell'aria.

Le tipologie di vegetazione utilizzata in città sono essenzialmente alberi, nelle strade e negli spazi pubblici, i parchi particolarmente influenti ad un livello di macro-scala, la vegetazione applicata agli edifici tramite coperture e facciate verdi, e infine l'inverdimento del suolo tramite manti erbosi.

Gli alberi riducono la temperatura ambientale grazie diversi meccanismi. Innanzitutto forniscono schermatura dai raggi solari svolgendo un'azione di ombreggiamento che riduce lo Sky View Factor e di conseguenza l'apporto termico relativo alla radiazione corta. Di conseguenza anche la temperatura media radiante del suolo al di sotto degli alberi diminuisce. L'efficacia di questo principio dipende da diversi fattori come l'altezza e la disposizione degli alberi nell'ambiente. Dipende inoltre dal LAI o Leaf Area Index, misura del rapporto fra l'area delle foglie e l'area dell'ombra proiettata al suolo, quantificando la capacità di un albero di bloccare la radiazione corta e fornendo un metro di paragone per confrontare diverse specie; essenzialmente un valore più alto del LAI corrisponde ad una chioma più densa e fitta di foglie.

Un altro fattore che influisce sull'efficacia degli alberi è la forma della loro chioma, questa viene classificata in categorie che dipendono dalla loro forma e sono rispettivamente cilindro, sfera e cono. Tra queste la più efficace in termini di ombreggiamento è la chioma cilindrica, che rispetto a alle altre forme di uguale altezza e diametro scherma un superficie maggiore.

In secondo luogo gli alberi, e anche la vegetazione più in generale riducono l'apporto di calore legato alla radiazione lunga, sia grazie alla riduzione della temperatura del suolo legata all'ombreggiamento degli alberi, sia, nel caso di vegetazione applicata a superfici, grazie all'evotraspirazione che abbassa la temperatura superficiale riducendo quindi la quantità di onde lunghe irradiate dalle superfici. Infatti nel processo di evotraspirazione, in cui l'acqua viene rilasciata dalle foglie sotto forma di vapore, e nel processo di fotosintesi la vegetazione assorbe calore dall'ambiente circostante che viene utilizzato nei due processi chimici. Allo stesso tempo questo comporta un aumento dell'u-

midità relativa nell'aria, fattore da considerare nella valutazione delle condizioni termiche di uno spazio.

Questo processo riguarda sia gli alberi stessi (che a loro volta in quanto irradiati accumulano calore) ma è soprattutto efficace su superfici come prati o tetti e facciate verdi.

Oltre al calore solare gli alberi fungono da schermi anche nei confronti del vento. Infatti gli alberi conferiscono una maggiore "ruvidezza" agli spazi urbani rallentando la velocità del vento grazie al maggiore attrito. Allo stesso tempo però grazie alla loro natura "permeabile", a differenza degli edifici, non creano un delta di pressione elevato fra il lato sopra vento e quello sotto vento, evitando quindi di creare dei bruschi cambi di velocità delle correnti d'aria che nel caso degli edifici accelerano a contatto con gli spigoli. Questo fa sì che i cambi di velocità siano gradualmente e rende gli alberi un utile strumento di controllo delle correnti negli ambienti urbani.

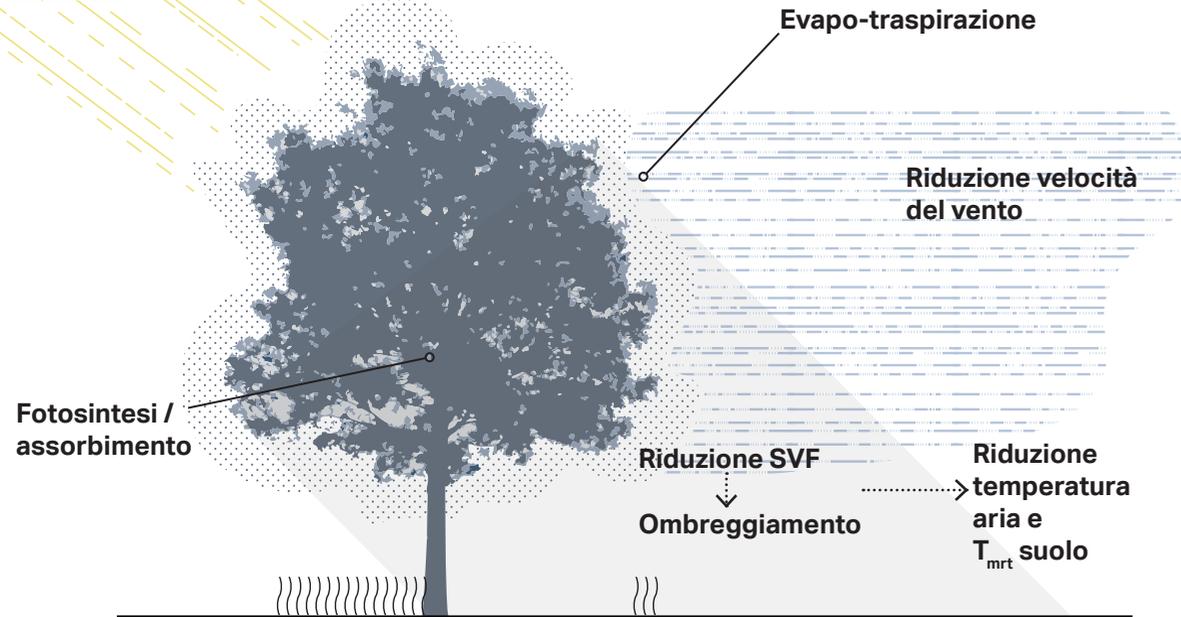
L'ambiente circostante agli alberi ne condiziona gli effetti, ad esempio secondo Jamei et al. [50] l'effetto di alberi posizionati nella strada si avverte di più in canyon urbani poco profondi in quanto nel caso di edifici alti il loro effetto schermante è mascherato da quello degli edifici, inoltre la riduzione della velocità del vento può avere effetti negativi in canyon profondi in cui la ventilazione è svantaggiata.

Allo stesso modo l'utilizzo di tetti verdi perde di efficacia sul comfort pedonale nel caso in cui gli edifici siano molto alti e risulta comunque meno efficace di alberi e facciate verdi per quanto riguarda il comfort termico dei pedoni.

In definitiva sebbene gli alberi riducano la ventilazione forniscono comunque un significativo miglioramento del comfort termico urbano. Affinché si possano raggiungere i migliori risultati è quindi necessario considerare tutti i fattori che influenzano l'efficacia come il rapporto e la distanza con gli edifici del contesto, la direzione degli assi delle strade, le condizioni naturali come suolo e velocità del vento, per non incorrere in potenziali effetti controproducenti. [62, 63, 64, 67, 71, 72, 73, 74, 77]

VEGETAZIONE

Alberi



IMPATTI

Riduzione Sky View Factor

La presenza di alberi comporta la riduzione dello Sky View Factor e di conseguenza la riduzione di radiazione a onda corta (radiazione diretta). Questo è il meccanismo di controllo termico più efficace legato agli alberi. L'efficacia di questo meccanismo è legata al valore del LAI, Leaf Area Index, l'indice di rapporto fra l'area delle foglie rispetto all'area del suolo coperto, indica la capacità di bloccare la radiazione solare dell'albero. L'indice cresce al crescere della densità del fogliame, ma dipende anche da forma e taglia delle foglie, dalla disposizione dei rami e dalla forma della chioma dell'albero adulto.

Assorbimento radiazione diretta

Una parte della radiazione solare incidente viene assorbita dalla massa dell'albero e dai processi di fotosintesi, contribuendo a ridurre la temperatura dell'aria nell'ambiente circostante.

Velocità del vento

Gli alberi e la vegetazione contribuiscono a ridurre la velocità del vento e a modificarne i flussi. Anche gli edifici impattano sul vento ma possono causare turbolenze, differenze di pressione elevate fra il lato sopravvento e quello sottovento e flussi accelerati attorno agli spigoli e ai tetti. Tutti questi fenomeni possono portare a situazioni di discomfort ambientale. Gli alberi invece grazie alla loro natura porosa crano differenziali di pressione ridotti, evitando quindi turbolenze indesiderate e riducendo allo stesso tempo la velocità del vento meno bruscamente. Tuttavia il rapporto fra vento e vegetazione deve essere progettato con attenzione per evitare una riduzione eccessiva della ventilazione naturale.

Evapo-traspirazione

È il processo per cui parte dell'acqua assorbita dal terreno dall'albero evapora nell'ambiente. Il processo di evaporazione sottrae calore all'ambiente e aumenta l'umidità relativa, contribuendo all'abbassamento della temperatura dell'aria.

Questo processo dipende da fattori come la tipologia e la dimensione degli alberi, l'umidità presente nel terreno (naturale e da irrigazione), l'umidità relativa e le caratteristiche climatiche dell'ambiente.

Riduzione T_{mrt} del suolo.

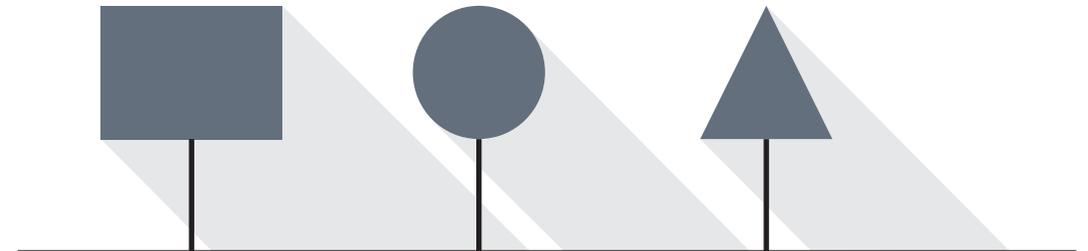
Grazie alla schermatura e alla riduzione della temperatura dell'aria anche la T_{mrt} e la temperatura superficiale del suolo diminuiscono, riducendo quindi la quantità di radiazioni ad onda lunga emesse dal suolo caldo.

VEGETAZIONE

Alberi

INDICAZIONI ARCHITETTONICHE

- LAI elevato, maggiore densità garantisce maggiore schermatura e evapo-traspirazione.
- Utilizzo degli alberi in combinazione con altre forme di vegetazione, ad esempio l'effetto di alberi e pavimentazione erbosa è molto maggiore di alberi con pavimentazione in cemento.
- L'uso di alberi è particolarmente indicato in strade con orientazione est-ovest.
- L'efficacia degli alberi è generalmente più apprezzabile in canyon bassi, dove la ventilazione non è troppo ostacolata e l'ombreggiamento non è garantito dagli edifici.
- Utilizzo di specie locali.
- Irrigazione adeguata.
- Le chiome con forma cilindrica sono quelle che garantiscono la schermatura maggiore.



Le chiome vengono classificate in cilindriche, sferiche, coniche.

Coperture / pareti verdi



IMPATTI

- Riducono sensibilmente la temperatura superficiale, riducendo di conseguenza la radiazione riflessa dagli edifici e la t_{mrt} .
- Le pareti hanno un effetto maggiore su comfort pedonale, i tetti verdi diventano ininfluenti a livello della strada se gli edifici sono molto alti (>10m)
- I tetti intensivi (substrato spesso, con terreno, piante di grandi dimensioni) hanno un'efficacia maggiore rispetto ai sistemi estensivi (substrato leggero, erba e piante radenti)
- Come per ogni tipo di vegetazione, l'effetto sul clima è influenzato dall'umidità presente nel terreno e di conseguenza dall'irrigazione.

4.3.3 Materiali riflettenti

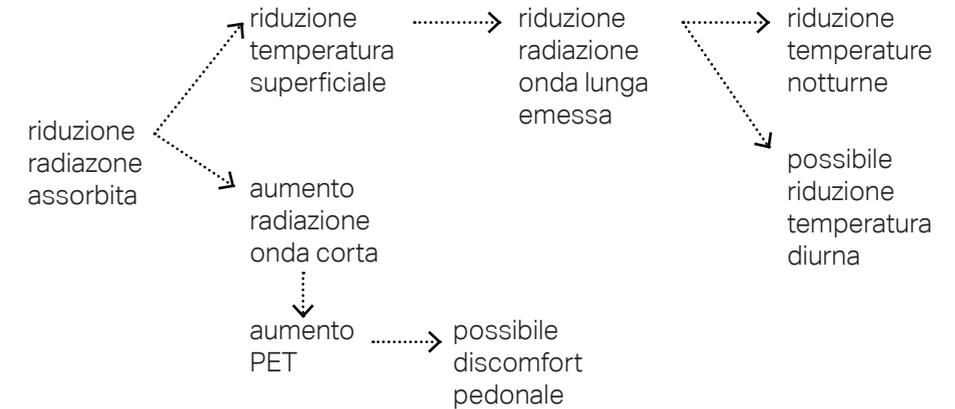
Il fenomeno dell'isola di calore è legato al maggiore assorbimento di calore da parte delle superfici costruite anche grazie al loro albedo molto basso. L'albedo è la frazione di radiazione che viene riflessa da una superficie, un valore basso di riflessione comporta una maggior porzione di energia che viene assorbita. Per cercare di mitigare l'assorbimento di calore da parte degli edifici e delle superfici urbane si possono applicare alle superfici materiali riflettenti, con alti valori di albedo che possono quindi andare ad agire sulla radiazione termica e sulla temperatura dell'aria.

Dal momento che il materiale assorbe meno radiazioni a onde corte la sua temperatura superficiale risulta inferiore di quella di materiali normali, emettendo quindi una minor quantità di radiazioni a onda lunga. Questo fenomeno da solo consentirebbe di ridurre le temperature, soprattutto notturne, tuttavia diversi studi [63, 64, 76] hanno mostrato come l'uso di materiali riflettenti comporti allo stesso tempo un aumento della quantità di onde corte riflesse dalla superficie che possono quindi causare una diminuzione del comfort termico pedonale aumentando l'esposizione dei pedoni ad irraggiamento diretto. Secondo Chzidimitriou et al. [78] l'utilizzo di superfici con alto valore di albedo comporta una temperatura superficiale più bassa rispetto a materiali normali, ma una temperatura media radiante al di sopra del materiale maggiore rispetto al caso standard.

In definitiva gli effetti di specifiche applicazioni sono ancora poco chiari anche a causa di pochi studi sugli effetti percettivi di questi materiali. In ogni caso presentano un grande potenziale e hanno sicuramente il loro posto in determinate situazioni. Un esempio è lo studio di Rosso et al. [76] che ha analizzato l'uso di materiali riflettenti in un contesto storico dove difficilmente sarebbero consentiti altri approcci architettonici, mentre l'uso di intonaci trattati con pigmenti che riflettono la radiazione infrarossa consente un intervento che non altera l'aspetto estetico dell'ambiente urbano.

[75, 62, 63, 76]

Materiali riflettenti



IMPATTI

Albedo

I materiali riflettenti sono caratterizzati da valori di albedo più alti, che fa sì che:

- assorbano meno radiazione incidente e di conseguenza abbiano una temperatura più bassa.
- Questo fa sì che a loro volta emettano meno calore (riduzione radiazione onda lunga). Questo comporta un sensibile abbassamento delle temperature notturne.
- Il calore riflesso dalla superficie però comporta un aumento dell'irraggiamento diretto sui pedoni, (aumento radiazione onda corta) rischiando di causare un innalzamento della PET e di conseguenza un peggioramento delle condizioni di comfort termico.

Spettri riflessi

Un materiale può riflettere diversi spettri della radiazione solare incidente:

- VIS spettro della luce visibile (riflessa dai materiali di colore chiaro)
- NIR spettro vicino a cavallo dello spettro infrarosso (Near InfraRed)
- IR radiazione infrarossa
- UV radiazione ultravioletta

Sebbene invisibili NIR, IR e UV compongono la maggior parte della radiazione solare, di conseguenza la capacità di riflettere questi particolari spettri determina l'efficacia di un materiale riflettente.

INDICAZIONI ARCHITETTONICHE

- Maggiore il valore dell'albedo, maggiore la riflessione del materiale.
- Sconsigliato l'uso di materiali riflettenti in ambienti con basso SVF (urban canyon), dove il rischio di discomfort pedonale è alto, mentre si riscontra una maggiore efficacia sul comfort pedonale in ampi spazi aperti.
- Visto il rischio di discomfort pedonale l'uso di materiali riflettenti in spazi ad alto traffico pedonale deve essere valutato attentamente, soprattutto se in presenza di altri meccanismi di mitigazione che potrebbero ridurre l'effetto benefico dei materiali riflettenti o invece mitigarne gli effetti collaterali.
- L'impiego di superfici riflettenti può essere molto vantaggioso per interventi in luoghi storici dove difficilmente sono consentiti altri tipi di intervento. Nello specifico sembra molto promettente l'impiego di materiali trattati per la riflessione dello spettro infrarosso, che consentono di slegarsi dai colori chiari generalmente legati ai materiali con alti valori di albedo, spesso difficilmente utilizzabili in ambienti storici.
- In generale vista l'assenza di un'ampia letteratura di misurazioni sperimentali, è difficile fornire indicazioni esatte per l'uso di materiali riflettenti. Per questi motivi è necessaria un'attenta considerazione di tutte le variabili e dell'esatto contesto in fase progettuale.

4.3.4 Corpi d'acqua

L'acqua ha una capacità termica molto elevata, circa quattro volte quella del calcestruzzo, questo significa che può assorbire molto più calore dei materiali da costruzione generalmente presenti in ambienti urbani (fino a 25K più bassa) [64] e di conseguenza a parità di massa deve assorbire molto più calore per aumentare della stessa quantità la sua temperatura. Grazie a questa caratteristica la temperatura superficiale dei corpi d'acqua è molto più bassa di quella dell'ambiente circostante. Questo fa sì che una massa d'acqua assorba calore dall'ambiente circostante fungendo di fatto da radiatore. Inoltre la temperatura superficiale più bassa comporta anche una minor radiazione di onde lunghe ovvero un minor rilascio di calore nell'ambiente.

L'altro meccanismo che assorbe calore dall'ambiente è quello dell'evaporazione, che assorbe calore dall'ambiente per attuare il passaggio di stato dell'acqua da liquido ad aeriforme, andando ad impattare quindi sulla temperatura dell'aria e sull'umidità relativa di un ambiente.

Nell'ambito del controllo delle condizioni termiche di un ambiente urbano le capacità dell'acqua consentono l'utilizzo di diversi approcci e tecnologie di mitigazione delle temperature che possono essere suddivisi in due categorie distinte: i corpi d'acqua, sia naturali che artificiali e di diverse dimensioni, e i sistemi di raffrescamento evaporativi come fontane, torri di evaporazione e sistemi di nebulizzazione.

I corpi d'acqua uniscono i benefici dell'effetto radiatore e dell'evaporazione possono essere usati per creare delle "isole fredde", ovvero micro-climi che subiscono l'influenza di un corpo d'acqua all'interno del tessuto urbano. La riduzione delle temperature in questi ambienti può essere significativa ed è funzione di diversi aspetti come la dimensione dei corpi d'acqua, la loro posizione rispetto alla città e agli edifici anche in relazione alle direzioni del vento e le caratteristiche geometriche e/o geografiche del contesto. Infatti i processi convettivi, ovvero di scambio di calore alla superficie dell'acqua sono legati al delta di temperatura fra aria e acqua e al livello di ventilazione dell'ambiente. Infatti generalmente l'effetto rinfrescante è maggiore nelle zone posizionate sottovento rispetto ad un corpo d'acqua, questo perché il vento trasporta aria che è stata raffreddata per convezione con la superficie dell'acqua.

Questo tipo di soluzione copre svariate scale di intervento, dalle piscine e corsi d'acqua artificiali di piccole dimensioni all'interno di spazi urbani o addirittura di edifici, fino allo sfruttamento, casuale o intenzionale, dei micro climi generati

da grandi corpi d'acqua naturali situati vicino alle città come ad esempio laghi o fiumi.

L'altra grande categoria di sistemi di mitigazione è quella dei sistemi evaporativi che sfruttano l'evaporazione dell'acqua per rinfrescare l'aria di un ambiente. Anche in questo caso l'efficacia dei sistemi di evaporazione è legata a fattori esterni come geometria dell'ambiente, umidità e temperatura e velocità del vento. Tra questi quello più importante è l'umidità relativa dell'ambiente che si vuole rinfrescare in quanto determina la quantità di vapore che è fisicamente possibile generare. Inoltre valori troppo alti di umidità nell'aria hanno un pessimo effetto sul comfort termico in quanto deteriorano la percezione del calore da parte delle persone dal momento che compromettono l'efficacia della sudorazione che, essendo a sua volta un meccanismo biologico di rinfrescamento tramite evaporazione, ha un ruolo fondamentale nella termoregolazione del corpo umano.

Anche nel caso dei sistemi evaporativi, soprattutto se non incorporano sistemi di ventilazione, il posizionamento ideale è sopravento rispetto all'ambiente da rinfrescare.

Uno dei sistemi più antichi sono le fontane la cui efficacia in un contesto urbano dipende essenzialmente dalla tipologia di fontana e da quanto questa svolga un'azione nebulizzante dell'acqua. Infatti il potenziale di evaporazione dipende dalle dimensioni delle gocce d'acqua in aria in quanto un maggior numero di gocce molto piccole corrisponde a una maggior superficie libera, che comporta una maggior quantità d'acqua evaporata.

Questo principio è alla base del funzionamento dei sistemi di nebulizzazione che spruzzano nell'aria goccioline piccolissime d'acqua che evaporano quasi immediatamente a contatto con l'aria e la loro efficacia dipende direttamente dalla dimensione delle gocce che vengono nebulizzate. Sono sistemi abbastanza efficaci per il raffrescamento estivo di spazi all'aperto di dimensioni contenute.

Un altro sistema di dimensione ed effetto maggiore è quello delle torri del vento, strutture a torre che sfruttano l'effetto camino per generare una corrente d'aria al loro interno, questa viene raffreddata spruzzando dell'acqua nebulizzata tramite un sistema di nebulizzatori posizionati all'interno del camino. In questo modo l'aria più raffreddata tende a salire verso l'alto creando una corrente che aspira altra aria calda dal basso.

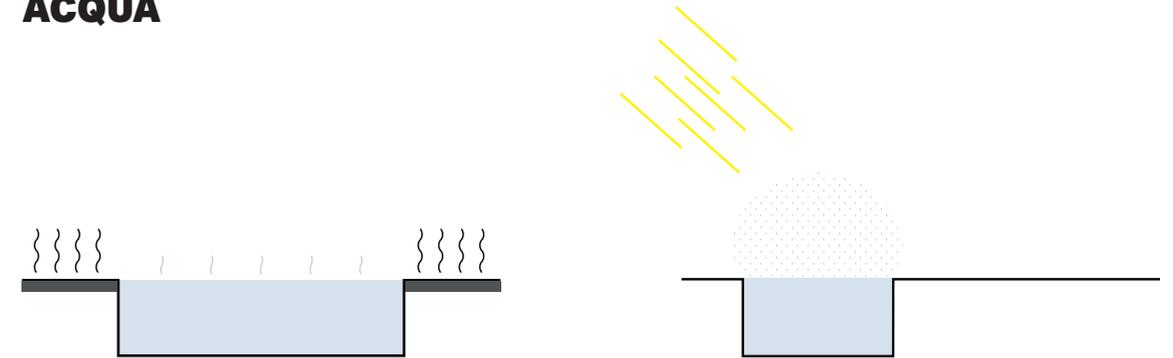
Questo sistema consente di raffreddare grandi volumi d'aria e può anche essere combinato con sistemi di ventilazione meccanica, inoltre crea correnti d'aria

attorno a se grazie all'aria che aspira al suo interno grazie all'effetto camino e grazie ai vortici convoluti generati dall'aria fredda in uscita.

Rispetto ad altre strategie di mitigazione dell'isola di calore urbano l'utilizzo di corpi d'acqua e sistemi evaporativi ha sicuramente un potenziale di miglioramento del comfort inferiore, soprattutto rispetto a quelle strategie che forniscono ombreggiamento, dal momento che risulta molto più efficace anche da un punto di vista percettivo, migliorando la condizione di comfort termico; inoltre richiedono un'attenta valutazione dell'ambiente in cui si vogliono usare dal momento che un aumento eccessivo di umidità relativa può essere controproducente. Nonostante ciò nelle condizioni adeguate hanno un grande potenziale di riduzione delle temperature e sono quindi una risorsa importante nelle mani dei progettisti, vista anche l'ampia gamma di applicazioni possibili, anche in situazioni in cui interventi più profondi ad esempio su geometria urbana e vegetazione non sono possibili.

[62, 63]

ACQUA



IMPATTI

Convezione

La capacità termica elevata dell'acqua (4200J/kg/K) comporta, a parità di radiazione assorbita e di massa, una temperatura più bassa dei materiali da costruzione. In questo modo le masse d'acqua fungono da radiatori.



Di conseguenza anche la T_{mrt} è più bassa e comporta un'emissione minore di radiazione ad onda lunga.

Parametri

L'effetto di una massa d'acqua sul clima dipende da:

- Superficie del corpo d'acqua. Maggiore la superficie, maggiore la dissipazione.
- Geometria
- Posizione rispetto al contesto (edifici, spazi urbani, caratteristiche geografiche)
- Direzione dei venti prevalenti rispetto all'acqua. Le zone sottovento beneficiano maggiormente del raffrescamento, sia per i fenomeni di evaporazione che di convezione.

Umidità ed evaporazione

L'evaporazione dell'acqua assorbe calore durante il cambiamento di stato e aumenta l'umidità relativa nell'aria, questo può contribuire a ridurre la temperatura dell'aria e migliorare il comfort termico ambientale.



Meccanismo alla base di tutti i sistemi di mitigazione evaporativi attivi e passivi, come torri di evaporazione, nebulizzatori, ecc.

Parametri

L'effetto dell'evaporazione sul clima dipende da:

- Temperatura dell'aria
- Umidità relativa
- Velocità del vento
- direzione del vento rispetto al sistema evaporativo e agli utenti che ne beneficiano.

INDICAZIONI ARCHITETTONICHE

- L'utilizzo dell'acqua per la mitigazione del fenomeno dell'isola di calore urbana deve essere attentamente valutato in ogni contesto. Infatti in base alle condizioni climatiche del luogo l'aumento eccessivo dell'umidità relativa può causare effetti negativi sul comfort termico.
- Si consiglia l'utilizzo dell'acqua specialmente nei climi aridi e asciutti, in cui si ottiene il massimo vantaggio dall'evaporazione senza un aumento eccessivo dell'umidità relativa.
- Va considerato anche l'effetto sul clima nel periodo invernale, in quanto potrebbe causare condizioni di discomfort.
- In relazione alla direzione del vento i sistemi ad acqua e i corpi d'acqua sono più efficaci quando si trovano sopravvento rispetto alla zona che si vuole raffrescare, e con un'orientazione parallela alla direzione prevalente del vento.
- Si stima che gli effetti di un corpo d'acqua siano massimi entro una distanza di 20m. (Xu et al. 2010)
- Fontane e altri sistemi ad acqua corrente possono essere anche usati per interventi di soundscape design.

4.4 Gerarchia ed efficacia degli ambiti di intervento

Tutte queste strategie sono fortemente influenzate dalle caratteristiche climatiche del contesto in cui si trovano portando a grosse differenze fra luoghi diversi o anche solo fra diverse giornate e periodi dell'anno in cui le condizioni meteo cambiano. Ad esempio in contesti urbani con una geometria molto compatta l'utilizzo di vegetazione, acqua e materiali riflettenti garantisce vantaggi ridotti rispetto all'utilizzo in spazi più ampi e aperti, così come cambiano gli effetti fra giornate soleggiate e nuvolose a causa degli effetti sui diversi sistemi di una diversa esposizione alla radiazione solare.

Secondo un'ampia review di Lai et al. [63], che ha confrontato una grande quantità di studi e simulazioni sulle diverse strategie di mitigazione dell'UHI, si può delineare una chiara gerarchia nell'efficacia potenziale delle diverse strategie (Immagine 4.2; Immagine 4.3). Risulterebbe infatti che gli interventi sulla geometria urbana siano quelli che garantiscono un maggiore impatto sui diversi indici considerati per il comfort termico. Le differenze sono soprattutto osservabili nelle misure della PET (Immagine 4.3), in cui le differenze fra le diverse strategie sono molto maggiori rispetto a quelle fra la misura della temperatura dell'aria. Subito dopo si posizionerebbe l'utilizzo di vegetazione e soprattutto di alberi, seguito dall'uso di corpi d'acqua e sistemi evaporativi ed infine all'ultimo posto i materiali riflettenti. Da questo paragone risulterebbe quindi evidente come la schermatura dalla radiazione diretta ad onda corta sia l'aspetto che garantisce un maggior miglioramento del comfort termico.

Bisogna inoltre considerare che l'utilizzo combinato di diverse strategie può consentire un risultato migliore rispetto all'approccio in ambiti isolati. Come riportato da Santamouris et al. [62] l'utilizzo di vegetazione, acqua e materiali con alto albedo contemporaneamente è un soluzione molto diffusa e migliorerebbe le prestazioni rispetto ad esempio all'applicazione dei soli materiali riflettenti. Inoltre la combinazione di più strategie garantisce maggiore flessibilità ai progettisti che operano in contesti reali con limitazioni che impedirebbero un approccio univoco e, se correttamente applicate, potrebbero contribuire a mitigare a vicenda i propri effetti collaterali. [62, 63, 64]

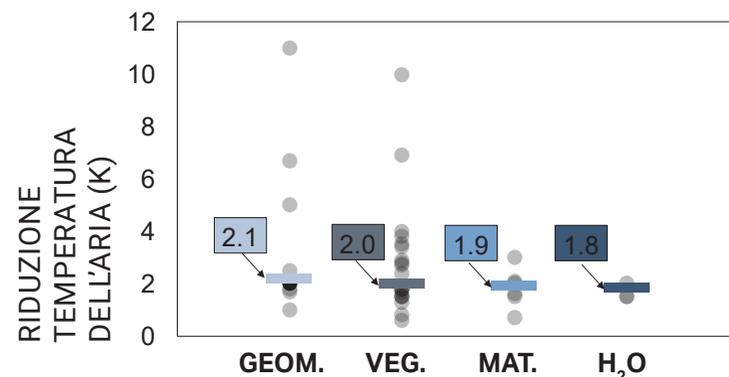


Immagine 4.2 Confronto dei dati di efficacia delle diverse soluzioni presenti in letteratura sulla riduzione della temperatura dell'aria. Grafico da Lai et al. rielaborazione grafica dell'autore della tesi [63].

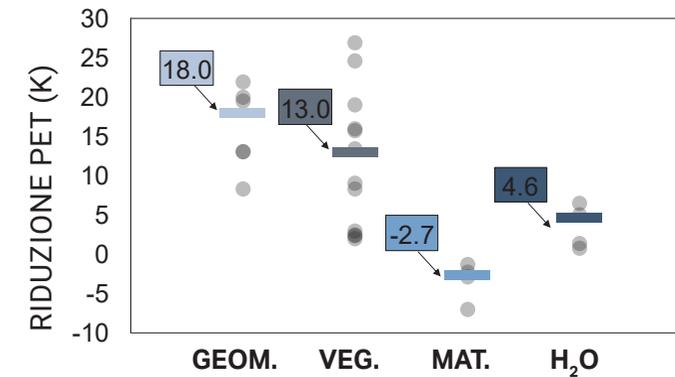


Immagine 4.3 Confronto dei dati di efficacia delle diverse soluzioni presenti in letteratura sulla riduzione della PET. Grafico da Lai et al. rielaborazione grafica dell'autore della tesi [49].

		SVANTAGGI
GEOMETRIA URBANA	Gli interventi sulla geometria sono quelli con il più grande potenziale di riduzione dell'irraggiamento diretto e di conseguenza di miglioramento del comfort termico urbano.	Per sua stessa natura la geometria della città è praticamente impossibile da modificare se non in nuovi progetti su grande scala.
VERDE URBANO	L'utilizzo di vegetazione è la soluzione migliore che non implichi per forza cambiamenti significativi all'assetto urbano. La vegetazione risulta inoltre molto versatile, con effetti positivi anche su altri aspetti ambientali.	Alberi e vegetazione richiedono manutenzione e irrigazione e sono quindi generalmente costosi.
ACQUA	Non fornendo schermatura l'acqua ha un'impatto minore sulle temperature rispetto ai sistemi che prevedono la modifica dello SVF.	L'efficacia di sistemi ad acqua dipende molto dalle condizioni climatiche e ambientali del contesto. Inoltre sono sistemi onerosi dal punto di vista della manutenzione.
MATERIALI RIFLETTENTI	Come l'acqua, non fornendo ombreggiamento i materiali riflessivi hanno un impatto basso sulle temperature urbane.	Possono ridurre il comfort termico pedonale e causare fenomeni di abbagliamento.

Indicazioni generali

-➔ **COMBINAZIONE STRATEGIE:** la combinazione di diverse strategie risulta essere sempre più efficace dell'utilizzo di una sola strategia. questo perchè diversi sistemi possono essere integrati per incrementare gli effetti ed eventualmente compensare gli effetti negativi di altre strategie.
-➔ **SPECIFICITÀ:** queste indicazioni danno un quadro di massima ma è impossibile fornire parametri esatti in quanto il funzionamento di ogni strategia è legata alle singole condizioni del contesto, alle caratteristiche climatiche e ambientali e alla combinazione con altre strategie. Tutti questi fattori sono altamente specifici di ogni singolo caso e vanno valutati attentamente in fase di progettazione.

**Software di simulazione
acustica | 05**

5.1 Programmi simulazione acustica.

La disponibilità di computer sempre più potenti ha consentito nel corso degli anni di sviluppare software di simulazione con capacità di calcolo e versatilità sempre maggiori, rendendo di fatto le simulazioni parte integrante del processo di progettazione, anche preliminare, e rendendo anche le misurazioni su modelli fisici obsolete per la maggior parte dei casi.

Rispetto alle misurazioni in camera anecoica le simulazioni consentono di ridurre drasticamente i tempi di valutazione acustica ad una piccola frazione del tempo consentendo quindi una capacità di controllo da parte del progettista infinitamente più grande. La riduzione dei tempi di calcolo consente soprattutto un cambio di approccio all'utilizzo delle simulazioni per il design, diventando non più strumento di verifica, ma un vero e proprio mezzo di progettazione, che consente di esplorare molte opzioni diverse e di scegliere e modificare queste ultime in funzione delle loro performance.

Sebbene inizialmente sviluppati per lo studio delle caratteristiche acustiche di ambienti interni sono ormai disponibili molti programmi sviluppati appositamente per misurazioni in ambienti esterni. La maggior parte di questi sono sviluppati per il calcolo di mappe acustiche, particolarmente in ambiti urbani su ampia scala, e di conseguenza non consentono di studiare progetti a scala di dettaglio.

I diversi software disponibili si possono essenzialmente suddividere in tre categorie diverse, in funzione del metodo di calcolo che utilizzano, ognuna delle quali con una serie di vantaggi e svantaggi e di applicazioni ideali. I metodi geometrici GA (geometrical acoustics) simulano il comportamento delle onde sonore assimilandole all'emissione di particelle che si diffondono a partire dalla sorgente con moto lineare, caratterizzate da una certa quantità di energia che viene dispersa al passare del tempo e ogni volta che le particelle rimbalzano su una superficie. Questo approccio si basa sul presupposto che la dimensione degli oggetti che interferiscono con la propagazione del suono siano maggiori rispetto alla lunghezza d'onda dei suoni presi in considerazione. Quando questa ipotesi è verificata ci si trova in una situazione in cui le fasi modali non si sovrappongono ed è quindi corretto utilizzare metodi puramente geometrici.

Questa semplificazione consente di ottenere buoni livelli di accuratezza con dei tempi di calcolo brevi, tuttavia non vengono considerati alcuni fenomeni fisici caratteristici del reale comportamento delle onde sonore, come ad esempio la diffrazione, che si genera nel momento in cui un'onda colpisce un oggetto o una

superficie di dimensioni inferiori alla sua lunghezza d'onda.

I metodi wave-based calcolano invece il reale comportamento delle onde sonore, risultando però estremamente onerosi da un punto di vista computazionale. Infatti per calcolare i risultati, il software deve risolvere numericamente le equazioni che descrivono la diffusione delle onde sonore. Sono indispensabili in quei casi in cui non sono verificati i presupposti per l'uso di metodi geometrici. Esiste infine una categoria di programmi ibridi, ovvero programmi che combinano più metodi di calcolo, utilizzando di solito una combinazione di ray-tracing e image source method, o ray-tracing e algoritmi wave based per raggiungere risultati più accurati specialmente in situazioni in cui il campo diffuso è prevalente ed è necessario considerare le fasi modali. Questi combinano l'accuratezza di calcolo alle basse frequenze pur mantenendo una buona velocità di calcolo, utilizzando gli algoritmi più dispendiosi solo per le frequenze in cui i metodi geometrici non sono accurati.

Oltre alla scelta di un modello adeguato al contesto, i risultati ottenuti dagli strumenti digitali di simulazione acustica dipendono fortemente dall'esperienza dell'utilizzatore nel preparare e impostare la simulazione. La preparazione dei modelli tridimensionali (o anche bidimensionali), richiede una certa esperienza nel saper semplificare spazi e geometrie troppo complessi, nella verifica e correzioni di eventuali errori di modellazione, come sovrapposizioni o spigoli non chiusi (in gergo watertight), o addirittura nella scelta degli strumenti di modellazione che garantiscano la compatibilità del modello con il software di analisi, tutti step necessari perché la simulazione possa avere luogo fornendo risultati affidabili. Una parte molto importante nella preparazione del modello è la definizione della scala di dettaglio del modello, infatti oggetti e geometrie al di sotto di una certa dimensione devono essere semplificate con superfici piatte e considerate in seguito nella definizione dei coefficienti. Allo stesso modo eventuali superfici curve devono essere trattate diversamente a seconda del software e relativo modello acustico utilizzato.

Sono inoltre critici i passaggi di impostazione e calibrazione del modello acustico, a partire dall'impostazione dei corretti parametri e coefficienti che descrivono le caratteristiche e i materiali dell'ambiente fino alla calibrazione di sorgenti e ricevitori nello spazio.

[79, 80, 81]

5.2 Simulazioni con metodi geometrici

I metodi di calcolo geometrici semplificano il calcolo delle onde sonore trattandole come dei raggi (o particelle), caratterizzati da una direzione di spostamento definita, che interagiscono con le superfici che delimitano il perimetro del

volume analizzato. Consentono di ottenere dei risultati con accuratezza ottimale quando le superfici sono più grandi della lunghezza d'onda delle frequenze analizzate, per questo motivo si tratta di algoritmi che garantiscono un'efficacia maggiore con le alte frequenze.

Si suddividono in due categorie: reflection path based e surface based. La differenza tra i due è insita nel modo in cui l'energia è immagazzinata e dispersa nello spazio, i primi infatti considerano l'energia come proprietà dei raggi e delle particelle mentre nei secondi l'energia viene catturata e immagazzinata dalle superfici dopo il primo ordine di riflessioni, e rilasciata nell'ambiente ogni volta che un raggio impatta su una superficie.

5.2.1 Image-Source (IS)

Il metodo image source è basato sulla soluzione delle traiettorie di riflessioni puramente speculari fra sorgenti e ricevitori attraverso un processo iterativo di soluzione delle equazioni relative a questo metodo. Le traiettorie sono determinate dai raggi emessi dalla sorgente, quando questi raggiungono una superficie la traiettoria della riflessione viene determinata generando una sorgente immagine simmetrica alla prima rispetto alla superficie riflettente (Immagine 5.1). Questo porta a riflettere una sorgente su ogni superficie del modello generando una serie di sorgenti immagine che a loro volta vengono riflesse simmetricamente alle superfici, fino al raggiungimento di una condizione pre-impostata, come un limite di tempo o un numero massimo di riflessioni.

Questo procedimento è rappresentato da una struttura gerarchica ad albero rovesciato, dove l'origine è la sorgente e i rami sono i diversi ordini di riflessioni e le relative sorgenti immagine.

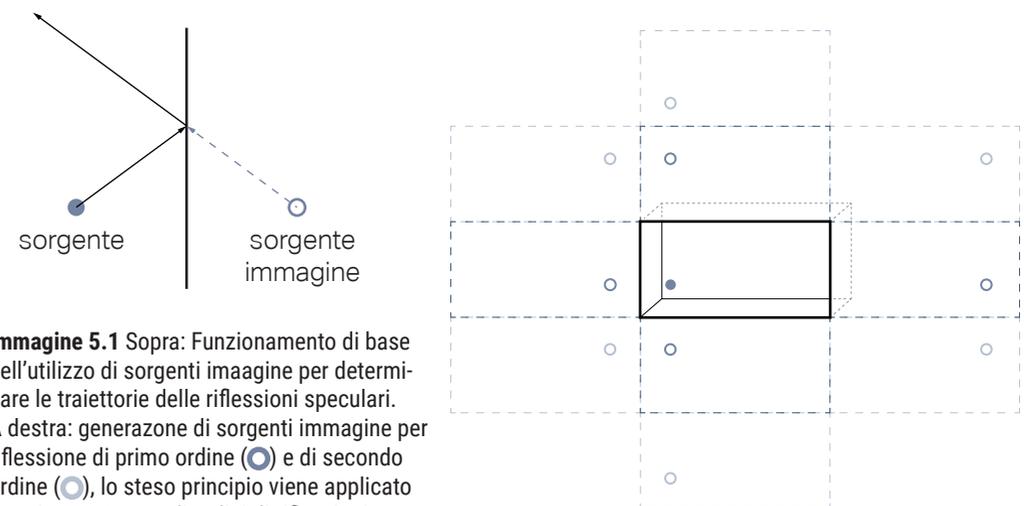
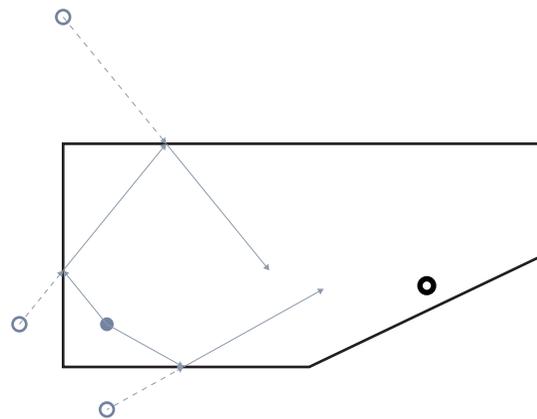


Immagine 5.1 Sopra: Funzionamento di base dell'utilizzo di sorgenti immagine per determinare le traiettorie delle riflessioni speculari. A destra: generazione di sorgenti immagine per riflessione di primo ordine (●) e di secondo ordine (○), lo stesso principio viene applicato iterativamente per gli ordini di riflessioni successivi. Schemi da Savioja et al. [79].

Finché applicato ad ambienti rettangolari questo metodo è piuttosto semplice, tuttavia nella quasi totalità dei casi reali si ha a che fare con geometrie più complesse (Immagine 5.2). In questo caso il processo iterativo rimane invariato ma sono necessarie alcune premesse aggiuntive. Le sorgenti immagine vengono generate solamente per superfici e sorgenti immagine che si trovano di fronte ai lati riflettenti dei poligoni, allo stesso tempo non vengono generate nuove sorgenti immagine se la superficie riflettente è posizionata dietro al precedente riflettore. La struttura delle sorgenti così generata risulta valida per l'intero modello a prescindere dalla posizione dei ricevitori. La seconda premessa riguarda la visibilità della sorgente dal ricevitore e per essere verificata una riflessione speculare emessa dalle sorgenti immagine verso il ricevitore deve raggiungere tutte le superfici riflettenti all'interno del loro perimetro senza intersecare altre superfici nel modello. Il test seleziona quindi quali riflessioni della prima struttura sono valide per un ricevitore in una data posizione.

Immagine 5.2 Esempio di image source in una stanza, al di fuori della sezione si trovano le sorgenti immagine simmetriche rispetto all'asse delle superfici. Schema da Savioja et al. [79].



L'Image source method, grazie al suo funzionamento, è molto efficace ed efficiente da un punto di vista computazionale per calcolare i primi ordini di riflessioni in un ambiente. Allo stesso tempo però a causa del processo iterativo che comporta di fatto una crescita esponenziale del numero di dati questa tecnica diventa inutilizzabile per le riflessioni di ordine più alto, vista l'enorme potenza di calcolo che richiede per gestire grandi quantità di dati. [79, 80, 81, 83]

5.2.3 Ray tracing

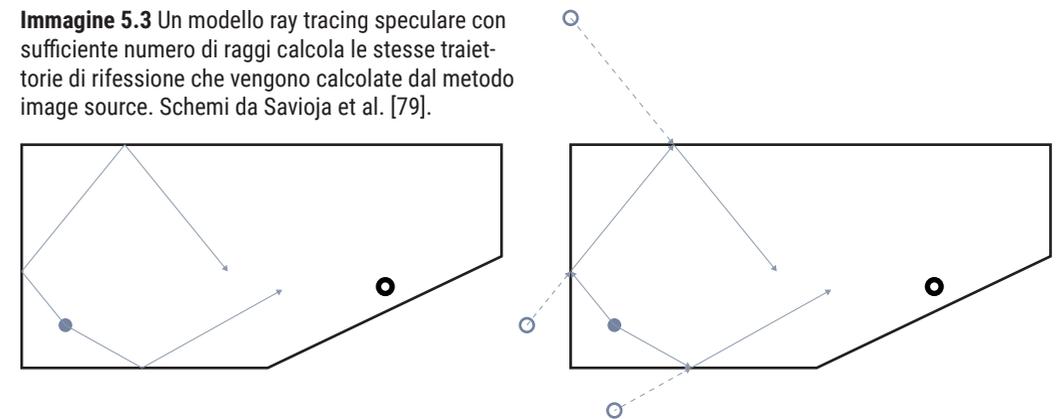
A differenza dei metodi image source, che forniscono una rappresentazione geometrica esatta di ogni riflessione speculare andando a calcolarli individualmente in maniera precisa, il metodo del ray tracing utilizza un approccio probabilistico, applicando il metodo Monte Carlo per svolgere la campionatura delle riflessioni possibili nel modello.

A causa della necessità di una certa potenza computazionale, i metodi di ray tracing sono stati sviluppati più recentemente rispetto ai metodi image source, e hanno preso piede quando la disponibilità di computer comuni con una maggiore potenza di calcolo è diventata più accessibile.

Il funzionamento di base delle tecniche di ray tracing consiste nel tracciamento delle traiettorie dei raggi emessi da una sorgente acustica all'interno di un ambiente e di tutte le successive riflessioni che avvengono quando i raggi colpiscono le diverse superfici nel modello. La distribuzione dei raggi emessi dalla sorgente può seguire un pattern definito oppure può seguire una distribuzione casuale basata su un campionamento Monte Carlo.

La prima opzione è generalmente preferibile, soprattutto se si tratta di sorgenti con un fattore di direttività conosciuto. La distribuzione casuale infatti può generare delle distribuzioni dei risultati alterate compromettendo l'attendibilità del modello, soprattutto se la quantità di raggi emessi dalla sorgente è troppo bassa. Infatti al diminuire del numero di raggi aumentano le probabilità che una direttività casuale generi una distribuzione disuniforme non aderente alla realtà del modello che si sta simulando.

Immagine 5.3 Un modello ray tracing speculare con sufficiente numero di raggi calcola le stesse traiettorie di riflessione che vengono calcolate dal metodo image source. Schemi da Savioja et al. [79].



All'interno del modello i raggi cambiano direzione ogni volta che colpiscono una superficie e vengono riflessi e l'intersezione dei raggi con i ricevitori viene registrata per determinare quali e quanti raggi, e relative traiettorie, raggiungono i

ricevitori, e di conseguenza quanta energia raggiunge ogni ricevitore. I ricevitori non costituiscono tuttavia una barriera per i raggi, che semplicemente li attraversano continuando sulla loro traiettoria.

I raggi continuano quindi a muoversi finché contengono energia e l'attenuazione di questa e la conseguente terminazione di un raggio possono essere determinate con due diversi approcci.

Un primo metodo prevede che ogni raggio abbia una determinata quantità di energia che viene dissipata parzialmente ogni volta che interagisce con una superficie, in funzione delle proprietà del materiale che colpisce. Questo consente di utilizzare le informazioni sull'energia dei raggi in bande di frequenza e di utilizzare quindi coefficienti acustici di assorbimento definiti in frequenza. Come conseguenza l'energia di ogni banda cambia indipendentemente dalle altre in funzione delle caratteristiche dei materiali da cui vengono riflessi i raggi.

Tuttavia non è possibile utilizzare lo stesso meccanismo per quanto riguarda i fenomeni di scattering, in quanto non è possibile avere un coefficiente di scattering in bande di frequenza che consentirebbe di variare la direzione in cui viene riflessa l'energia di un raggio in funzione della sua frequenza.

I raggi vengono infine terminati quando il loro livello di energia scende sotto una soglia minima prestabilita, o in alternativa, quando il suo percorso raggiunge una distanza massima impostata.

Il secondo metodo prevede invece, per la terminazione dei raggi un sistema di tipo casuale, in cui ogni raggio, ad ogni riflessione, ha una certa probabilità di essere terminato, che varia in funzione del valore del coefficiente di assorbimento del materiale. Come conseguenza del meccanismo alla base del funzionamento di questo metodo non viene prevista una differenziazione in bande di frequenza dei livelli di energia, e risulta quindi meno accurato del primo metodo.

Una delle problematiche degli algoritmi di ray tracing è legata alla necessità di utilizzare ricevitori caratterizzati da un volume proprio, necessari perché dei ricevitori puntuali ideali (ovvero senza una dimensione fisica in quanto punti geometrici) avrebbero una probabilità di essere colpiti da dei raggi troppo bassa ai fini di una misurazione accurata. Il volume dei ricevitori crea però alcune problematiche: può infatti captare raggi con traiettorie che non sarebbero rilevanti per un ascoltatore in una determinata posizione, possono intersecare la geometria del modello tridimensionale e possono registrare più volte le stesse traiettorie di raggi riflessi, causando problemi se l'informazione serve per essere applicata in combinazione ad un metodo image source.

[79, 80, 82, 83]

Implementazione di diffusione e diffrazione nelle tecniche di ray tracing

A differenza dei metodi image source, gli algoritmi di ray tracing consentono di implementare tecniche per considerare nella simulazione acustica i fenomeni di scattering e quindi tutte le riflessioni delle onde sonore non speculari. Inoltre è possibile considerare i fenomeni di diffrazione, fenomeno acustico particolarmente rilevante nell'ambito della propagazione dei suoni in ambiente urbano.

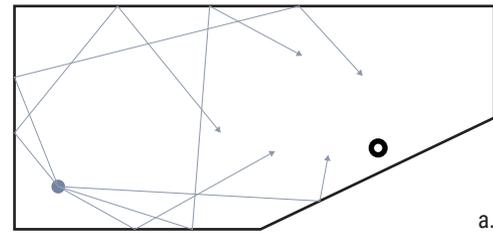
Esistono diverse tecniche per considerare riflessioni non speculari e in genere deve essere fatto un compromesso tra prestazioni e precisione della simulazione. Infatti le tecniche che hanno una maggiore accuratezza sono generalmente quelle che utilizzano meccanismi che comportano l'utilizzo di un maggior numero di raggi e di conseguenza richiedono maggiori tempi e potenze di calcolo.

Uno dei metodi più efficaci prevede infatti di dividere ogni raggio al momento della riflessione in un raggio che viene riflesso specularmente e una serie di raggi riflessi diffusamente in direzione opposta alla superficie riflettente (Immagine 5.4). La quantità di energia attribuita ai diversi raggi (speculari e diffusi) e il numero di raggi diffusi viene stabilito in funzione del coefficiente di scattering del materiale colpito dai raggi.

Questo approccio fa sì che il numero di raggi aumenti esponenzialmente ad ogni riflessione e quindi, pur garantendo una certa precisione nell'approssimazione dei fenomeni di diffusione, risulta molto esigente da un punto di vista computazionale.

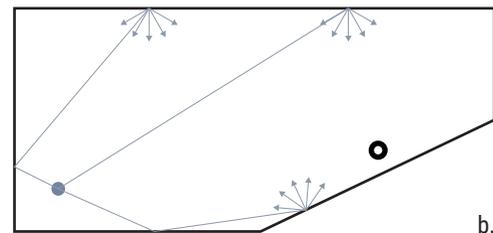
Un altro metodo meno preciso ma molto meno dispendioso in termini di potenza di calcolo utilizza un singolo raggio per ogni riflessione, questo viene riflesso in maniera casuale, simulando la diffusione, solo se il coefficiente di scattering del materiale colpito è superiore ad una certa soglia, mentre viene riflesso specularmente se inferiore (Immagine 5.4). In alternativa un'altra tecnica che utilizza un solo raggio per ogni riflessione, determina la direzione del raggio riflesso tramite la somma vettoriale della riflessione speculare e di un raggio scelto casualmente tra i raggi diffusi del raggio originale se questo venisse diffuso secondo la legge di Lambert. La proporzione fra i due vettori, e di conseguenza la direzione finale del raggio generato, viene determinata in funzione del coefficiente di scattering della superficie.

La velocità di calcolo viene infine ulteriormente ottimizzata tramite la tecnica della "diffuse rain", che utilizza un meccanismo inizialmente sviluppato per l'ottimizzazione delle ombre in algoritmi di rendering utilizzando i cosiddetti "shadow rays". Da ogni punto di riflessione nell'ambiente vengono generati

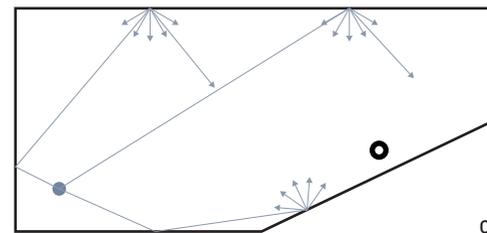


a.

Immagine 5.4 Confronto fra diverse implementazioni di scattering. Schemi da Savioja et al. [79]
 a. Angolo di riflessione random.
 b. Modello diffusivo, generazione raggi diffusi al punto di impatto.
 c. Combinazione di raggi da riflessioni speculari e diffuse.



b.

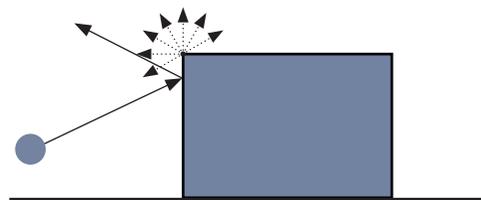


c.

questi raggi diretti verso i ricevitori e le loro traiettorie vengono utilizzate per accelerare la simulazione considerando solamente i raggi che effettivamente convergono sui ricevitori e che sono quindi "visibili". Questo consente di ridurre i raggi primari che devono essere emessi dalla sorgente per poter ottenere un risultato accurato.

Per quanto riguarda il fenomeno di diffrazione delle onde sonore viene generalmente utilizzato l'approccio di Metha e Mulholland, presentato nel 1976 [79]. Questo consiste nel generare una serie di raggi diffusi che vengono emessi dagli spigoli delle geometrie nel modello, ogni volta che un raggio impatta ad una distanza inferiore al doppio della sua lunghezza d'onda da uno spigolo (Immagine 5.5) [84].

Immagine 5.5
 Schema del funzionamento dell'implementazione della diffrazione ai bordi nei metodi di ray tracing.



Trattandosi di un metodo stocastico le simulazioni ray tracing necessitano di una quantità minima di dati, in questo caso la precisione aumenta quindi all'aumentare del numero di raggi utilizzati nella simulazione. Nello specifico è necessario un numero di raggi sufficiente a rendere il risultato di una simulazione confrontabile con il risultato ottenibile nello stesso scenario con una simulazione image source. Se questa condizione è soddisfatta i metodi di ray tracing

consentono di ottenere risultati accurati pur trattandosi di metodi statistici e non di una soluzione esatta delle riflessioni come invece nel caso dell'immagine source.

In linea di massima si considera il numero minimo di raggi necessari a una simulazione come dipendenti dalla specifica geometria e dalle caratteristiche dei materiali, nello specifico si considerano proporzionali al volume e al livello di assorbimento dell'ambiente. [82]

La validità di una simulazione può essere verificata quando continuando ad aumentare il numero di raggi i risultati si allineano su un certo valore ed è quindi possibile determinare approssimativamente il numero minimo necessario di raggi.

[79, 80, 82, 84, 85, 86]

5.2.3 Beam tracing

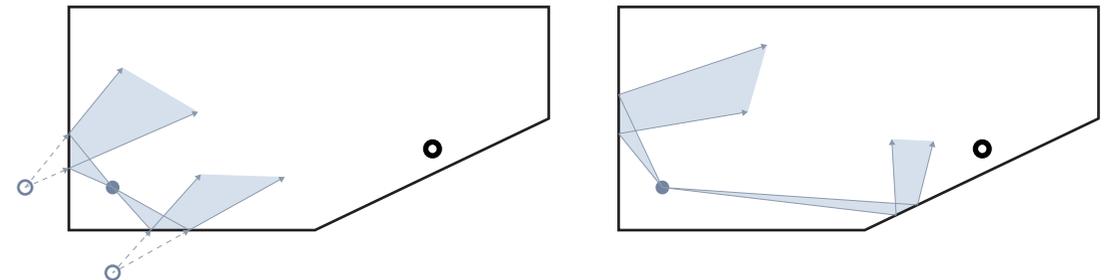


Immagine 5.6 Confronto fra beam tracing basato sul metodo sorgente immagine e beam tracing basato sul metodo ray tracing. Schemi da Savioja et al. [79].

Le tecniche di beam tracing sono effettivamente un'implementazione delle tecniche di image source e di ray tracing in cui, invece di tracciare raggi adimensionali, vengono tracciati dei fasci caratterizzati da un volume proprio. Vengono utilizzati con questo approccio due tecniche diverse che possono essere considerate rispettivamente un'evoluzione rispettivamente delle tecniche di ray tracing e di image source.

La tecnica derivata dal ray tracing consiste nell'utilizzare principalmente dei fasci piramidali a sezione triangolare (Immagine 5.6). La scelta di questa particolare geometria è dovuta alla possibilità di scomporre sorgenti sferiche in triangolazioni mesh, consentendo l'emissione di fasci di energia senza punti ciechi dalla sorgente, suddividendo la distribuzione dei fasci emessi dalla sfera in maniera che coprano lo spazio secondo angoli solidi approssimativamen-

te uguali. In questo modo ogni fascio emesso copre lo stesso volume nello spazio. Alcuni metodi utilizzano invece fasci a sezione conica. Questi risolvono il problema geometrico di suddivisione della sfera sovrapponendo diversi fasci per coprire l'intera superficie.

Il principio alla base del beam tracing è quello di "invertire" la problematica dei ricevitori volumetrici necessari per il ray tracing, utilizzando ricevitori puntiformi e dotando di volume i raggi. In questo modo vengono evitate le problematiche legate al volume dei ricevitori, che non possono più essere mancati dai raggi, ed è inoltre possibile misurare in maniera esatta le distanze di propagazione del suono senza l'approssimazione legata al volume dei ricevitori. Questo consente di utilizzare le equazioni di pressione sonora invece di un modello ad energia.

Il comportamento dei fasci è simile a quello dei raggi nei modelli ray tracing, la direzione di un fascio riflesso viene determinata dalla direzione dei raggi che delimitano la sezione del fascio. Quando un fascio colpisce più di una superficie, viene generato un fascio riflesso più piccolo per ogni superficie riflettente colpita. Fatto salvo per quando vengono colpite più superfici contemporaneamente e i fasci devono essere divisi fra le superfici, in una simulazione il numero totale di raggi non cresce con le riflessioni ma rimane costante per la durata della simulazione.

Anche il beam tracing basato sull'immagine source viene utilizzato per migliorare il funzionamento di base di quest'ultimo eliminandone alcuni difetti principali (Immagine 5.4). Nello specifico viene utilizzato principalmente per ridurre il carico computazionale dell'IS, andando a limitare la crescita esponenziale delle sorgenti generate. La prima serie di riflessioni e annessi sorgenti immagine viene generata come nel metodo image source. Viene quindi generato un fascio per ogni sorgente immagine la cui ampiezza è determinata dai bordi della superficie riflettente. Per le successive riflessioni vengono considerate solamente le superfici che rientrano almeno parzialmente all'interno dei fasci generati a differenza dei metodi IS che generano una sorgente per ogni superficie nel modello. Questo fa sì che la quantità esponenziale di sorgenti venga drasticamente ridotta. Dal momento che la dimensione dei fasci del primo ordine di riflessione è legata alla dimensione delle singole superfici, questo sistema consente un'efficienza inversamente proporzionale alle dimensioni delle superfici nel modello.

[79, 83]

5.2.3 Radiosity

La tecnica di simulazione radiosity ha un'impostazione diametralmente opposta rispetto alle tecniche precedenti. Si tratta infatti di un metodo basato sulle superfici del modello (ray tracing e image source sono invece basati sulle traiettorie) e per questo tratta le riflessioni secondo un modello diffuso. Essenzialmente in questo modello l'energia sonora viene diffusa da una sorgente e in seguito propagata iterativamente dalle superfici che colpisce. In questo modo l'energia raccolta dai ricevitori arriva direttamente dalle superfici. Questo metodo, sviluppato inizialmente per la renderizzazione grafica della luce ambientale, consente di calcolare la propagazione del suono una sola volta in quanto è valida per i ricevitori in ogni posizione. [79, 83]

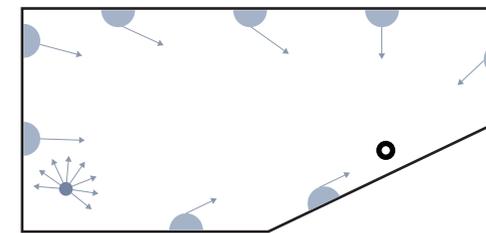


Immagine 5.7 Schema di funzionamento del metodo Radiosity, l'energia delle onde sonore è immagazzinata e rilasciata dalle superfici. Schemi da Savioja et al. [79].

5.2.4 Metodi ibridi

La quasi totalità dei software commerciali (e non) attualmente disponibili utilizza algoritmi ibridi che sfruttano sia tecniche path-based (image source, ray tracing, beam tracing) che surface based (radiosity, radiance transfer). Le prime vengono sfruttate per il calcolo della prima parte della risposta acustica, che è determinata essenzialmente dal suono diretto e dalle riflessioni speculari, mentre utilizza le seconde per l'ultima parte di risposta caratterizzata principalmente da riflessioni diffuse. Una delle combinazioni più utilizzate è appunto quella di image source e/o beam tracing per determinare le riflessioni speculari, e tecniche radiosity per la determinazione della componente diffusa tardiva della risposta sonora.

Alcuni software utilizzano sia tecniche geometriche, per la determinazione delle risposte ad alte frequenze, sia metodi wave based per le frequenze più basse.

I software più avanzati non si limitano ad utilizzare un solo metodo di calcolo anche se ibrido ma generalmente vengono utilizzati algoritmi che sfruttano

tecniche diverse in funzione del parametro che si vuole calcolare

Tutti questi sistemi vengono poi generalmente implementati con diversi sistemi di ottimizzazione specifici dei diversi software, per ridurre tempi e memoria di calcolo necessari, combinando nella maniera più efficace i diversi algoritmi e scremando i dati ritenuti non necessari, anche in funzione dei parametri che si vogliono calcolare. [79, 80, 81, 84]

5.3 Precisione e problematiche dei metodi geometrici in ambiente urbano

A differenza dei metodi wave-based che per definizione considerano implicitamente tutti i fenomeni fisici legati alla diffusione delle onde sonore, i metodi geometrici effettuano un'approssimazione dei fenomeni reali aggregando i fenomeni di riflessione, diffrazione e diffusione. Sebbene consentano simulazioni che garantiscono un'elevata precisione in molti casi, richiedono una certa discrezione ed esperienza da parte dell'operatore per funzionare correttamente in diversi scenari [79]. Bisogna inoltre considerare che esistono diversi software che utilizzano i metodi geometrici sviluppati per applicazioni di diverso tipo. In particolare per quanto ci interessa si possono distinguere i software di noise mapping, sviluppati per la generazione di mappe dell'inquinamento acustico, e quindi pensati per la simulazioni di ambienti molto grandi con una risoluzione di dettaglio della modellazione bassa e una certa approssimazione acustica nella simulazione di ambienti a livello di "micro scala". Al contrario i software per la modellazione di acustica "da camera", sono caratterizzati da un'elevata precisione nella simulazione dei diversi fenomeni acustici, tuttavia non sono di solito sviluppati appositamente per l'utilizzo per ambienti all'aperto, e quando utilizzati per ambienti urbani le simulazioni possono risultare molto pesanti da un punto di vista computazionale.

Secondo Hornikx [80] gli algoritmi che usano metodi geometrici in ambiente urbano presentano delle criticità nella situazioni caratterizzate da riflessioni multiple, in cui la componente maggiore è rappresentata da rumore indiretto, come ad esempio nel caso di ambienti schermati quali cortili interni o nel caso di trasmissione del rumore fra vie parallele, in cui è fondamentale considerare i fenomeni di diffrazione. In particolare sono problematiche le basse frequenze, per la misurazione delle quali è molto importante la considerazione delle fasi modali. Un'altra area potenzialmente problematica è quella degli incroci fra vie perpendicolari, in cui la propagazione del suono riflesso e diffratto rappresenta la componente principale rispetto alla trasmissione diretta, in quanto la superficie visibile della sorgente dalla via trasversale è molto piccola rispetto alla sua

lunghezza.

In tutti questi casi se il contributo dell'energia proveniente dalle riflessioni o dalle diffrazioni non è valutato e riprodotto nel modello correttamente, diventa molto probabile che i reali livelli vengano sottovalutati e che i risultati delle simulazioni siano ottimistici rispetto alla realtà [81, 84].

L'altro elemento molto importante per la simulazione acustica in ambiti urbani è la corretta caratterizzazione delle superfici tramite i coefficienti di assorbimento e scattering. Diventano particolarmente importanti quando descrivono tutte le irregolarità delle superfici, ad esempio nel caso di una facciata o di una copertura, troppo piccole per essere fisicamente rappresentate nel modello senza compromettere l'efficienza della simulazione. [79]

Per questi motivi i metodi wave based presentano dei chiari vantaggi per quanto riguarda l'accuratezza della simulazione, tuttavia attualmente non esistono software wave based che consentano la valutazione in microscala di modelli tridimensionali, e sono di conseguenza limitati a quelle situazioni in cui la sezione bidimensionale di uno spazio può essere considerata costante su tutta la sua lunghezza (come ad esempio nel caso di una o più vie parallele). Tuttavia dato che possiamo paragonare ambienti di microscala urbana a degli ambienti interni, l'utilizzo di software ibridi che utilizzano metodi wave based per lo spettro delle basse frequenze e metodi geometrici per le alte frequenze, sembrerebbe essere un'ottima soluzione in termini di precisione e velocità di calcolo [86].

5.4 Auralizzazioni

La disponibilità di algoritmi ibridi sempre più accurati e veloci è fondamentale nel campo delle auralizzazioni, specialmente per quanto riguarda la simulazione sonora di ambienti in tempo reale.

Viene definita come auralizzazione la simulazione della riproduzione di un determinato suono in uno spazio che può essere ascoltata tramite cuffie per avere un'impressione diretta dell'acustica di un ambiente. Ormai quasi tutti i software di simulazione acustica commerciali disponibili hanno la possibilità di eseguire auralizzazioni "statiche", ovvero di un ascoltatore in una posizione fissa, e diventano sempre più diffusi software di auralizzazione in tempo reale, che consentono quindi di simulare un ascoltatore in movimento all'interno di uno spazio. [79]

In ambito videoludico e di intrattenimento l'utilizzo di auralizzazioni dinamiche associate alla renderizzazione grafica o a tecniche di realtà virtuale è ormai ab-

bastanza diffuso e in continuo sviluppo. L'utilizzo di queste tecniche in ambito architettonico e di design urbano ha delle enormi potenzialità sia da un punto di vista progettuale che di visualizzazione degli spazi, non solo da un punto visivo ma anche di soundscape creando quindi una visualizzazione più immersiva nell'ambiente simulato.

Un esempio molto interessante di una possibile applicazione è il lavoro di Forsen et al. [87] che consiste nello sviluppo di Demo VirPEN ("Demonstrator for virtual planning and scenario analysis of invisible environmental factors with focus on noise in the city"), un tool per la visualizzazione del rumore in ambienti urbani, che ha come intento quello di rendere il soundscape parte di un più ampio processo di progettazione multidisciplinare, consentendo una miglior visualizzazione e comprensione dell'acustica di uno spazio, rispetto a quella fornita dai metodi classici di rappresentazione tramite l'uso di mappe e indicatori.

Questo tool utilizza le informazioni sul suono estrapolate dall'auralizzazione dell'ambiente per generare una scala di colore che rappresenta i diversi livelli acustici (Immagine 5.8). I diversi gradienti di colore vengono poi usati per creare automaticamente una visualizzazione del suono nello spazio tridimensionale, che viene sovrapposta in trasparenza alla renderizzazione grafica del modello, prodotta tramite Unreal Engine, un noto motore di rendering in tempo reale, moto usato nell'ambito di realtà aumentata e virtuale.



Immagine 5.8
Render con indicazione in scala di colore dei livelli di rumore realizzato con Demo VirPEN [87].

L'output generato dal software si potrebbe quindi descrivere come un video render che consente di unire la percezione sensoriale uditiva e visiva dell'acustica di uno spazio urbano, fornendo una rappresentazione molto efficace e di immediata comprensione anche per spettatori che non hanno una formazione tecnica specifica.

[79, 85, 87]

5.5 Software attualmente disponibili

Software	Metodo di analisi	Dettagli Analisi	3d/2d	Importazione/implementazione	Fasi	Diffrazione	Licenza
Odeon	Geometrico	Image Source + Ray Tracing	3d	modellazione esterna	no	sì	commerciale
CATT Acoustics	Geometrico	geometrico	3d	modellazione esterna/implementabile custom script gh	no	sì	commerciale
Pachyderm	Geometrico	Image Source + Ray Tracing (+ finite volume method)	3d	plug-in rhinoceros/gh	no	no	free, open source
Olive Tree	Ibrido wb/ga	wave based geometrical acoustics	3d	modellazione esterna	sì	sì	commerciale
Ease	Geometrico	Image Source + Ray Tracing	3d	modellazione esterna	no	no	commerciale
Parallel FDTD	Wave Based, FDTD	Solutore equazioni di maxwell per matlab, FDTD	3d	modellazione esterna, richiede programmazione	sì	sì	free, open source
I-simpa	Energetic models (implementabil con wave based)	particle tracing, ray tracing	3d	graphical user interface per simulazione acustiche, modellazione esterna	no	no	free, open source
Mithra	Geometrico	Ray tracing	3d	modellazione esterna	-	sì	commerciale
Lima	sound mapping	geometrico	3d	modellazione esterna	-	-	commerciale
Cadna-A	sound mapping, geometric	raytracing	3d	modellazione esterna	-	-	commerciale
Cadna-R	Geometrico	Image Source + Ray Tracing	3d	modellazione esterna	-	sì	commerciale
Soundplan	sound mapping	Particle tracing	3d	modellazione esterna	no	\\	commerciale
NoiseModeling	sound mapping	ray tracing, CNOSSOS	3d/2d	importazioni da libreria interna gis	no	sì (solo spigoli orizzontali)	open source
Wayverb	ibrido ga+wb	image source + ray tracing + FDTD	3d	importazione esterna	-	-	open source
Open PSTD	wave based	PSTD (pseudo-spectral time domain)	2d	plug-in bender	sì	sì	open source

Tabella 5.1 confronto software di simulazione acustica attualmente disponibili [85, 86, 88, 89, 90, 92, 93, 94, 95, 96, 97, 98, 99, 100].

5.5 Software attualmente disponibili

La stragrande maggioranza dei programmi di simulazione acustica attualmente disponibili rientra nella categoria dei modelli ibridi, ovvero utilizza una combinazione di due o più modelli, nella maggior parte dei casi geometrici, per superare le limitazioni dei diversi modelli e ottenere delle prestazioni che con un singolo algoritmo non sarebbero possibili. In questo modo infatti ogni algoritmo viene utilizzato solamente per le frequenze per cui garantisce una precisione e velocità di calcolo migliori.

Nella Tabella 5.1 sono raccolti i principali software commerciali e open source attualmente disponibili, alcuni sono software di sound mapping, rivolti specificamente alla creazione di mappe del rumore e all'analisi di aree di grandi dimensioni, con un livello di dettaglio acustico e di modellazione piuttosto basso. L'altra categoria riguarda i software per l'acustica da camera che sono generalmente sviluppati per l'analisi di ambienti chiusi ma possono anche essere usati per spazi aperti se le loro caratteristiche sono adeguate.

Si nota subito come la maggior parte dei programmi utilizzino metodi geometrici, pochi utilizzano sistemi completamente wave based o ibridi, inoltre la maggior parte dei programmi basati solamente su modelli wave based possono operare solamente in ambienti bidimensionali, imponendo quindi grosse limitazioni sulle possibilità di utilizzo. [81, 91]

Alcuni programmi possono tuttavia essere implementati per utilizzare anche sistemi wave based, ma richiedono un lavoro di programmazione o in alternativa degli script custom.

Gli unici due programmi "completi" che saltano all'occhio nella categoria wave based sono Olive tree [90], che utilizza un sistema ibrido, chiamato "wave based geometrical acoustics", e Wayverb [86] sistema che utilizza in sinergia image source, ray tracing e FDTD (wave based). Quest'ultimo è un software open source specificamente sviluppato per l'utilizzo da parte di operatori non specializzati, come ad esempio architetti senza una formazione acustica.

Uno dei problemi principali di questi programmi è infatti l'alta specificità che li caratterizza, essendo pensati per utilizzatori che hanno un alto livello di competenze in campo acustico come ingegneri o acustici. Come conseguenza sono spesso sviluppati concentrandosi sull'affidabilità fisica delle misurazioni, dando per scontata la conoscenza dell'utilizzatore dei fenomeni fisici coinvolti a scapito della facilità di utilizzo. Allo stesso tempo spesso non sono dotati di grandi strumenti di visualizzazione dati, che per essere presentati ad un pubblico non specializzato richiedono quindi step di preparazione per essere resi comprensivi

bili ed utilizzabili in una presentazione. [91]

Un altro elemento di criticità di molti software di analisi è la loro integrabilità con i software di modellazione, richiedendo magari lavorazioni articolari con i modelli tridimensionali da importare per essere compatibili o anche solo da un punto di vista di semplicità di utilizzo, elemento molto importante all'interno dei workflows vista la natura iterativa dei processi di simulazione e ottimizzazione. In questo senso gli unici due programmi acustici a sfruttare l'interfaccia e l'ambiente di lavoro sono open PSTD [88] e Pachyderm [89], rispettivamente plug-in di blender (anche se utilizzabile solamente per analisi bidimensionali) e di rhinoceros e grasshopper. In questo senso pachyderm è l'unico software di simulazione acustica che lavora all'interno di un software di modellazione tridimensionale e può essere utilizzato parametricamente all'interno di grasshopper senza aver bisogno di script custom.

Caso studio e metodi | 06

6.1 Obiettivi

Lo scopo del lavoro di ricerca svolto in questa tesi è quello di studiare gli effetti sull'acustica urbana causati da diverse tipologie morfologiche di isolato, specificamente nel caso di ambienti esposti ad inquinamento acustico da traffico, analizzando inoltre quelli che sono gli effetti dell'applicazione di diversi materiali, con differenti caratteristiche acustiche, per il trattamento delle facciate delle varie tipologie di isolato urbano studiate.

L'obiettivo infatti è quello di indagare un ambito al momento poco studiato dalla letteratura scientifica disponibile, per fornire indicazioni utili ai progettisti con l'intento di sviluppare un approccio di progettazione che migliori le condizioni di inquinamento acustico e di soundscape all'interno degli ambienti urbani, promuovendo un approccio che consideri queste problematiche fin dalle prime fasi di progettazione, così come già avviene per altri aspetti, quali quelli termici ed energetici.

Il lavoro di questa tesi parte dalla relativa mancanza di studi delle conseguenze dell'architettura sulle condizioni acustiche dell'ambiente cittadino a scala urbana. Attualmente la ricerca sull'acustica urbana relativa agli effetti della morfologia e degli elementi architettonici si può suddividere a grandi linee in due categorie.

La prima è quella dello studio degli effetti legati a diverse tipologie urbane a scala urbana, definendo una correlazione fra le mappature acustiche delle città e degli indicatori urbanistici descrittivi dell'ambiente. Sebbene questo fornisca importanti informazioni sugli effetti della configurazione urbana si tratta di informazioni applicabili principalmente ad un contesto di pianificazione urbana su larga scala, senza fornire molte informazioni di tipo progettuale agli architetti coinvolti nella progettazione di interventi a scala più piccola.

La seconda macro-tipologia è quella delle ricerche sugli effetti di diverse strategie progettuali impiegabili per mitigare l'inquinamento acustico e migliorare le condizioni dei paesaggi sonori in città, in cui viene analizzato l'utilizzo del design di facciate, coperture, finestre e balconi o di materiali specifici. La quantità di ricerche in questa seconda categoria è cresciuta negli ultimi decenni, fornendo una quantità di dati e casi studio che consentono di trarre alcune delle linee guida riportate nei capitoli precedenti.

Tuttavia, sebbene la letteratura attualmente disponibile delinei in maniera chiara una relazione fra le condizioni acustiche e le caratteristiche geometriche di un ambiente costruito, come ad esempio per i parametri geometrici relativi ai canyon urbani, sono molti pochi gli studi che indagano gli effetti del costruito su scala di masterplan ad esempio nel caso di un isolato, lasciando un gap fra progettazione architettonica "di dettaglio" di un singolo intervento e la progetta-

zione urbanistica su ampia scala.

Questo fa sì che ci siano delle lacune su fenomeni piuttosto importanti, come ad esempio l'effetto sulla trasmissione del rumore negli incroci fra strade perpendicolari fra loro, che quindi non possono essere appropriatamente trattati in fase di progettazione.

Per la selezione delle tipologie morfologiche da testare nel lavoro di tesi si è partiti dallo studio della letteratura disponibile relativa all'impatto di diverse morfologie sugli aspetti di termica urbana. Se infatti si tratta di un ambito poco studiato da un punto di vista acustico, esistono invece diversi studi che trattano gli effetti in ambito termico energetico e di effetto isola di calore urbana (Taleghani et al., 2015 [70]; Sanaieian et al., 2014 [101]; Mutani et al, 2016 [102]; Vanderhaegen et al. 2017 [103]; Natanian et al. [104]).

L'isolato utilizzato come caso studio e le diverse tipologie analizzate sono tratti da un articolo di Mutani et al. "Space heating energy consumption and urban form. The case study of residential buildings in Turin" [102], che studia l'effetto di diverse tipologie di edifici e i relativi indicatori sull'ottimizzazione dei consumi energetici dell'isolato analizzato.

6.2 Panoramica del caso studio



L'isolato analizzato nel lavoro di tesi è situato a Torino, all'interno della circoscrizione 1 nella parte sud del quartiere della Crocetta, delimitato da Via Antonio Pigafetta, Via Amerigo Vespucci, Via Giovanni da Verazzano e Via Sebastiano Caboto. Il quartiere è caratterizzato da un tessuto piuttosto compatto, composto principalmente da vecchi edifici risalenti a prima degli anni '70, con un'altezza media di 5/6 piani, intermezzati generalmente da edifici più alti e alcune basse costruzioni.

Gli edifici sono mediamente disposti a formare il classico isolato a corte interna, con l'eccezione di qualche

Immagine 6.1 pianta del contesto del caso studio.

isolato in cui gli edifici sono disposti a stecca, perpendicolarmente al perimetro dell'isolato. La geometrie degli edifici, in rapporto a quella delle strade interne al quartiere, fa sì che si formino dei canyon urbani abbastanza evidenti, anche se con lati un po' frastagliati.

La mobilità all'interno della città di Torino è sempre stata fortemente sbilanciata verso l'utilizzo delle automobili e come conseguenza la città è caratterizzata da grandi corsi stradali, altamente trafficati, che attraversano il tessuto urbano creando delle condizioni di inquinamento acustico abbastanza marcato in molte zone della città. Il quartiere dove è locato l'isolato oggetto di studio rientra in questa casistica e, quest'ultimo è separato da Corso Mediterraneo e da Corso Duca Degli Abruzzi, due dei corsi più trafficati di Torino, solamente da un altro isolato su entrambi i lati.

Come si può vedere dalle mappature del rumore dell'ARPA (Agenzia Regionale per la Protezione Ambientale) (Immagine 6.2) [105, 106] realizzate con i dati al monitoraggio del rumore, i livelli acustici del quartiere superano ampiamente i livelli raccomandati dalla WHO [2].

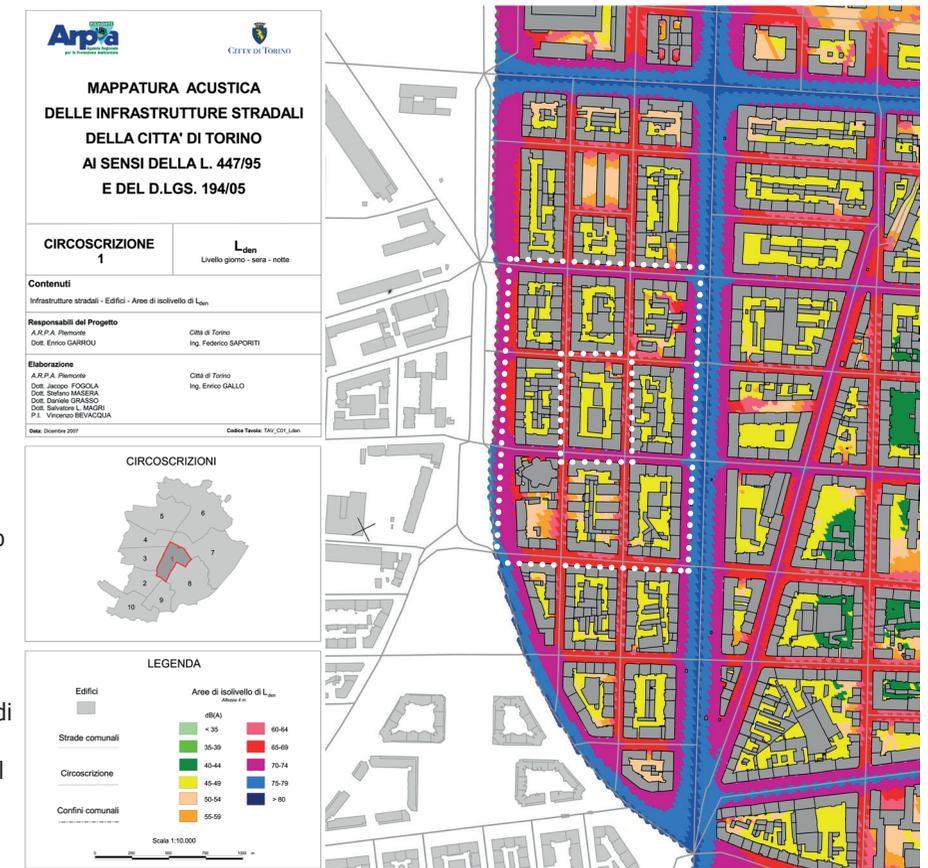


Immagine 6.2 Mappatura del rumore città di Torino ARPA [105]. Livello giorno-sera-notte L_{den}. La linea punteggiata (.....) delimita gli isolati di conteso e l'isolato oggetto di studio al centro.

I grandi corsi appaiono proprio come le principali sorgenti di rumore, tuttavia si può notare come anche all'interno delle vie secondarie, che attraversano il quartiere, i livelli di rumore sono piuttosto elevati. L'isolato esistente è formato da edifici residenziali disposti sul perimetro, delimitando la corte interna, il lato nord del cortile è più aperto nei due spigoli dove si trovano sue edifici bassi (Immagine 6.3).

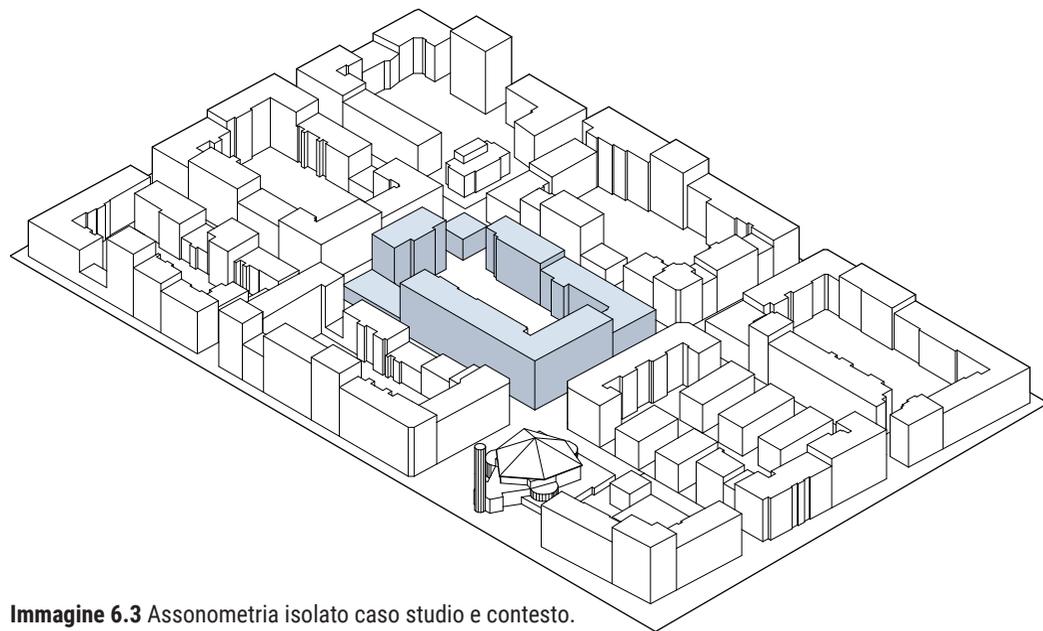


Immagine 6.3 Assonometria isolato caso studio e contesto.

6.3 Tipologie morfologia isolato

Tra le diverse tipologie morfologiche studiate da Mutani et al. [102] sono stati selezionati sei casi, che rappresentano le categorie di edifici a corte interna, edifici a stecca ed infine edifici a torre.

L'isolato ha pianta rettangolare i cui lati misurano rispettivamente 60m e 100m, sono stati scelti tre edifici a corte interna, rispettivamente con uno, due e tre cortili interni, due configurazioni con edifici a stecca e una configurazione con edifici a torre (Immagine 6.4). Tutti gli edifici hanno quattro piani, con un'altezza di 14 metri, fatta eccezione per gli edifici a torre che hanno cinque piani per un'altezza complessiva di 17,5 metri. Le caratteristiche dei diversi edifici sono state impostate affinché le diverse tipologie fossero coerenti con i parametri urbanistici della zona e con le caratteristiche degli altri isolati del quartiere, inoltre si possono adattare bene a diverse destinazioni di utilizzo come residenziale o commerciale.

I tre casi con corte interna sono pensati per confrontare gli effetti dell'ampiezza

za degli spazi protetti interni sul rumore, e per valutare l'efficacia di un cortile interno come eventuale quiet place o quiet facade, sia per l'uso da parte dei residenti degli edifici, sia per un eventuale utilizzo come luogo pubblico in caso di piano terra accessibile o ad uso commerciale [41]. Le altre tre configurazioni invece sono state pensate per studiare gli effetti di diversi aspect ratios e di

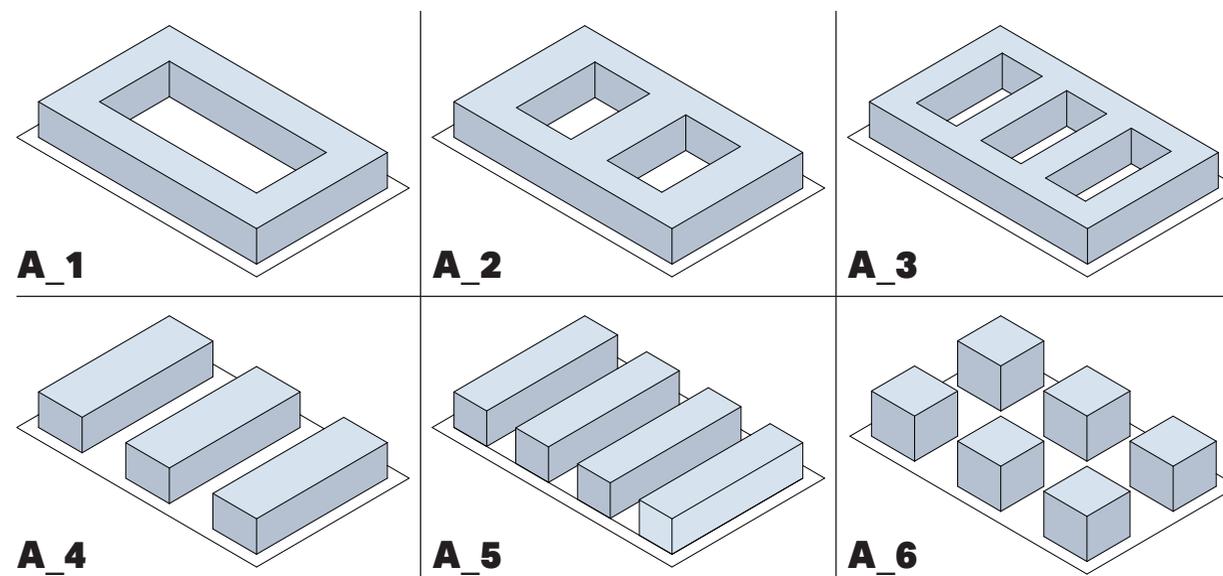


Immagine 6.4 Abaco delle tipologie morfologiche di isolato considerate per il caso studio.

diverse densità di spazi aperti sulle vie dove si trovano le sorgenti. Ad ogni tipologia di isolato è stata assegnata una sigla alfanumerica per l'identificazione dei diversi casi studiati e per facilitare l'organizzazione dei dati.

6.4.1 Impostazione workflow e metodi

La scelta del flusso di lavoro è stata dettata dal software selezionato per svolgere le simulazioni. Si è infatti utilizzato Odeon, uno dei software commerciali per l'acustica attualmente più diffusi e utilizzati nell'ambito delle simulazioni acustiche. Odeon è un software, principalmente sviluppato per la simulazione di ambienti indoor, che può però anche essere usato per spazi esterni, che utilizza ibridamente diversi metodi geometrici, ovvero vengono generalmente usati più metodi in combinazione fra loro e, per ogni parametro acustico calcolato, vengono utilizzati i metodi più idonei al caso [85].

La scelta del programma è stata dettata dall'assenza di software open source che implementino i fenomeni di diffrazione, fondamentali per la tipologia di

simulazioni da svolgere, e dall'assenza di software wave-based tridimensionali ad accesso libero.

Conseguentemente alla scelta del software è stato impostato il metodo di lavoro, che segue un processo lineare abbastanza standard di modellazione, importazione, simulazione ed esportazione dei risultati per l'analisi (Immagine 6.5). Il software non consente implementazioni di tipo parametrico e di conseguenza ogni iterazione a fini progettuali viene essenzialmente svolta manualmente, senza la possibilità di creare dei loop automatizzati fra i programmi di simulazione e di modellazione. Questo flusso di lavoro è simile a quello di molti altri studi sugli impatti acustici di diverse soluzioni architettoniche.

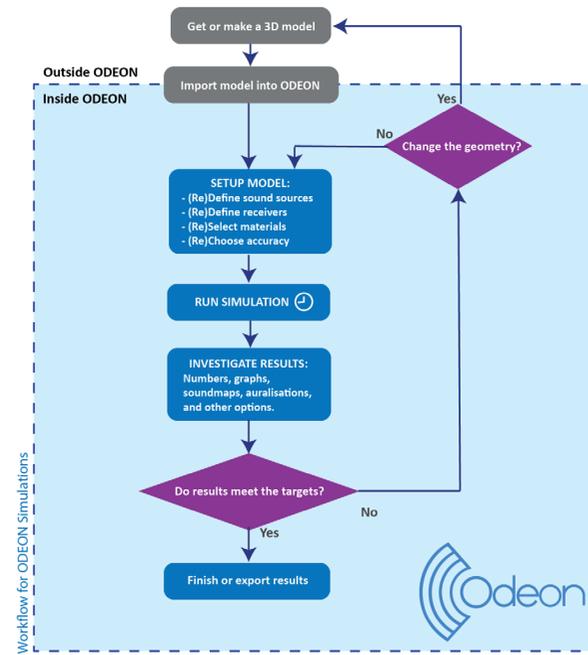


Immagine 6.5 Workflow di simulazione proposto dal manuale operativo di Odeon [85].

6.4.2 Combinazioni delle simulazioni

Le diverse tipologie di isolato sono state simulate, insieme all'isolato esistente, considerando diverse condizioni delle facciate, ovvero simulando due valori del coefficiente di assorbimento alfa, uno alto e uno basso. Allo stesso modo sono stati scelti due valori per i coefficienti di scattering delle facciate, anche in questo caso un valore per una condizione con basso scattering e uno per una condizione di scattering elevato. I diversi valori dei coefficienti sono poi stati combinati per ottenere le quattro categorie principali di simulazione, che corrispondono alla combinazione incrociata dei valori.

Anche il modello dell'isolato esistente è stato simulato considerando i diversi coefficienti di facciata, in modo da avere un caso di riferimento, che consentisse di confrontare gli effetti delle diverse opzioni geometriche in relazione alle combinazioni di coefficienti.

Come si può vedere nella tabella il caso base, corrispondente ad edifici che non hanno ricevuto trattamenti acustici delle facciate, combina un valore basso sia

Legenda sigle nomenclatura

Immagine 6.6

Esempio: **A_0_0**

Tipologia isolato

Combinazione coefficienti

	A_1_0	A_1_1	A_1_2	A_1_3
	A_2_0	A_2_1	A_2_2	A_2_3
	A_3_0	A_3_1	A_3_2	A_3_3
	A_4_0	A_4_1	A_4_2	A_4_3
	A_5_0	A_5_1	A_5_2	A_5_3
	A_6_0	A_6_1	A_6_2	A_6_3

coefficiente di assorbimento: BASSO
coefficiente di scattering: BASSO

coefficiente di assorbimento: BASSO
coefficiente di scattering: ALTO

coefficiente di assorbimento: ALTO
coefficiente di scattering: BASSO

coefficiente di assorbimento: ALTO
coefficiente di scattering: ALTO

per il coefficiente di scattering che per quello di assorbimento, mentre i casi successivi testano le combinazioni possibili dei valori dei coefficienti. Per identificare i diversi casi e per organizzare la grande quantità di dati ricavati dalle simulazioni è stato sviluppato un sistema di nomenclatura che tramite la sigla alfanumerica identificativa fornisce le informazioni riguardo la tipologia di isolato e la combinazione di coefficienti acustici delle facciate. La lettera iniziale della sigla e la prima cifra indicano il tipo di isolato, mentre la seconda cifra indica la combinazione dei coefficienti (Immagine 6.6). L'uso di una lettera e di una cifra è ridondante per il numero di opzioni che sono state testate ma è stato sviluppato per consentire un eventuale sviluppo di ulteriori opzioni geometriche per le simulazioni. Lo sviluppo di tale sistema è stato necessario per consentire la gestione dei dati derivanti dalle simulazioni per la successiva fase di analisi dati.

6.4.3 Sviluppo del modello tridimensionale

I modelli tridimensionali utilizzati sono stati sviluppati con Sketchup, in quanto il programma consente tramite un plug-in di esportare la geometria modellata sotto forma di file geometrici di Odeon, permettendo quindi un processo di importazione piuttosto rapido che non richiede preparazioni particolarmente impegnative, mantenendo la suddivisione in livelli utilizzata all'interno del software di modellazione (Immagine 6.8).

La quasi totalità di software di simulazione ambientale, non solo acustica, attualmente disponibili richiede alcune condizioni del modello tridimensionale che si utilizza, e anche Odeon rientra in questa categoria. I modelli tridimensionali devono essere creati utilizzando mesh per le superfici, queste sono infatti un requisito fondamentale per il funzionamento dei modelli matematici utilizzati per simulare la geometria e la sua interazione con i fenomeni che vengono simulati, in questo caso la riflessione dei raggi sonori. L'altro requisito è che il modello sia completamente sigillato, in gergo tecnico "water tight", questo perché un ambiente "aperto" causerebbe la fuoriuscita dei raggi o delle particelle dal modello impedendo quindi la corretta misurazione della simulazione. In questo senso Sketchup è un ottimo ambiente di modellazione in quanto utilizza esclusivamente superfici mesh, consente una modellazione molto rapida ed intuitiva, più che adeguata per le geometrie molto semplici del caso studio in esame.

Il modello tridimensionale usato per le simulazioni è stato sviluppato partendo dalla modellazione dalle geometrie di contesto degli altri isolati del quartiere, utilizzando come base la CTR di Torino [105, 106], procedendo alla modellazio-

Immagine 6.7 Immagine del modello tridimensionale utilizzato.

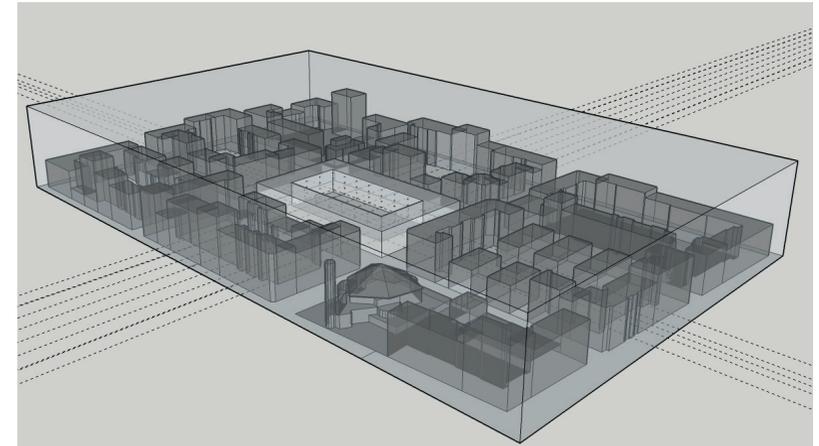
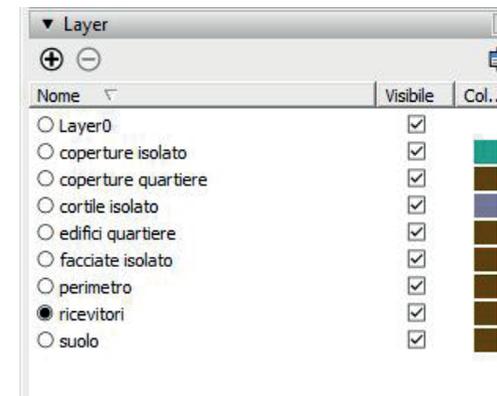


Immagine 6.8 Suddivisione delle superfici in livelli a seconda delle caratteristiche acustiche.



ne e alla pulizia e alla semplificazione delle superfici.

Per la scala di dettaglio dei modelli si è scelto di rappresentare esclusivamente le volumetrie degli edifici come semplici solidi (Immagine 6.7), al fine di contenere il numero di superfici all'interno del modello con l'obiettivo di renderlo sufficientemente leggero da consentire lo svolgimento delle simulazioni in tempistiche ragionevoli, e anche la

manipolazione fluida dei modelli all'interno di Odeon.

Le superfici nel modello sono state suddivise in livelli a seconda del tipo di materiali e delle caratteristiche acustiche delle superfici in modo da velocizzare l'impostazione dei parametri una volta effettuata l'importazione in Odeon, dividendo rispettivamente facciate, coperture, suolo e infine facciate e coperture dell'isolato studiato.

6.4.3 Simulazioni di verifica del contesto

Oltre alle simulazioni utilizzate per studiare gli effetti delle diverse morfologie e dei diversi trattamenti di facciata sono state effettuate due simulazioni per verificare gli effetti della morfologia degli isolati del contesto sui livelli dell'isolato oggetto di studio.

Per la prima simulazione è stato utilizzato una versione modificata del modello dell'isolato A_5_0, identificato con la sigla A_5_0L, ovvero l'isolato con quattro edifici a stecca e la configurazione dei coefficienti acustici di facciata standard (assorbimento e scattering bassi) (Immagine 6.10). In questa variante i lati affacciati sull'isolato di studio degli isolati di contesto sono stati uniformati portandoli ad un'altezza corrispondente all'altezza media degli edifici del contesto. Inoltre eventuali aperture lungo gli isolati sono state sostituite da altri edifici, sempre alla stessa altezza, in modo da creare un fronte chiuso compatto sui lati opposti del canyon urbano formato sulle vie che circondano l'isolato di studio.

La seconda simulazione di verifica del contesto, identificata con la sigla A_5_0L1, è stata eseguita per provare a eliminare l'influenza di ogni possibile punto di difformità geometrica presente negli isolati di contesto. In particolare il punto focale di questa simulazione era di verificare gli effetti dei due isolati rispettivamente a nord-est e a sud-ovest dell'isolato oggetto di studio. Questi infatti presentano, in corrispondenza degli spigoli rivolti verso l'isolato centrale, una morfologia diversa rispetto alla media del contesto. Nel caso dell'isolato a sud ovest questa è rappresentata dalla presenza di una chiesa la cui struttura rompe la regolarità morfologica degli isolati di contesto, creando uno spazio più aperto. In modo simile nell'isolato a nord-est troviamo un edificio di tre piani di dimensioni inferiori a quelle degli altri edifici dello stesso isolato e separato dagli edifici adiacenti, creando anche qui una zona caratterizzata da una morfologia più aperta e irregolare.

Il modello per la seconda simulazione di controllo è stato quindi realizzato uniformando tutti gli edifici degli isolati di contesto all'altezza media utilizzata per la prima simulazione di verifica, e chiudendo tutte le aperture presenti lungo il perimetro degli isolati, creando una struttura il più regolare possibile (Immagine 6.11). Anche in questo caso l'isolato di studio è rappresentato dal modello A_5_0.

Per entrambe le simulazioni di verifica i coefficienti acustici degli edifici di contesto non sono stati cambiati rispetto a quelli utilizzati per le altre simulazioni. Per misurare gli effetti delle modifiche sono state utilizzate principalmente le grids di ricevitori di Odeon, utilizzate per le mappature in scala di colore e la normale griglia di ricevitori utilizzata per le simulazioni.

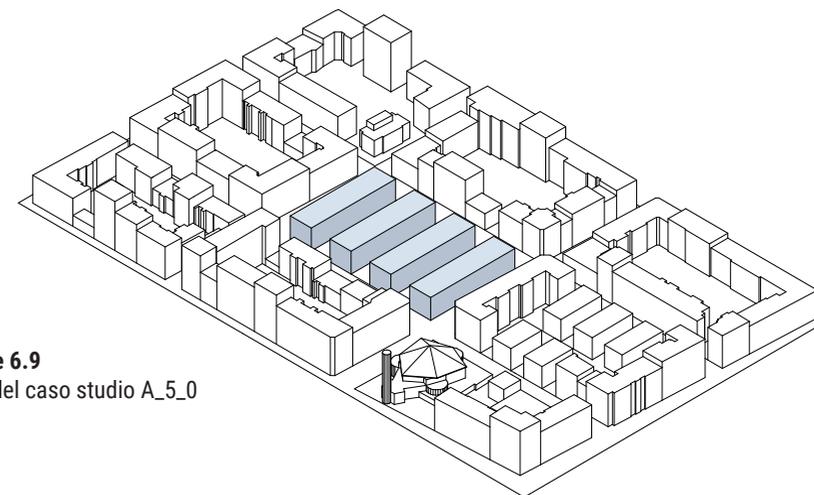


Immagine 6.9
Modello del caso studio A_5_0

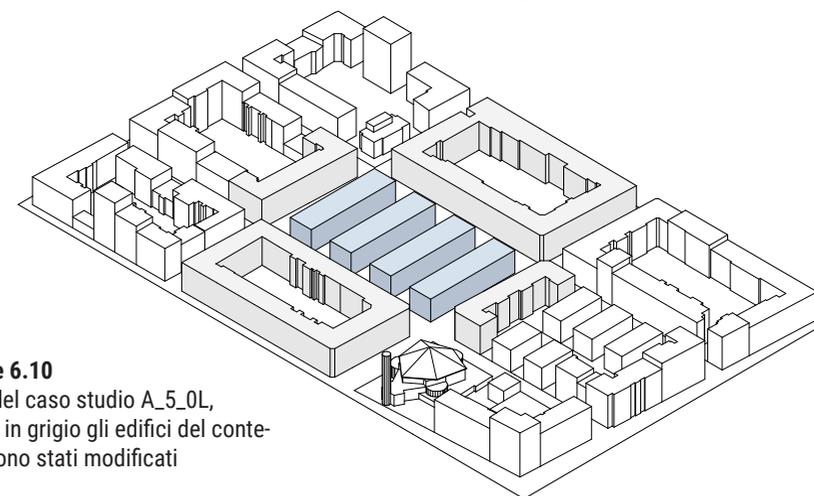


Immagine 6.10
Modello del caso studio A_5_0L,
evidenziati in grigio gli edifici del conte-
sto che sono stati modificati

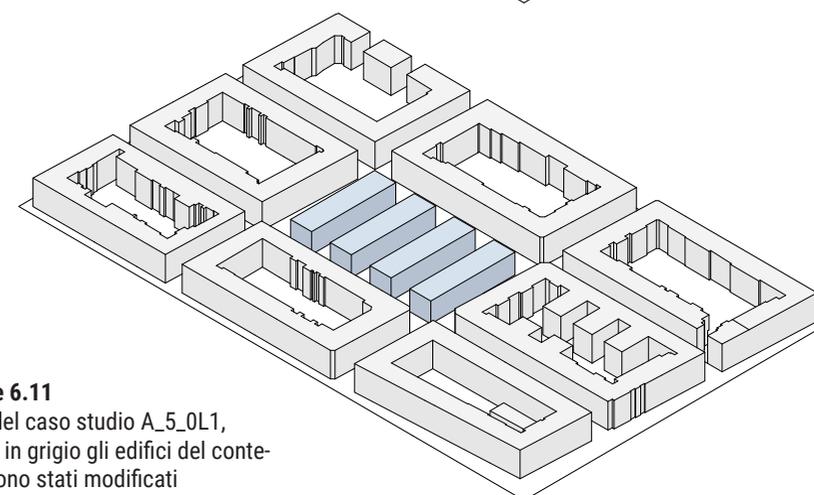


Immagine 6.11
Modello del caso studio A_5_0L1,
evidenziati in grigio gli edifici del conte-
sto che sono stati modificati

6.4.4 Modello acustico: sorgenti

Le sorgenti acustiche del modello riproducono il rumore da traffico nelle vie che delimitano l'isolato analizzato. Si tratta quindi di quattro sorgenti posizionate a centro strada rispettivamente in quelle che sono Via Pigafetta, Via Vespucci, Via Giovanni da Verrazzano e Via Caboto; le sorgenti si estendono per tutta la lunghezza del modello in modo da considerare anche l'apporto ai livelli acustici del rumore del traffico lontano che viene diffuso per diffrazione fra i canyon urbani e i cortili degli edifici.

Per la modellazione delle sorgenti sono stati utilizzati degli arrays lineari di sorgenti puntuali configurati secondo le indicazioni riportate dal manuale operativo di Odeon [manuale odeon] e utilizzando uno spettro acustico relativo al rumore di traffico a velocità coerenti con la tipologia di strade (Tabella 6.1). [107; 108; 109]

Spettro acustico sorgenti simulazione.

Frequenza [Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Spettro sonoro [dB]	79,0	76,0	72,0	77,0	79,0	77,0	66,0	60,0

Tabella 6.1 Spettro acustico traffico da Gjestland, 2008 [107].

Sebbene sia preferibile l'utilizzo di una sorgente lineare per la simulazione del rumore da traffico, l'utilizzo di arrays lineari composti da sorgenti puntuali (Immagine 6.12) è stato dettato da una limitazione di Odeon che, nel caso delle simulazioni lineari, non calcola la diffrazione ai bordi, prerequisito fondamentale per l'analisi svolta [85].

Questa limitazione è stata verificata svolgendo delle simulazioni di prova del caso base dell'isolato esistente, confrontando i risultati fra sorgente lineare e array e constatando che il l'apporto al livello di pressione sonora derivante da onde diffratte per i ricevitori schermati all'interno del cortile era nullo nel caso delle sorgenti lineari.

A causa dell'impossibilità di svolgere misurazioni sul campo per calibrare realisticamente il modello, le sorgenti sono state calibrate facendo riferimento alle indicazioni presenti in letteratura [85; 108; 109], utilizzando le formule di conversione della potenza delle sorgenti proposte nel manuale di Odeon e calibrando i risultati utilizzando come riferimento i livelli riportati nelle mappature del rumore dell'ARPA [106].

Sebbene questo approccio non possa essere raccomandato per la corrispondenza del modello alle condizioni reali del contesto, il modello dovrebbe essere

sufficientemente realistico ed accurato da consentire il confronto relativo fra le ipotesi morfologiche studiate e l'isolato esistente, in quanto condividono le stesse impostazioni e lo stesso modello acustico. In questo modo non possono essere tratte delle conclusioni circa l'applicazioni di interventi al contesto reale specifico, ma possono essere tratte delle conclusioni relative sulle differenze fra le diverse configurazioni studiate e i loro effetti.

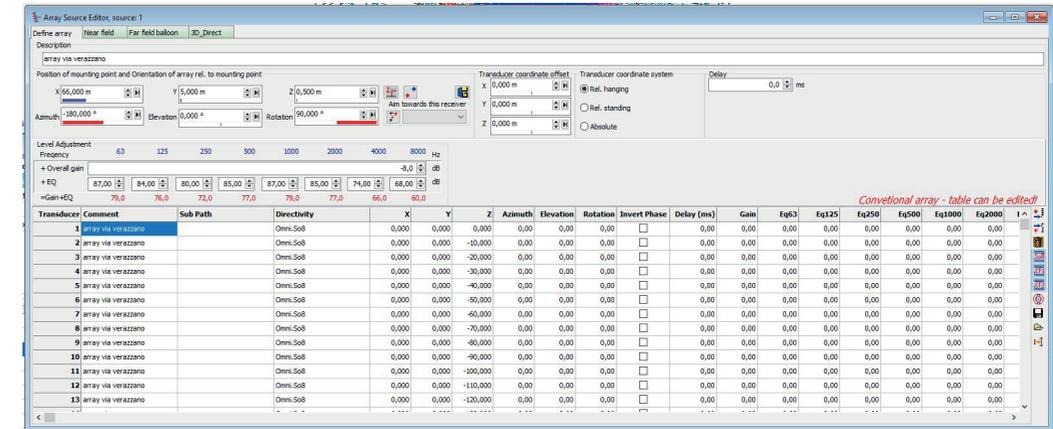


Immagine 6.12 Screenshot delle impostazioni delle sorgenti array.

6.4.4 Modello acustico: ricevitori

Per la raccolta dei livelli nelle simulazioni sono stati utilizzati due sistemi di ricevitori.

Sono state utilizzate le griglie colore di Odeon, che creano automaticamente una griglia di ricevitori, secondo dei parametri impostati dall'utente, in base alle superfici nel modello che si vogliono utilizzare. I dati di queste grids vengono restituiti sotto forma di mappatura colorata dei livelli, secondo una scala di colori corrispondente ai diversi valori del parametro misurato (Immagine 6.13). Questo consente una visualizzazione e una lettura dei risultati molto immediata e di facile comprensione, molto utile in ambito architettonico in cui è molto importante una restituzione grafica di facile comprensione, anche per personale senza una formazione acustica specifica.

Le scale e il range di colore delle mappature sono uniformi, in modo da poter confrontare visivamente i risultati delle diverse simulazioni.

Inoltre, in una nota per possibili applicazioni, la mappatura applicata direttamente sulle superfici utilizzate potrebbe essere molto utile nello sviluppo parametrico di superfici responsive tramite processi di computational design.

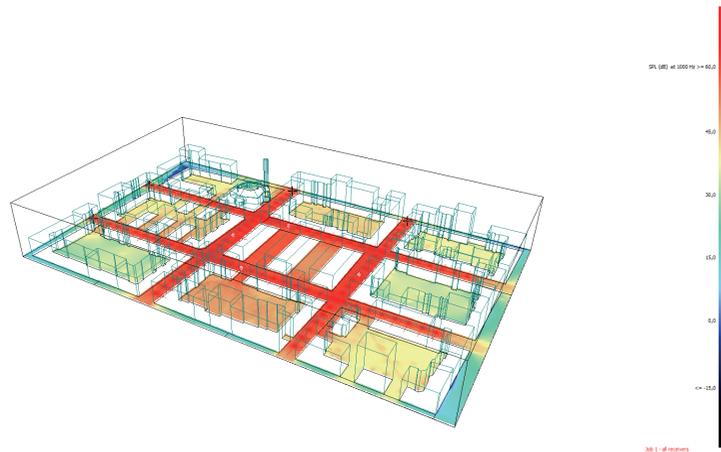


Immagine 6.13 Esempio di mappatura colorata dei livelli.

Il secondo metodo utilizzato consiste nell'uso di singoli ricevitori puntuali che restituiscono i dati in forma numerica. Per la disposizione dei ricevitori è stata sviluppata una griglia che consentisse di rispettare le distanze dalle facciate e che garantisse nella maggior parte possibile di casi una posizione dei ricevitori uguale nelle diverse configurazioni morfologiche.

I ricevitori sono stati suddivisi fra ricevitori delle facciate esterne, affacciate sulle vie, e fra ricevitori delle facciate interne, affacciate sugli spazi interni all'isolato.

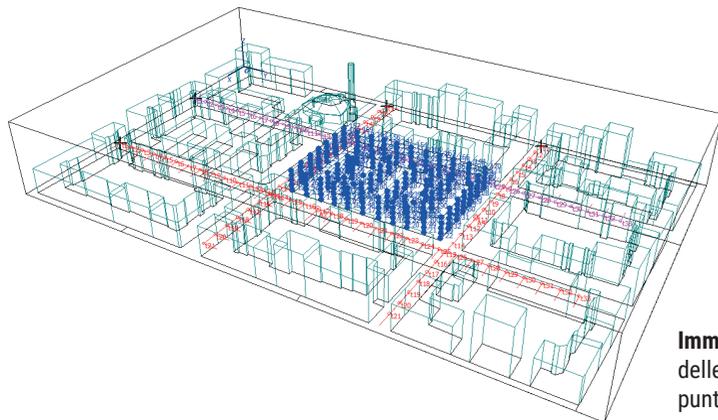


Immagine 6.14 Le griglie di ricevitori delle facciate e gli array di sorgenti puntuali nel modello.

I ricevitori in facciata devono essere posizionati ad una distanza compresa fra 30cm e 120cm dalla facciata e nel caso dei sei nuovi isolati simulati la distanza è costante a 60cm dalla facciata. Le griglie sono state sviluppate in maniera da non avere una distanza superiore a 10m fra ogni ricevitore e in modo da avere ricevitori in corrispondenza di ogni spigolo degli edifici. La griglia di ricevitori si ripete per ogni piano degli edifici, ad una quota di 1,65m dal piano di calpe-

stio, considerata come altezza media dell'orecchio umano.

I ricevitori delle facciate esterne sono sempre disposti sulla stessa griglia fatta eccezione per due casi: il caso dell'isolato esistente, che mantiene lo stesso passo della griglia ma con posizioni leggermente diverse a causa della forma irregolare, che impediva di rispettare la distanza dalle facciate con la griglia normale, e nel caso dell'isolato A_5, dove era impossibile mantenere la distanza dalle facciate e dagli spigoli degli edifici (Immagine 6.15).

Nel caso delle facciate e dei ricevitori interni agli isolati, al piano terra è stata utilizzata una griglia specifica per ogni soluzione, per poter mantenere i parametri e le distanze richiesti.

Infine è stata inserita una serie di ricevitori benchmark all'interno degli isolati che mantiene sempre la stessa posizione, in questo modo la loro posizione è uguale in ogni isolato anche se differisce in termini di posizione relativa rispetto ai singoli edifici (la sua posizione non è quindi equidistante da spigoli e facciate, ma è uguale per tutti i casi in termini assoluti rispetto all'isolato).

Per la nomenclatura dei ricevitori si è adottata una sigla alfanumerica che indica facciata, posizione sulla griglia, e numero del piano di ogni ricevitore, questa è fondamentale per riordinare in seguito i dati dei diversi ricevitori per fini di analisi (Immagine 6.16).

Griglie ricevitori

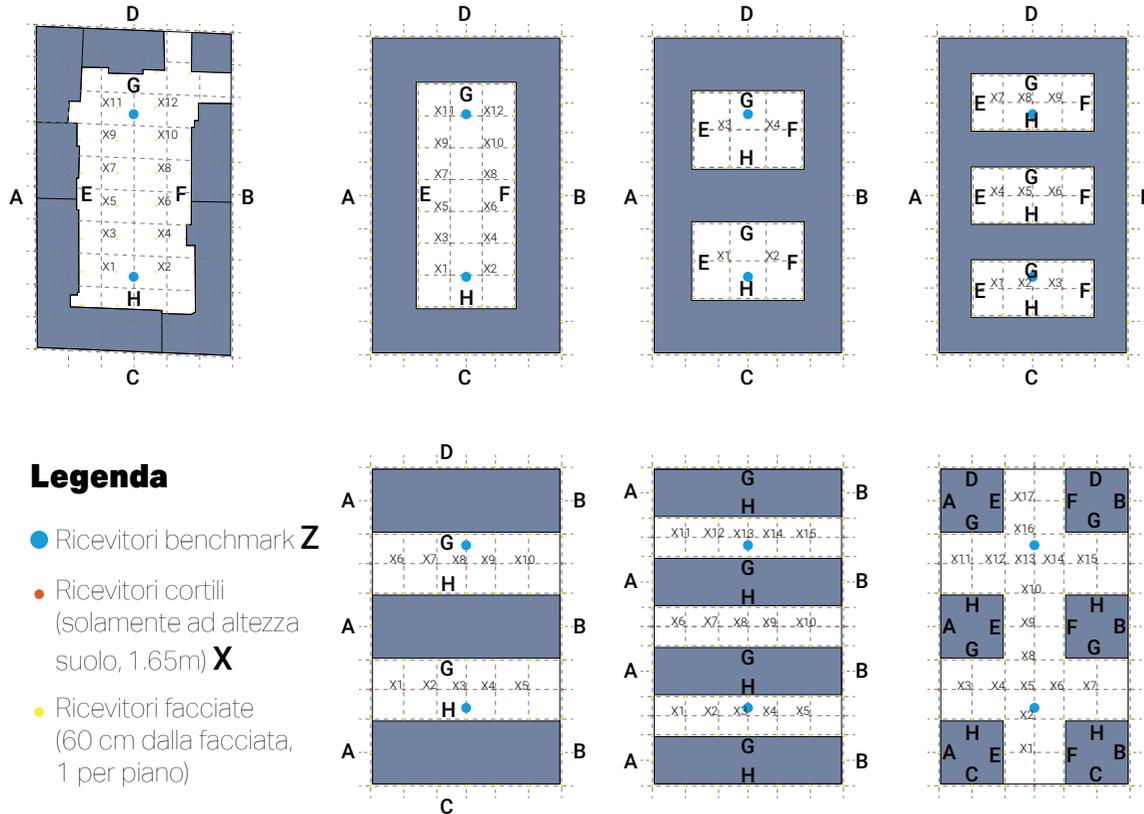


Immagine 6.15
Le griglie utilizzate per la disposizione dei ricevitori puntuali in facciata e all'interno dei cortili.

Sigle identificative ricevitori

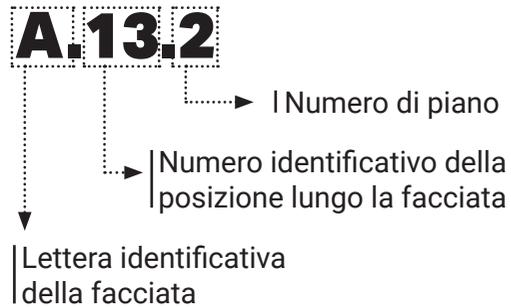


Immagine 6.16
Legenda di lettura delle sigle identificative.

6.4.4 Modello acustico: materiali e coefficienti

I materiali e i coefficienti utilizzati nel modello sono stati scelti in modo da restituire una simulazione aderente al contesto urbano (Tabella 6.2). Nello specifico, per quanto riguarda i materiali corrispondenti ai due valori di assorbimento usati in facciata, sono stati utilizzati valori corrispondenti a una facciata in mattoni liscia, piuttosto comune in città. Per quanto riguarda la configurazione ad alto assorbimento sono stati utilizzati i coefficienti relativi ad una parete vegetata [54], in quanto la soluzione più semplice e attualmente più realistica per il trattamento acustico di ampie superfici in facciata. I coefficienti di assorbimento vengono inseriti con valori pesati per bande d'ottava di frequenza mentre il coefficiente di scattering viene inserito come valore unico, in quanto Odeon non consente di inserire valori per frequenza e provvede automaticamente a pesare il coefficiente singolo per le diverse frequenze. I coefficienti di scattering sono stati selezionati in funzione dell'uso di solidi semplici per i volumi degli edifici, in modo da considerare l'effetto diffusivo che avrebbero avuto i dettagli delle facciate e delle coperture se fossero stati modellati.

Il perimetro del modello che rappresenta lo spazio libero al di sopra degli edifici viene modellato come una superficie completamente assorbente, in modo che nella simulazione i raggi diretti verso l'alto non vengano riflessi. Bisogna sottolineare che l'applicazione di materiale assorbente o diffusivo in maniera così estesa alle facciate non è molto realistica quando si considerano altri aspetti di progettazione, di fattibilità o economici, tuttavia permette di trarre delle conclusioni sugli effetti di un eventuale ambiente urbano in cui l'acustica ambientale viene trattata in maniera estensiva tramite la progettazione delle superfici, e sugli effetti delle diverse soluzioni morfologiche in maniera da poter successivamente sviluppare soluzioni reali più efficaci ed efficienti. Allo stesso modo l'applicazione di una soluzione con alti valori di scattering e di assorbimento è improbabile, tuttavia fornisce utili indizi sugli effetti dei diversi parametri applicati nei casi simulati.

Coefficienti acustici materiali

	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	Medio	Scattering	Ref. Materiale
perimetro modello	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	-
asfalto	0.02	0.02	0.03	0.03	0.03	0.033	0.02	0.05	0.05	0.07	[111]
coperture	0.03	0.03	0.03	0.03	0.04	0.04	0.07	0.07	0.05	0.5	[110]
facciate basso assorbimento basso scattering	0.05	0.05	0.04	0.04	0.04	0.05	0.05	0.05	0.05	0.1	[21]
facciate basso assorbimento alto scattering	0.05	0.05	0.04	0.04	0.04	0.05	0.05	0.05	0.05	0.5	[21]
facciate vegetate basso scattering	0.85	0.85	0.83	0.7	0.68	0.68	0.66	0.66	0.74	0.1	[54]
facciate vegetate alto scattering	0.85	0.85	0.83	0.7	0.68	0.68	0.66	0.66	0.74	0.5	[54]

Tabella 6.2 coefficienti acustici di assorbimento e scattering utilizzati per le superfici dei modelli usato per le simulazioni.

6.4.4 Modello acustico: impostazioni simulazione

Le simulazioni sono state svolte utilizzando una lunghezza di risposta d'impulso di 8 secondi (8000ms), selezionata come indicato dal manuale del software secondo i risultati della simulazione "global estimate". [85]

Anche per quanto riguarda il settaggio dei "number of late rays" si sono seguite le indicazioni da manuale del software, aumentando il valore rispetto al numero di raggi suggerito di default da Odeon, fino a raggiungere un valore che consentisse di ottenere curve di decadimento senza sbalzi e flessioni irregolari [85]. Per le simulazioni è stata usata un'impostazione di 6500 late rays (Immagine 6.17).

Per svolgere le simulazioni è stata attivata l'opzione per calcolare la screen diffraction in modo da tenere conto dei fenomeni di diffrazione ai bordi fondamentali per un'analisi accurata in ambiente urbano.

Le altre impostazioni di dettaglio sono state lasciate ai loro settaggi di default suggeriti dal programma.

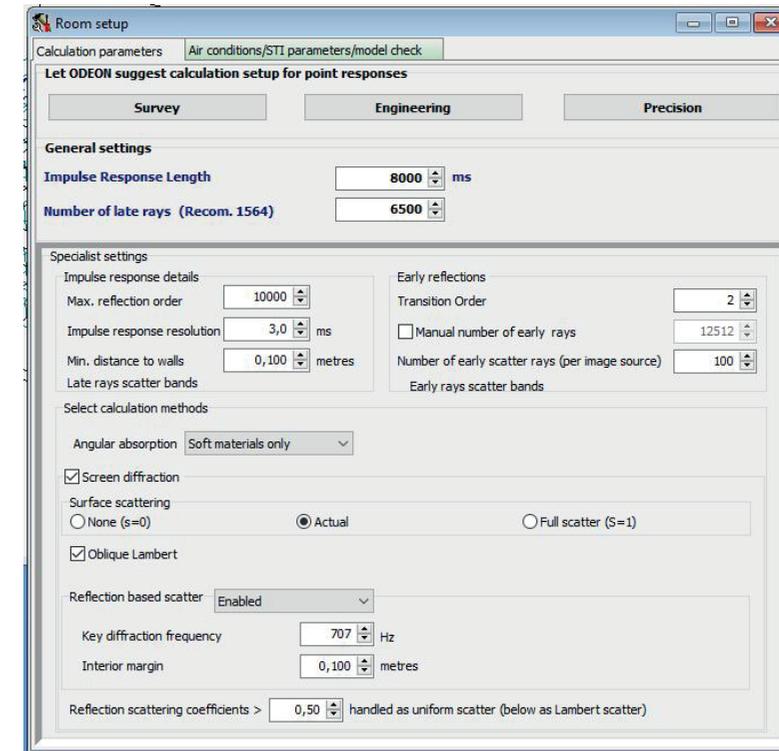


Immagine 6.17 Screenshot delle impostazioni di Room Setup di Odeon utilizzate per le simulazioni.

6.4.4 Simulazione di verifica del calcolo della diffrazione

Per confermare il funzionamento del calcolo della diffrazione di Odeon sono state effettuate due simulazioni di verifica, rispettivamente sui modelli A_0_0 e A_5_0, ovvero il modello dell'isolato esistente con la configurazione base di coefficienti e il modello dell'isolato scelto per le altre simulazioni di verifica. Le simulazioni sono eseguite con gli stessi modelli acustici dei due casi selezionati ma disattivando il calcolo della diffrazione ai bordi nelle impostazioni di Odeon (indicato come screen diffraction) (Immagine 6.18).

I suoi modelli acustici utilizzati per la verifica sono stati identificati come A_0_0_ND e come A_5_0_ND e i risultati sono stati confrontati con quelli dei modelli di partenza A_0_0 e A_5_0.

Osservando le mappature in scala di colore ottenute dalle simulazioni senza diffrazione (Immagine 6.21; Immagine 6.22), a confronto con i due casi corrispondenti in cui la diffrazione è invece considerata (Immagine 6.19; Immagine 6.21), si può facilmente notare come il fenomeno di diffrazione ai bordi sia responsabile di una significativa differenza nei livelli acustici, causando una maggiore propagazione del suono e di conseguenza livelli di pressione sonora

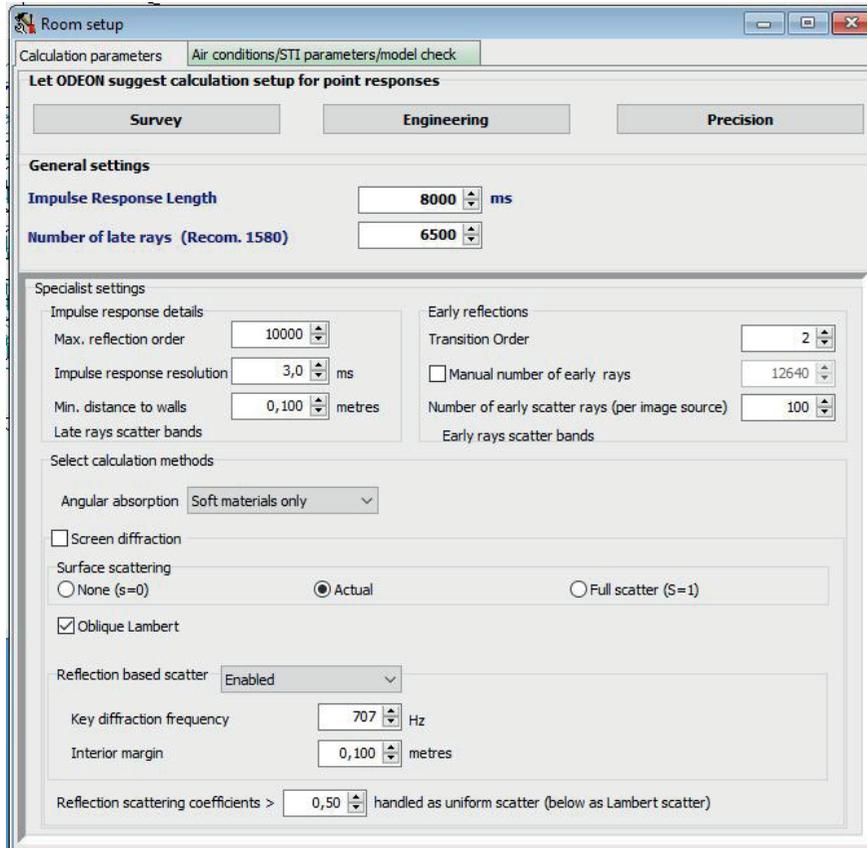


Immagine 6.18 Screenshot delle impostazioni di Room Setup di Odeon utilizzate per le simulazioni di verifica senza il calcolo della diffrazione ai bordi (riquadro evidenziato)

maggiori.

In particolare questo risulta evidente negli spazi che non sono direttamente esposti alle sorgenti come i cortili o gli spazi immediatamente a ridosso di spigoli o di edifici che li schermano dalle sorgenti. Si può notare come questo impatti anche la diffusione del suono all'interno di spazi parzialmente aperti come nel caso di alcuni cortili presenti nel contesto o come nel caso dell'isolato A_5_0.

Questo confronto conferma l'importanza della valutazione dei fenomeni di diffrazione nelle simulazioni in ambito urbano, e conferma che il metodo utilizzato considera effettivamente un apporto significativo nella propagazione dalle sorgenti legato a questo fenomeno.

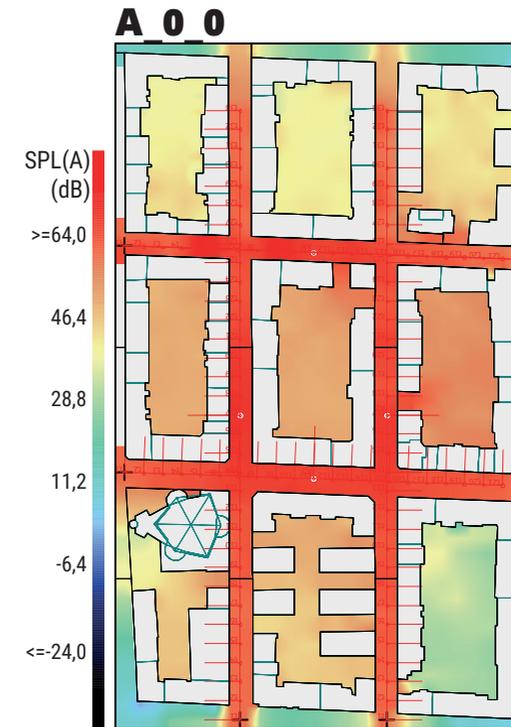


Immagine 6.19 Color grid simulazione A_0_0, con calcolo della diffrazione ai bordi.

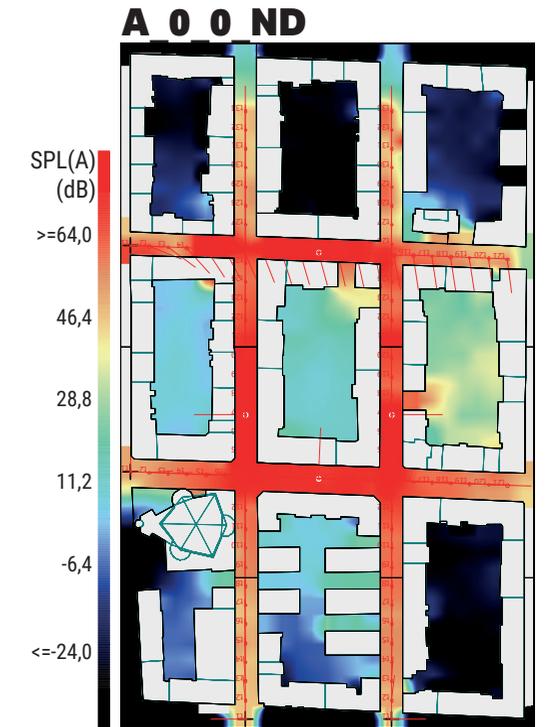


Immagine 6.20 Color grid simulazione A_0_0_ND, senza calcolo della diffrazione ai bordi.

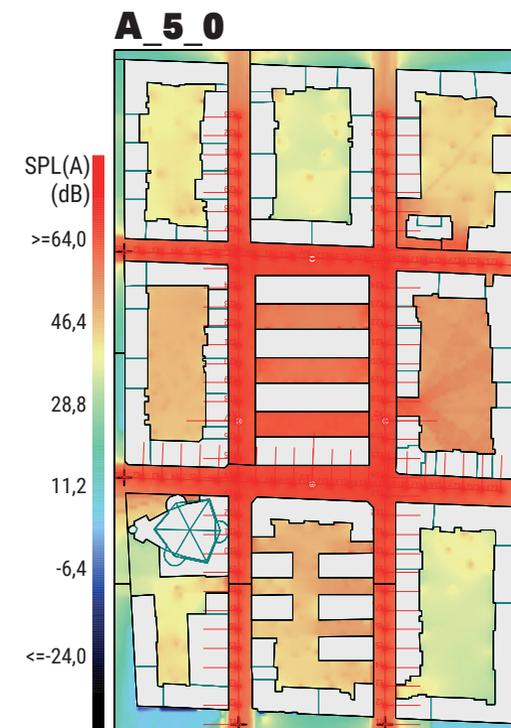


Immagine 6.21 Color grid simulazione A_5_0, con calcolo della diffrazione ai bordi.

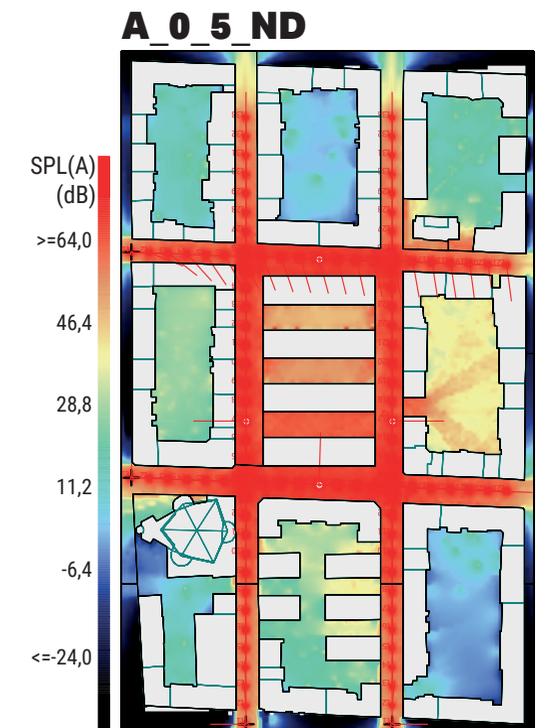


Immagine 6.22 Color grid simulazione A_5_0_ND, senza calcolo della diffrazione ai bordi.

6.4.5 Modello acustico: esportazione e gestione dati

I valori di ogni parametro, simulati da Odeon per ogni ricevitore puntuale, vengono forniti sotto forma di file di testo (formato .txt) formattato in modo da poter essere copiato e incollato all'interno di fogli di calcolo.

Come si può vedere nell'Immagine 6.23 i dati sono riportati secondo l'ordine di numerazione dei ricevitori all'interno del modello, per ogni ricevitore vengono poi elencati i valori di tutti i parametri, suddivisi per bande di un terzo d'ottava, formattati per righe e colonne.

La numerazione dei ricevitori nel modello viene definita automaticamente da odeon in funzione della posizione cartesiana dei ricevitori all'interno del modello tridimensionale.

```

Point response energy parameters for job 1
Receiver Number: 1 A.1.0 (x,y,z) = (74.341; 140.809; 1.650)
ReceiverPosition in metres 74.341 140.809 1.650
Param, simulated 63 125 250 500 1000 2000 4000 8000
T(30) 2.19 17.7 2.15 15.3 2.09 5.8 2.12 7.9 2.09 8.7 1.82 3.3 1.50 0.83 1.1
XI(T(30)) 66.1 62.2 47.8 59.9 45.4 62.2 64.7 50.8 62.2 50.7 52.9 39.1 41.1 32.7
SPL 68.0 63.4
SPL(Direct) 68.0 63.4
SPL(Average) 63.4
Point response energy parameters for job 1
Receiver Number: 2 A.2.0 (x,y,z) = (74.341; 151.409; 1.650)
ReceiverPosition in metres 74.341 151.409 1.650
Param, simulated 63 125 250 500 1000 2000 4000 8000
T(30) 2.14 21.5 2.13 20.7 2.17 15.0 1.99 13.1 1.93 11.4 1.77 8.9 1.39 0.80 4.0
XI(T(30)) 65.2 62.7 49.6 59.9 47.8 62.8 49.7 65.9 63.4 49.4 53.6 41.3 43.6 35.9
SPL 69.1 64.4
SPL(Direct) 69.1 64.4
SPL(Average) 64.4
Point response energy parameters for job 1
Receiver Number: 3 A.3.0 (x,y,z) = (74.341; 162.009; 1.650)
ReceiverPosition in metres 74.341 162.009 1.650
Param, simulated 63 125 250 500 1000 2000 4000 8000
T(30) 2.50 2.32 2.62 2.81 2.80 1.87 1.46 0.85 5.7
XI(T(30)) 66.3 64.6 45.8 61.0 57.3 63.9 74.5 67.0 67.0 64.6 15.3 54.8 22.7 44.5
SPL 70.3 50.1 51.8 46.3 52.3 53.7 53.1 42.8 34.6
SPL(Direct) 70.3 50.1 51.8 46.3 52.3 53.7 53.1 42.8 34.6
SPL(Average) 65.5
    
```

Immagine 6.23 l'organizzazione del file di testo con i dati di Odeon.

Per poter analizzare la grande quantità di dati era necessario poter formattare e ordinare i dati secondo le necessità del lavoro di analisi e secondo le griglie sviluppate per poter dividere i ricevitori in funzione di facciata e numero di piano, e la formattazione standard dei dati forniti da odeon non consentiva di utilizzare processi di selezione e formattazione automatici presenti in excel.

Sono stati quindi sviluppati due algoritmi, scritti in linguaggio Python, per estrarre i dati dai file di testo di Odeon e riordinarli all'interno di un foglio di calcolo Excel, ordinando i dati in funzione delle informazioni di facciata, numero piano e posizione sulla griglia, riportate all'interno del nome identificativo di

Sigle identificative ricevitori

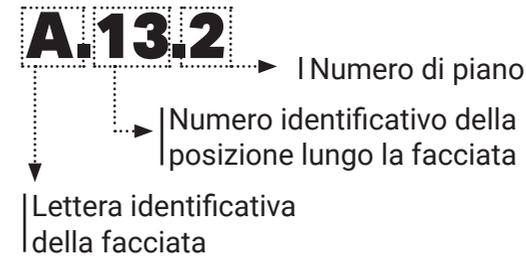


Immagine 6.25 Legenda di lettura delle sigle identificative.

ogni ricevitore (Immagine 6.25).

Il primo script riportato nell'Immagine 6.26 è stato utilizzato per ottenere i valori di SPL relativi alle frequenze in bande d'ottava, l'algoritmo si limita a prelevare i dati rilevanti all'interno del file di testo e a trascriverli in un foglio di calcolo suddividendo i dati relativi alle varie frequenze in colonne, come si può vedere nell'Immagine 6.28.

Il secondo script utilizzato (Immagine 6.29) serve invece ad estrarre i valori del livello di pressione sonora ponderata SPL(A), in questo caso l'output excel è più semplice in quanto il valore ponderato non è riportato per bande di frequenza. Per poter utilizzare gli script è stato prima necessario cancellare alcune delle righe iniziali e finali dei file di testo che riportano le informazioni relative alle sorgenti nel modello e altre formattazioni degli stessi dati non rilevanti per l'analisi. Una volta estrapolati i dati dai file di testo e importati all'interno di fogli di calcolo le successive fasi di manipolazione dei dati e di analisi sono state svolte con normali fogli di calcolo Excel.

	A	B	C	D	E
1	Parametro	value	ricevitore		
2	SPL(A)	68	A.1.0		
3	SPL(A)	68.4	A.1.1		
4	SPL(A)	67.8	A.1.2		
5	SPL(A)	67.5	A.1.3		
6	SPL(A)	65.3	A.1.4		
7	SPL(A)	65.2	A.10.0		
8	SPL(A)	64.1	A.10.1		
9	SPL(A)	64.1	A.10.2		
10	SPL(A)	63.3	A.10.3		
11	SPL(A)	62	A.10.4		
12	SPL(A)	67.5	A.11.0		

Immagine 6.24 Immagine N: la struttura del foglio di calcolo ottenuto dallo script con i valori del parametro SPL(A).

Immagine 6.26 Immagine N: script estrapolazione dati SPL in bande d'ottava.

```

1 import pandas as pd
2 import numpy as np
3
4 file = "A1.Job001.000001.txt"
5 nome_file_excel = "A.1.0.xlsx"
6
7 colonne = ['Parametro',
8           '63',
9           '125',
10          '250',
11          '500',
12          '1000',
13          '2000',
14          '4000',
15          '8000',
16          'ricevitore']
17
18 test = False
19 test1 = False
20 test2 = True
21 data = []
22 DATA = []
23 with open(file) as my_file:
24     for line in my_file:
25         #print(line)
26         line = line.strip("\n")
27         if not line:
28             continue
29         if line[15]=="Receiver Number":
30             test = True
31             #name, value = line.split(':')
32             ricevitore = line[16:28]
33             for i in ricevitore:
34                 if i not in "ABCDEFGHJKLMNPQRSTUWXYZ":
35                     ricevitore = ricevitore[1:]
36                 else:
37                     break
38
39             #data[name].append(value)
40             #break
41             if "Param, simulated" in line:
42                 continue
43             if "ReceiverPosition" in line:
44                 test1 = True
45                 continue
46             if "Point response energy parameters for job i" in line:
47                 test2 = True
48                 continue
49             if "X1(I(30))" in line or "I(30)" in line or "SPL(Lin)" in line or "SPL(C)" in line or "ED(Average)" in line or "I(30_Average)" in line:
50                 continue

```

Immagine 6.27 Immagine N: script estrapolazione dati SPL in bande d'ottava.

```

51 if test and test1 and test2:
52     value=line.split('\t')
53     value.append(ricevitore)
54     data.append(value)
55     test = False
56     test1 = False
57     test2 = False
58
59 Data= np.array(data)
60 print(Data)
61
62 df = pd.DataFrame(Data, columns = colonne)
63 df.set_index(df["Parametro"], inplace = True)
64 del df["Parametro"]
65 df.to_excel(nome_file_excel)
66

```

Immagine 6.28 Immagine N: foglio di calcolo prodotto dallo script per i dati di SPL in frequenze.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	Parametro	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	ricevitore
2	SPL	65.1	60.7	58.9	61.7	63.8	61.2	52	40.8	A.1.0
3	SPL	65.2	61.6	59.2	62.6	64.7	62.2	52.4	41.6	A.1.1
4	SPL	64.8	61.5	59.1	62.5	64	61.4	51.8	41.2	A.1.2
5	SPL	65.4	62	59.7	63	64.4	62	51.8	40.8	A.1.3
6	SPL	62.1	59	56.5	59.7	61	58.6	49.2	37.6	A.1.4
7	SPL	61.6	60.1	57	61.2	62.1	59.7	48.4	36.3	A.10.0
8	SPL	61.1	58.5	56.7	59.2	60.7	58.2	47	34	A.10.1
9	SPL	60.1	58.7	55.7	59.7	60.5	58.1	47.4	34.2	A.10.2
10	SPL	59.4	58.5	54.7	59.1	59.6	57.9	46.8	33	A.10.3
11	SPL	57.9	55.8	52.6	56.6	58.5	55.8	44	31.2	A.10.4
12	SPL	64.5	62.3	58.5	63	64	62	51.3	40	A.11.0
13	SPL	64.2	62.4	58.8	62.3	63.8	61.1	51.2	38.8	A.11.1

Immagine 6.29 Immagine N: script estrapolazione dati SPL(A).

```

1 import pandas as pd
2 import numpy as np
3
4 file = "A1.Job01.00001.txt"
5 nome_file_excel = "A_1_1_SPLa.xlsx"
6
7 colonne = ['Parametro',
8           'value',
9           'ricevitore']
10
11 test = False
12 test1 = False
13 test2 = True
14 data = []
15 DATA = []
16 with open(file) as my_file:
17     for line in my_file:
18         #print(line)
19         line = line.strip("\n") # clean up whitespace and # for lines
20         if not line:          # skip empty lines
21             continue
22         if line[15]=="Receiver Number":
23             test = True
24             #name, value = line.split(":")
25             ricevitore = line[16:28]
26             for i in ricevitore:
27                 if i not in "ABCDEFGHIJKLMNPOQRSTUVWXYZ":
28                     ricevitore = ricevitore[1:]
29             else:
30                 break
31

```

Immagine 6.30 Immagine N: script estrapolazione dati SPL(A).

```

32 #data[name].append(value)
33 #break
34 if "Param, simulated" in line:
35     continue
36 if "ReceiverPosition" in line:
37     test1 = True
38     continue
39 if "Point response energy parameters for job 1" in line:
40     test2 = True
41     continue
42
43 if "SPL(A)" in line and test and test1 and test2 :
44     value=line.split('\t')
45     value.append(ricevitore)
46     data.append(value)
47     test = False
48     test1 = False
49     test2 = False
50 else:
51     continue
52
53
54 Data= np.array(data)
55 #print(Data)
56
57 df = pd.DataFrame(Data, columns = colonne)
58 df.set_index(df["Parametro"], inplace = True)
59 del df["Parametro"]
60 df.to_excel(nome_file_excel)

```

Analisi risultati e | 07
discussione

7.1 Confronto mappature in scala colore

Le mappature in scala di colore del livello di pressione sonora (SPL) vengono esportate direttamente da Odeon senza necessità di lavorazioni aggiuntive fornendo quindi un primo sguardo d'insieme ai risultati delle simulazioni, immediato da un punto di vista della lettura e della disponibilità.

I livelli misurati dalle grids sono rilevati ad un'altezza di 1,65m dalla quota del piano stradale, ovvero all'altezza utile per un ascoltatore a livello pedonale.



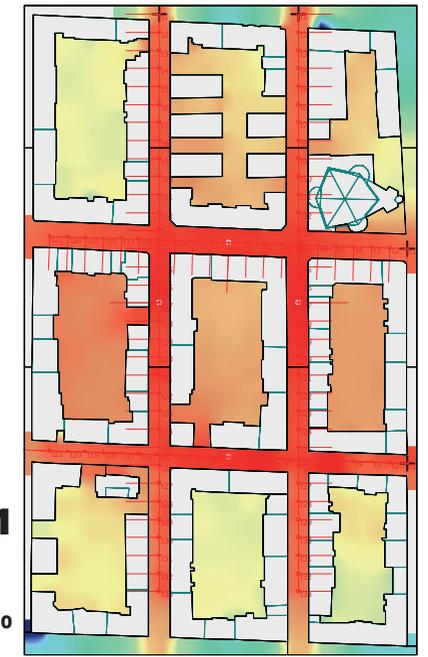
A_0_0

Immagine 7.1

A_0_0

Coefficiente assorbimento: **basso**

Coefficiente scattering: **basso**



A_0_1

Immagine 7.3

A_0_1

Coefficiente assorbimento: **basso**

Coefficiente scattering: **alto**



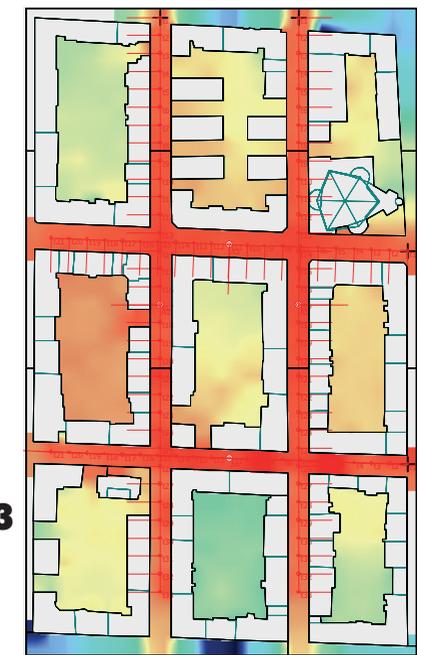
A_0_2

Immagine 7.2

A_0_0

Coefficiente assorbimento: **alto**

Coefficiente scattering: **basso**



A_0_3

Immagine 7.4

A_0_1

Coefficiente assorbimento: **alto**

Coefficiente scattering: **alto**



Immagine 7.5 A_1_0
Coefficiente assorbimento: **basso**
Coefficiente scattering: **basso**



Immagine 7.6 A_1_1
Coefficiente assorbimento: **basso**
Coefficiente scattering: **alto**

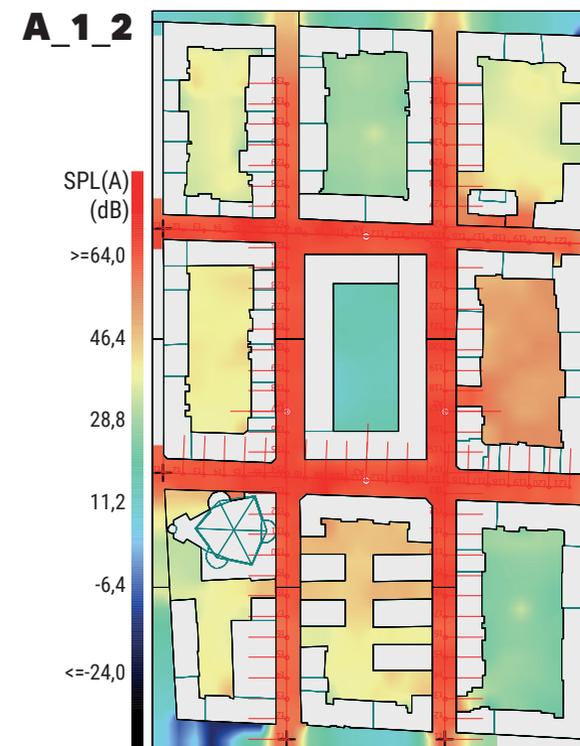


Immagine 7.9 A_1_2
Coefficiente assorbimento: **alto**
Coefficiente scattering: **basso**

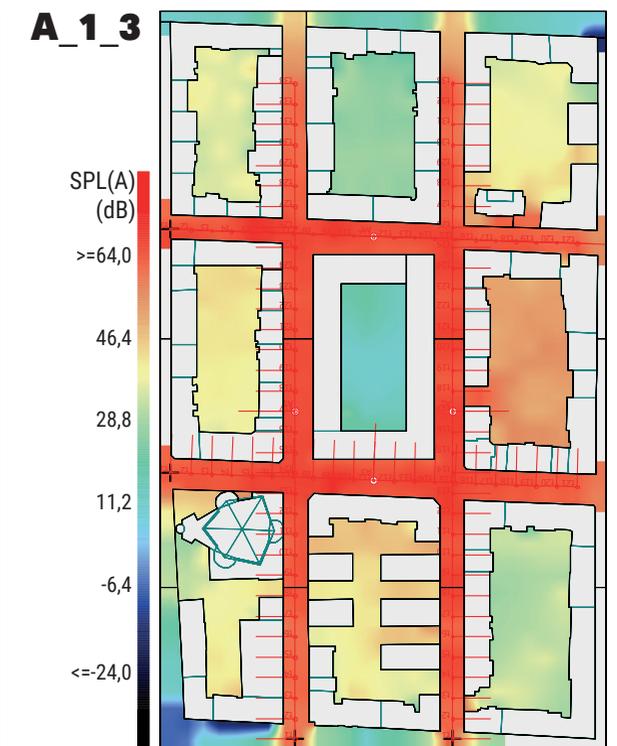


Immagine 7.10 A_1_3
Coefficiente assorbimento: **alto**
Coefficiente scattering: **alto**

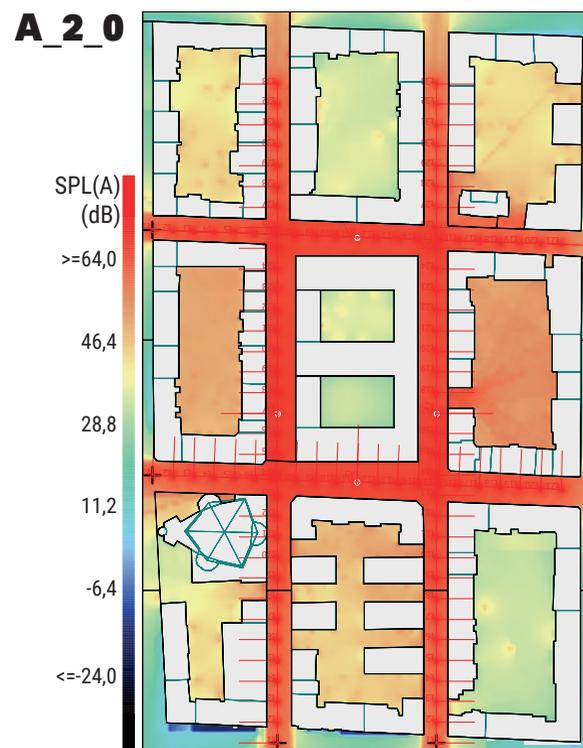


Immagine 7.7 A_1_0
Coefficiente assorbimento: **basso**
Coefficiente scattering: **basso**



Immagine 7.8 A_1_1
Coefficiente assorbimento: **basso**
Coefficiente scattering: **alto**



Immagine 7.11 A_1_2
Coefficiente assorbimento: **alto**
Coefficiente scattering: **basso**

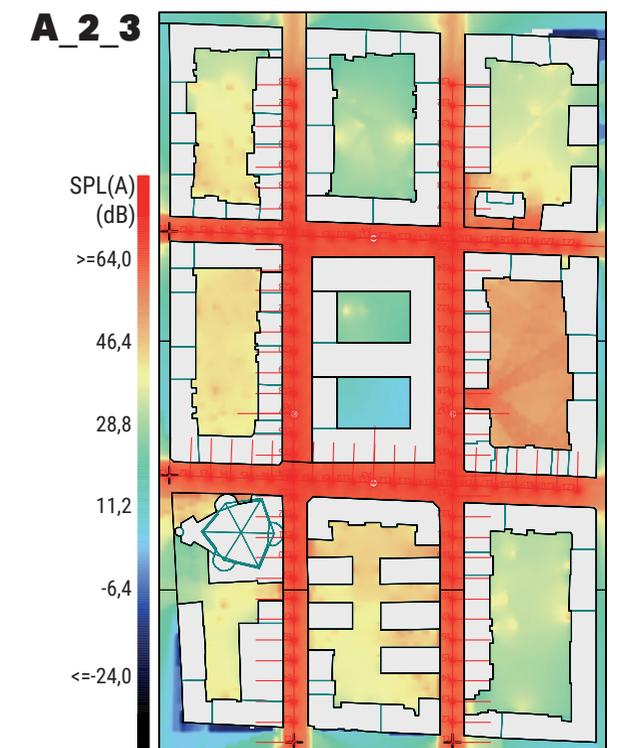


Immagine 7.12 A_1_3
Coefficiente assorbimento: **alto**
Coefficiente scattering: **alto**



Immagine 7.13 A_3_0
Coefficiente assorbimento: **basso**
Coefficiente scattering: **basso**



Immagine 7.15 A_3_1
Coefficiente assorbimento: **basso**
Coefficiente scattering: **alto**

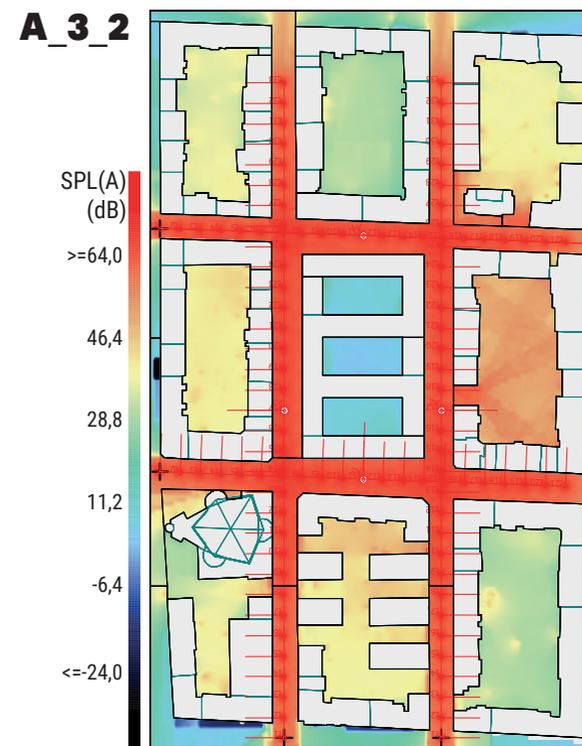


Immagine 7.17 A_3_2
Coefficiente assorbimento: **alto**
Coefficiente scattering: **basso**

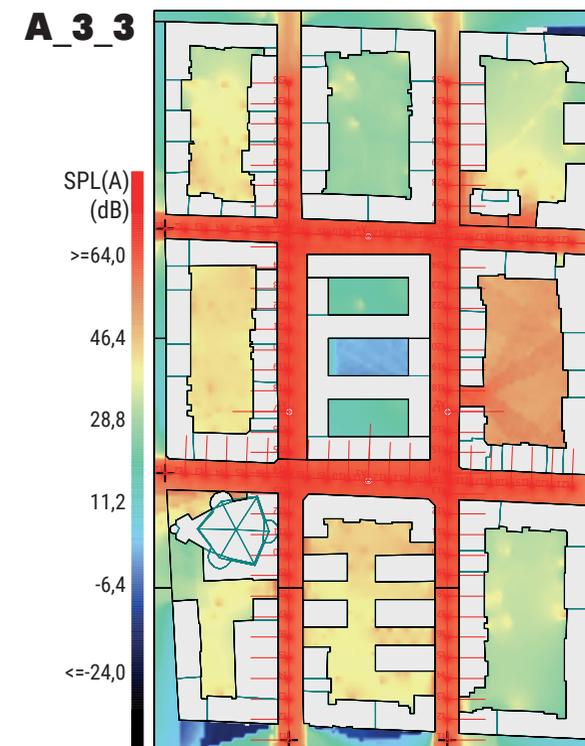


Immagine 7.19 A_3_3
Coefficiente assorbimento: **alto**
Coefficiente scattering: **alto**



Immagine 7.14 A_4_0
Coefficiente assorbimento: **basso**
Coefficiente scattering: **basso**

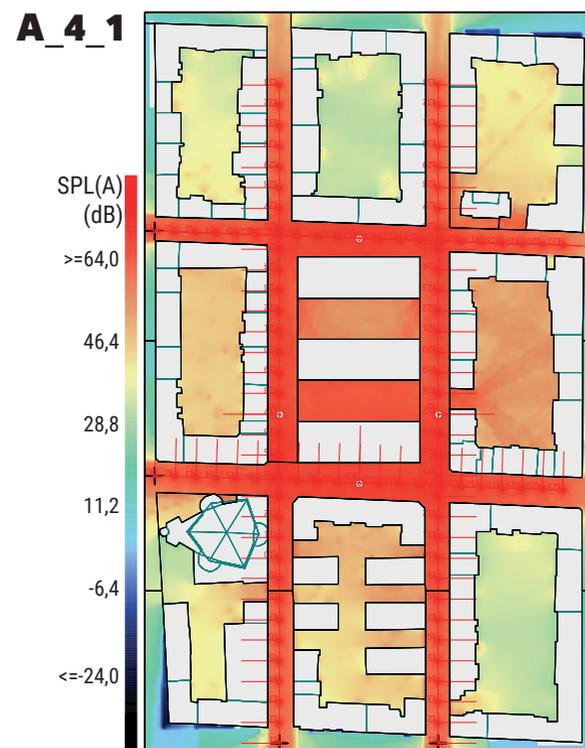


Immagine 7.16 A_4_1
Coefficiente assorbimento: **basso**
Coefficiente scattering: **alto**



Immagine 7.18 A_4_2
Coefficiente assorbimento: **alto**
Coefficiente scattering: **basso**

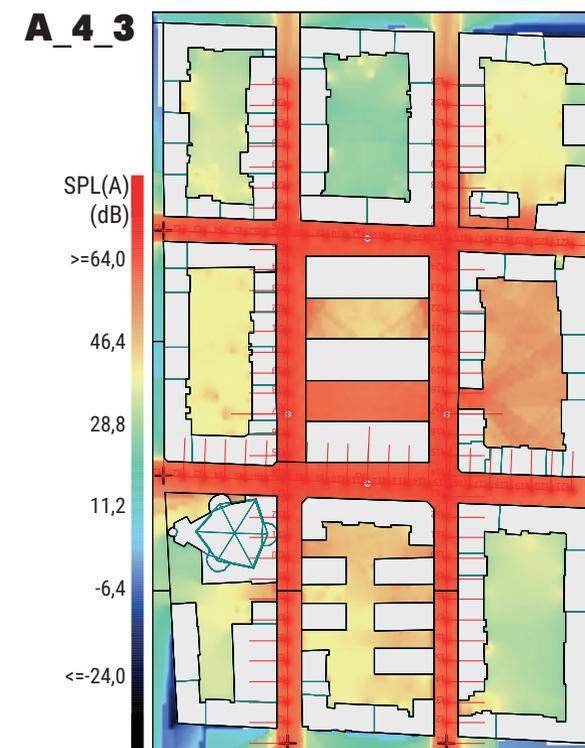


Immagine 7.20 A_4_3
Coefficiente assorbimento: **alto**
Coefficiente scattering: **alto**

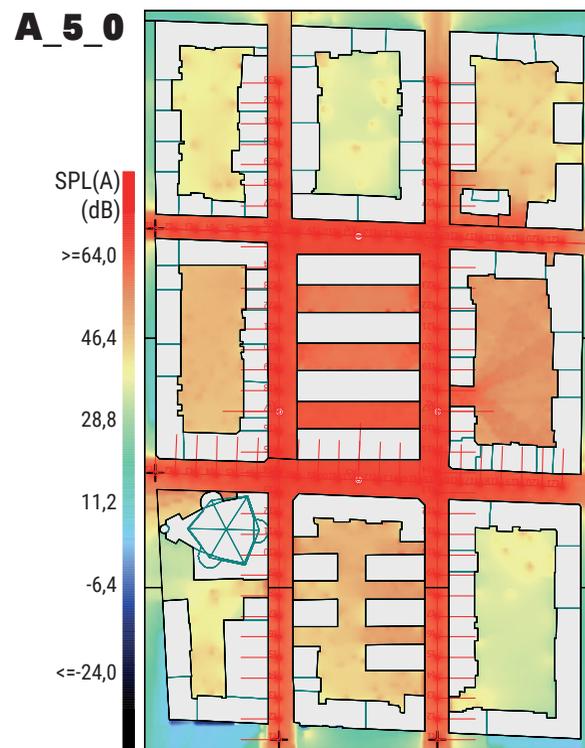


Immagine 7.21 A_5_0
Coefficiente assorbimento: **basso**
Coefficiente scattering: **basso**

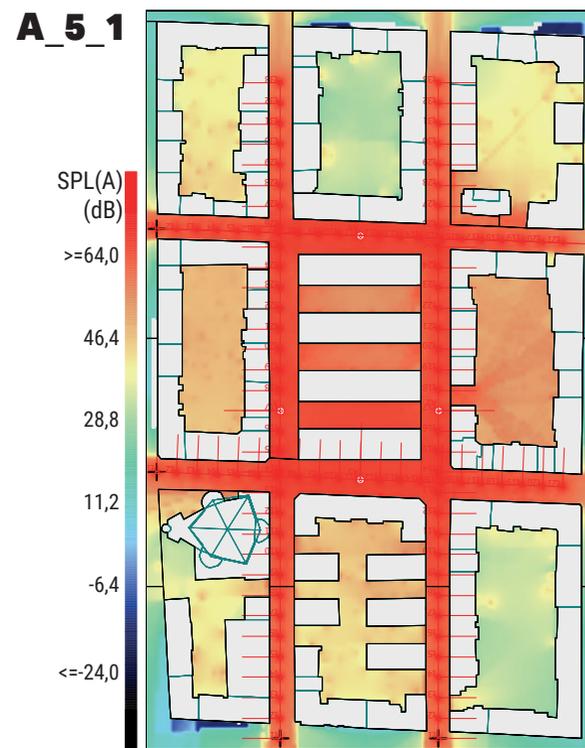


Immagine 7.23 A_5_1
Coefficiente assorbimento: **basso**
Coefficiente scattering: **alto**

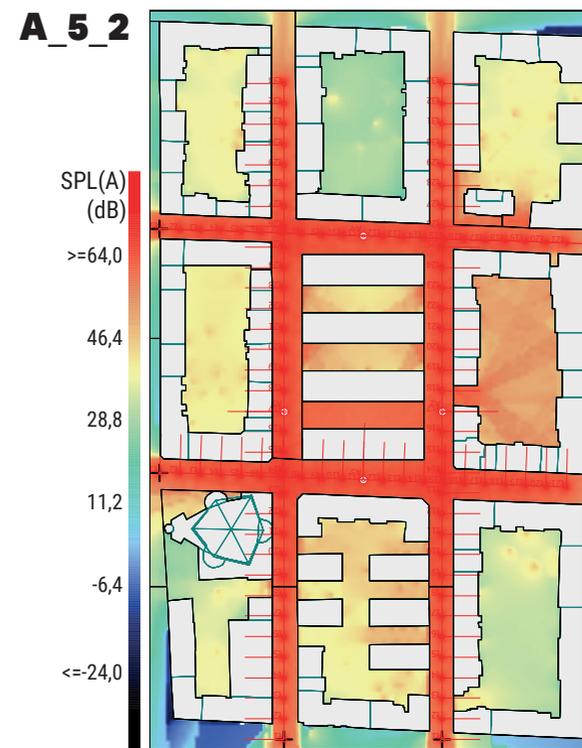


Immagine 7.25 A_5_2
Coefficiente assorbimento: **alto**
Coefficiente scattering: **basso**

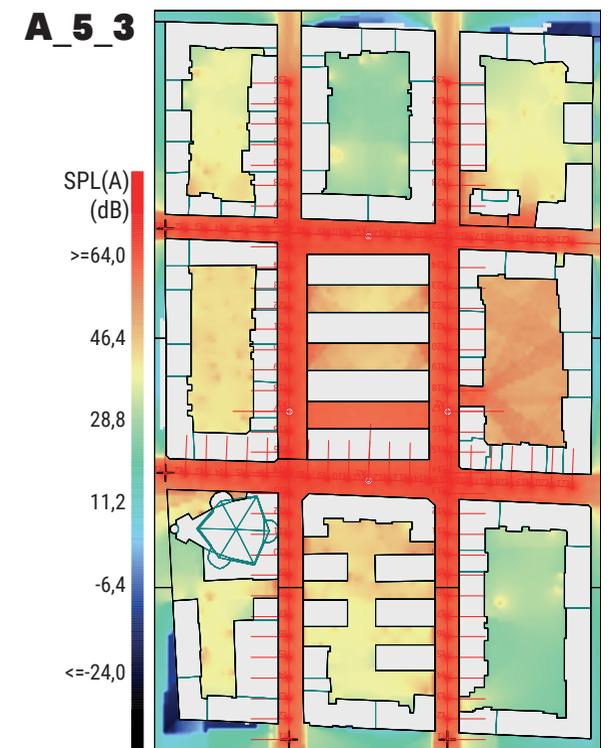


Immagine 7.27 A_5_3
Coefficiente assorbimento: **alto**
Coefficiente scattering: **alto**

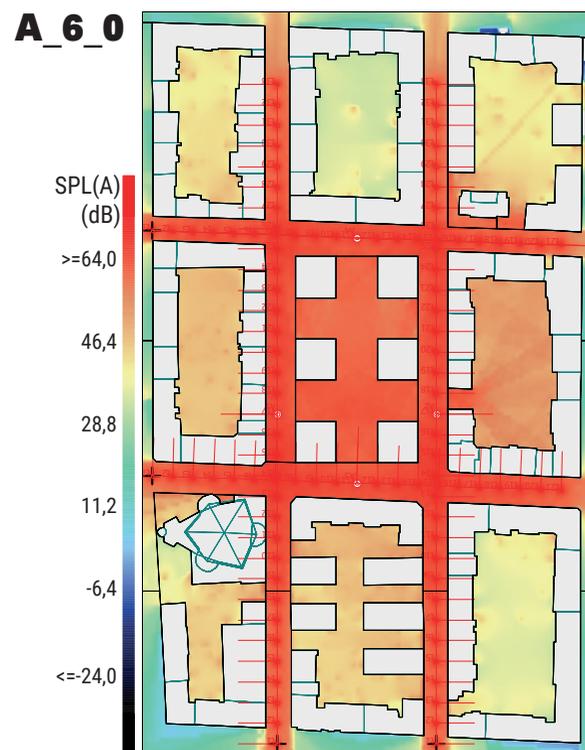


Immagine 7.22 A_6_0
Coefficiente assorbimento: **basso**
Coefficiente scattering: **basso**

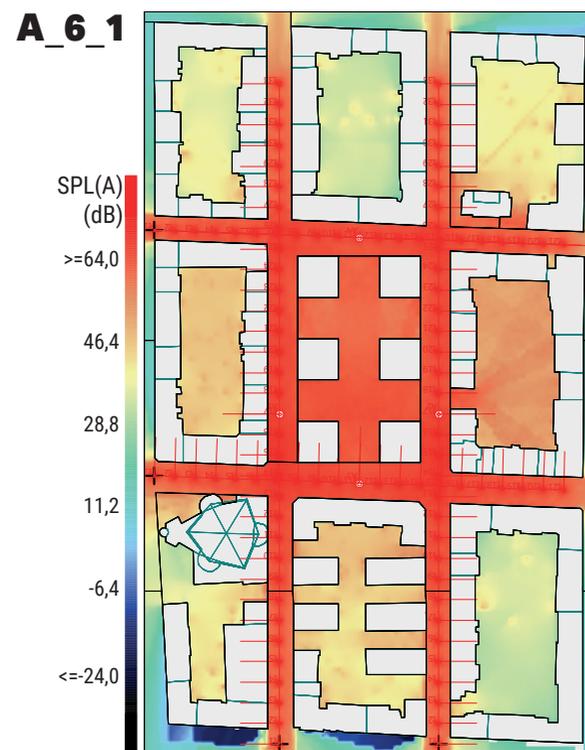


Immagine 7.24 A_6_1
Coefficiente assorbimento: **basso**
Coefficiente scattering: **alto**



Immagine 7.26 A_6_2
Coefficiente assorbimento: **alto**
Coefficiente scattering: **basso**

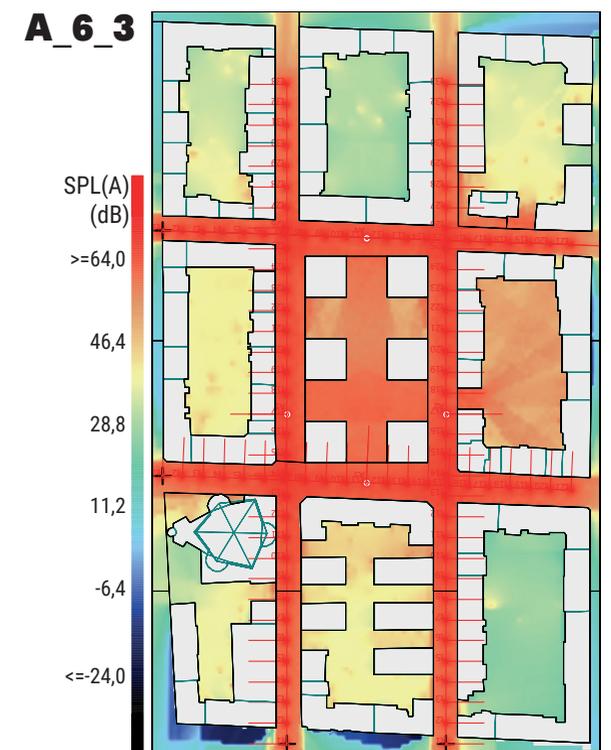


Immagine 7.28 A_6_3
Coefficiente assorbimento: **alto**
Coefficiente scattering: **alto**

Osservando le diverse piante appare immediatamente la differenza nei livelli registrati negli spazi interni all'isolato nelle configurazioni a corte interna (A_0; A_1; A_2; A_3), tra cui anche il caso di riferimento dell'isolato esistente, e negli isolati a pianta aperta (A_4; A_5; A_6). Nei primi infatti le condizioni interne appaiono marcatamente migliori rispetto alle configurazioni aperte, a causa dell'ovvio effetto di schermatura esercitato dall'edificio, che consente quindi un abbassamento notevole dei livelli interni all'isolato.

Anche per quanto riguarda le diverse combinazioni di coefficienti è possibile notare immediatamente, come poi verrà confermato dall'analisi dei dati dei ricevitori puntuali, il grande impatto dell'introduzione di materiale assorbente (ad esempio la differenza fra Immagine 7.5 e Immagine 7.9). Questo è particolarmente apprezzabile nelle corti interne degli isolati chiusi, ma si può notare anche nel caso degli isolati a stecche e a torre anche se in maniera meno marcata (ad esempio la differenza fra Immagine 7.21 e Immagine 7.25). Inoltre è possibile notare una differenza seppur minima nelle vie adiacenti all'isolato trattato.

Allo stesso modo risulta evidente la scarsa differenza nei livelli causata dall'aumento del coefficiente di scattering, che in alcuni casi provoca un leggerissimo peggioramento delle condizioni.

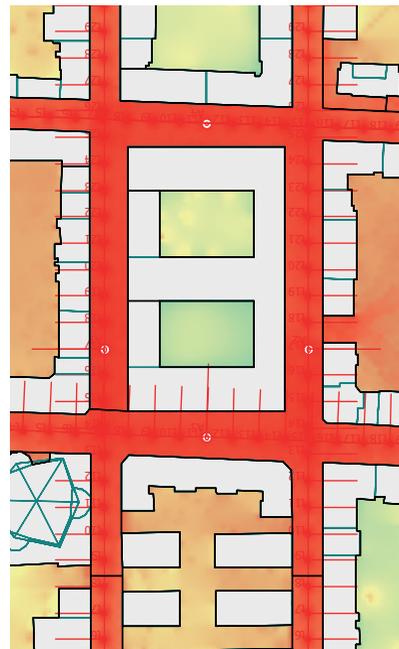
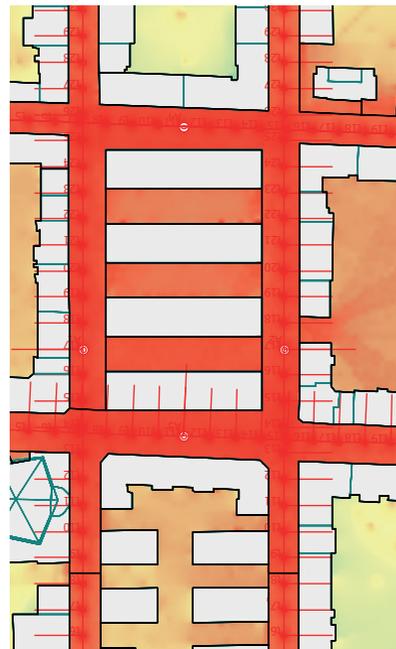


Immagine 7.29 Gli isolati A_2_0 e A_5_0 a confronto. Si può notare la differenza nella mappatura colorata fra la parte nord e sud dell'isolato, presente sia negli isolati aperti che in quelli a corte anche in maniera meno marcata.



Un altro fenomeno facilmente identificabile è la differenza che appare fra la parte nord e la parte sud degli isolati, specialmente nel caso degli isolati aperti, in cui i livelli nella metà nord dell'isolato appaiono più bassi (Immagine 7.29). Si è ipotizzato che questo fenomeno possa essere legato alla diversa geometria degli edifici di fronte alle facciate del isolato studiato, che infatti presentano altezze differenti e delle aperture in alcuni punti.

Al fine di verificare questa ipotesi sono state svolte due ulteriori simulazioni partendo dalla configurazione A_5_0 (Immagine 7.34), ovvero l'isolato con 4 edifici a stecca e la configurazione base (basso livello di assorbimento e di scattering), in quanto configurazione in cui il fenomeno sembra essere più evidente. In queste simulazioni gli edifici circostanti sono stati uniformati in modo da avere un'altezza uniforme, attorno all'isolato nella simulazione A_5_0L, e in tutto il modello nella simulazione A_5_0L2. Gli eventuali spazi aperti sono stati eliminati inserendo dei volumi con la stessa geometria degli edifici a loro adiacenti (Immagine 7.30).

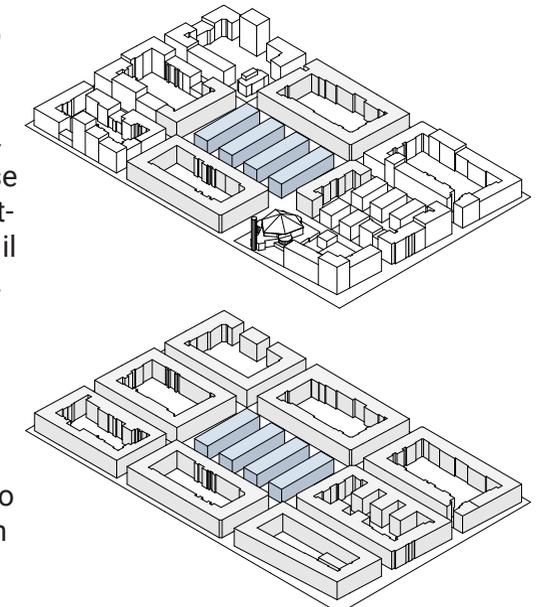


Immagine 7.30 Sopra l'isolato A_5_0L, sotto l'isolato A_5_0L2. In grigio gli edifici del contesto che sono stati uniformati.

Osservando le mappature in scala di colore a confronto (Immagine 7.34; Immagine 7.35; Immagine 7.36) si può notare come le modifiche apportate, in particolare modo la chiusura degli isolati impatti la propagazione del rumore all'interno del quartiere.

Tuttavia la zona caratterizzata da livelli leggermente più alti nella metà sud dell'isolato oggetto di studio rimane presente in tutte e tre i casi, nonostante vengano leggermente mitigati nelle due simulazioni con gli edifici uniformati.

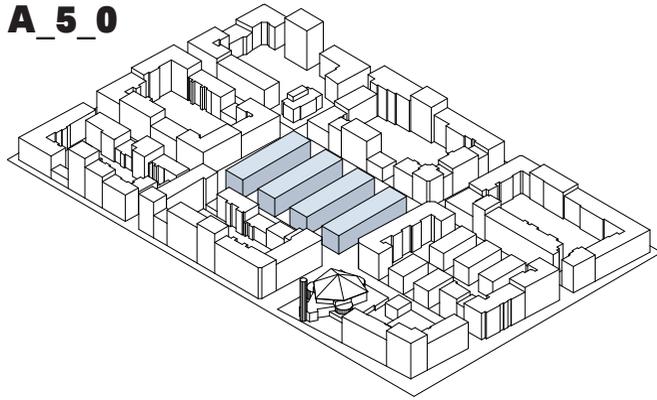
A_5_0

Immagine 7.31 Isolato A_5_0

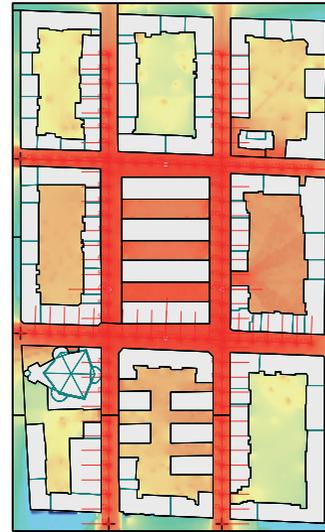
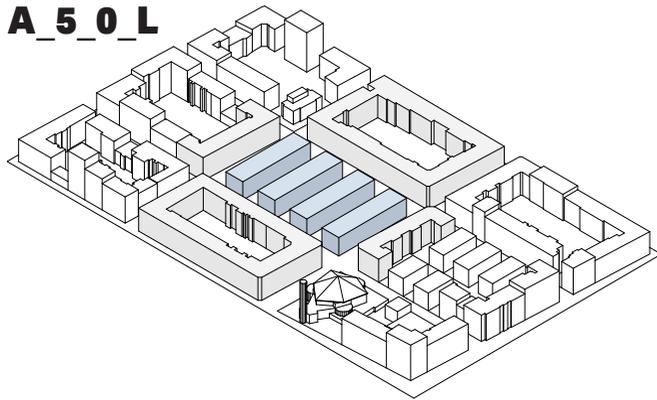
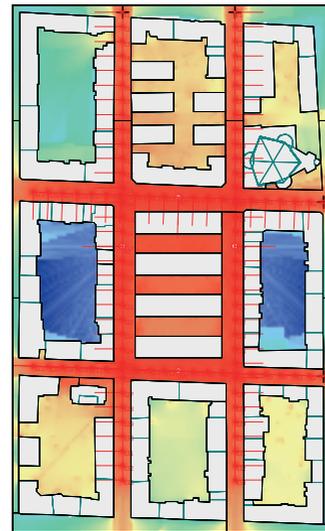
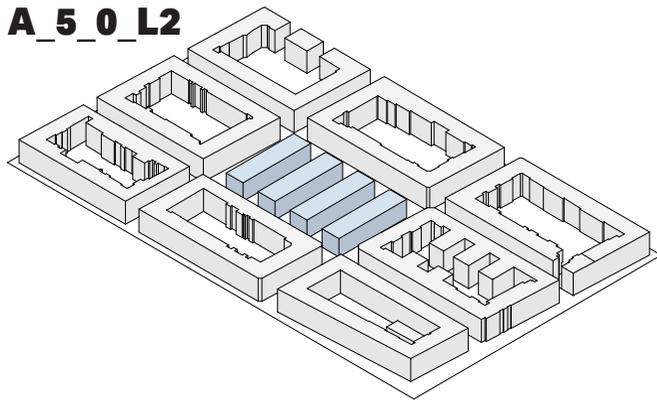
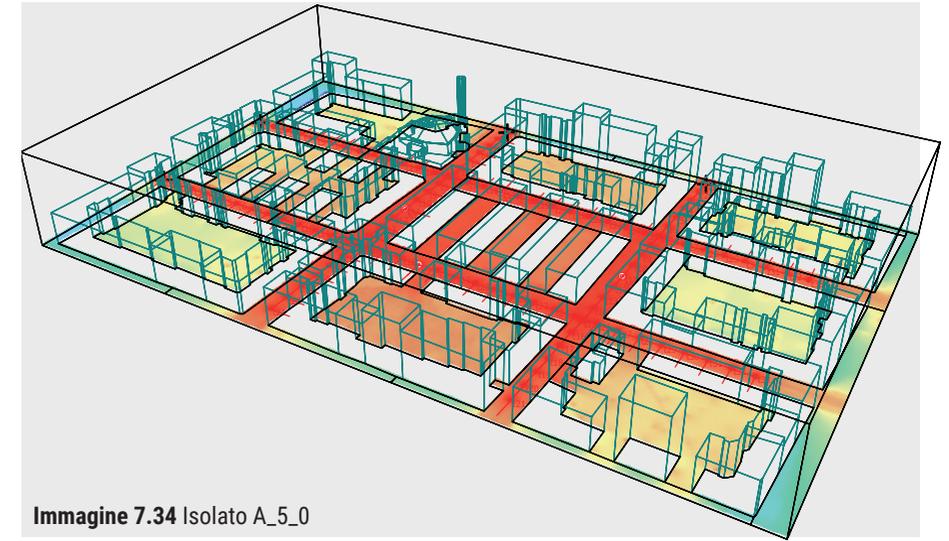
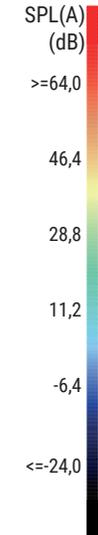
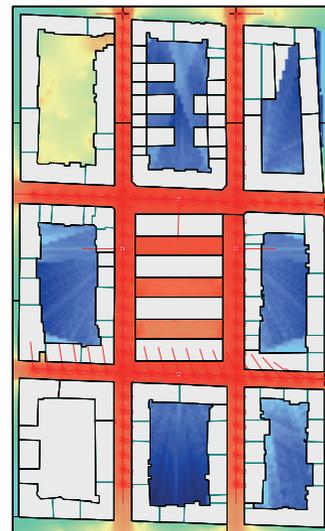
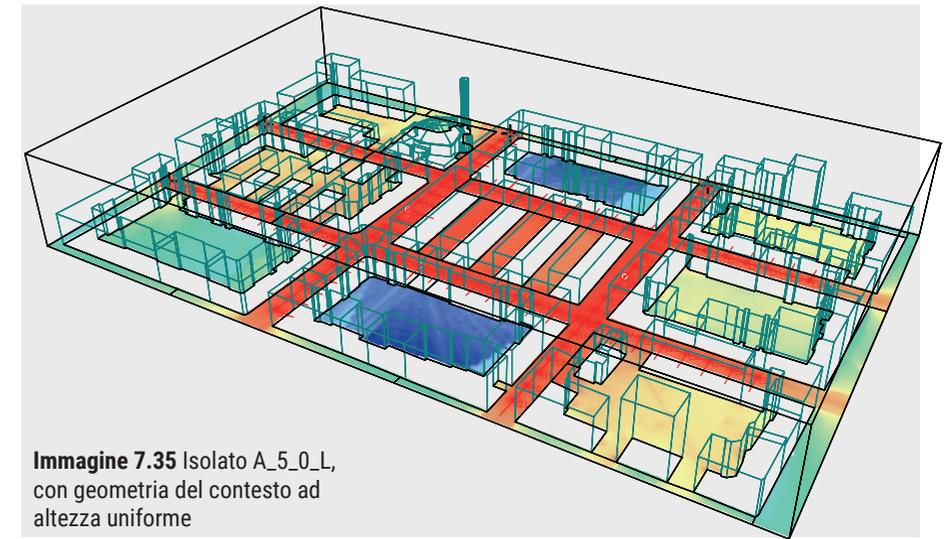
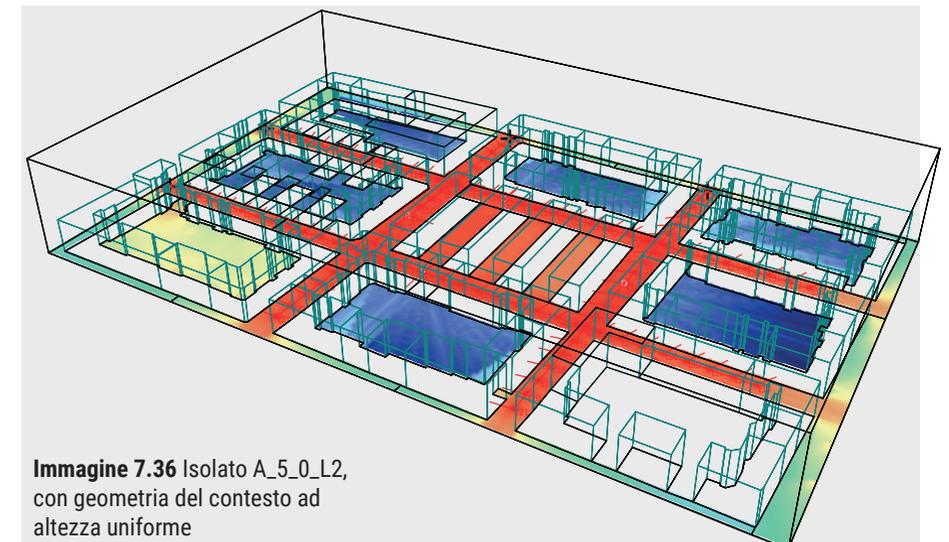
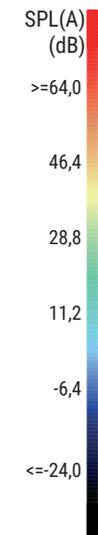
**A_5_0_L**Immagine 7.32 Isolato A_5_0_L,
con geometria del contesto ad
altezza uniforme**A_5_0_L2**Immagine 7.33 Isolato A_5_0_L2,
con geometria del contesto ad
altezza uniforme

Immagine 7.34 Isolato A_5_0

Immagine 7.35 Isolato A_5_0_L,
con geometria del contesto ad
altezza uniformeImmagine 7.36 Isolato A_5_0_L2,
con geometria del contesto ad
altezza uniforme

7.2 Confronto dati tipologie isolati

L'analisi dei dati di tutte le simulazioni al fine di confrontare le diverse opzioni è stata svolta utilizzando i dati dei ricevitori puntuali dei diversi modelli in Odeon. L'output di dati dei ricevitori viene fornito dal programma sotto forma di testo, contenente le informazioni relative ad ogni ricevitore e i valori di ogni parametro misurato per ogni ricevitore.

A causa dell'organizzazione e della formattazione fornita dal programma i dati non sono direttamente utilizzabili e hanno richiesto una fase piuttosto lunga di gestione dei dati, per ordinarli e organizzarli secondo la struttura necessaria per le analisi di confronto fra le diverse opzioni testate. Sono quindi stati utilizzati due script Python per riordinare i file di testo di Odeon, organizzandoli in funzione di facciata e numero piano, e effettuando una divisione fra ricevitori delle facciate esterne e interne degli isolati.

In seguito si è proceduto, tramite l'uso di fogli di lavoro Excel, a svolgere un confronto fra le sei configurazioni dell'isolato e l'isolato esistente. Le tipologie morfologiche sono state confrontate tra loro solamente con le stesse configurazioni di coefficienti acustici, in modo da avere un confronto diretto, che fornisca informazioni esclusivamente relative agli effetti delle geometrie, senza confronti incrociati tra i diversi coefficienti.

Per quantificare gli effetti di tutte le tipologie si è proceduto calcolando le medie dei livelli di ogni piano, divise per facciata. Questo è stato necessario poiché alcune delle griglie di ricevitori sono diverse fra loro e non è quindi stato possibile eseguire un confronto diretto fra i ricevitori.

Una volta ottenuti i valori medi dei diversi piani sono stati calcolati i delta di differenza fra il caso A_0, dell'isolato esistente, e i diversi isolati testati, un valore positivo corrisponde quindi ad una riduzione dei livelli misurati rispetto al caso di riferimento, mentre un valore negativo corrisponde ad un aumento dei livelli. Questo processo è stato svolto per il parametro SPL, livello di pressione sonora diviso in frequenze, con il quale sono stati analizzati i dati relativamente all'impatto delle diverse bande di frequenza. Inoltre con lo stesso procedimento sono stati analizzati i parametri del Livello di Pressione Sonora Globale SPL_{tot}, e il Livello di Pressione Sonora Ponderato A o SPL(A).

Dai grafici si può chiaramente distinguere l'effetto esercitato, sui ricevitori interni all'isolato, dagli isolati a corte interna, che forniscono una schermatura completa dello spazio, e l'effetto degli isolati a pianta aperta, che non fornendo una schermatura completa agli spazi interni, hanno dei livelli di pressione sonora sulle facciate interne molto più alti. Si può notare ad esempio confrontando i valori dei ricevitori benchmark interni Z nel Grafico 7.1 e nel Grafico 7.4.

Fra i diversi isolati a corte interna, a uno, due e tre cortili, non si riscontrano differenze evidenti fra i livelli medi interni ai cortili, per cui non sembrerebbe in questo caso esserci una soluzione preferibile alle altre.

Meno ovvia è la differenza dei livelli misurati sulle facciate esterne, che affacciano sulle vie dove si trovano le sorgenti e sono quindi esposte al rumore diretto proveniente dalla strada.

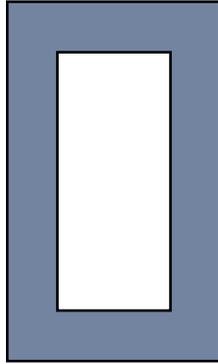
In questo caso infatti si nota una riduzione dei livelli nel caso degli edifici a pianta aperta, particolarmente apprezzabile nel caso dell'isolato A_6 (grafici Grafico 7.6;Grafico 7.12;Grafico 7.18; Grafico 7.24), con edifici a torre, con una riduzione del SPL_{tot} rispetto all'isolato esistente (grafici Grafico 7.1;Grafico 7.7;Grafico 7.13;Grafico 7.19). Si può inoltre notare come questa riduzione sulle facciate esterne diminuisca all'aumento del coefficiente di assorbimento delle facciate.

Nonostante questo l'andamento delle differenze rispetto al caso base è costante al cambiare dei diversi coefficienti di assorbimento e di scattering.

In tutti gli isolati si nota come i valori dei livelli diminuiscano all'aumentare dell'altezza dei ricevitori e quindi con il numero del piano. Si tratta di un effetto causato dalla maggiore distanza dalle sorgenti e di conseguenza dalla minor quantità di energia delle onde dirette o riflesse dalle facciate, coerentemente con quanto già riscontrato da altri studi presenti in letteratura, come Onaga et al. (2007) [37] e Badino et al. (2019) [44]. Il fatto che i livelli siano più bassi fa anche sì che l'efficacia dei trattamenti in facciata sia minore rispetto ai piani bassi.

Una possibile strategia progettuale potrebbe quindi essere quella di trattare solamente le facciate dei piani maggiormente esposti come già suggerito da Crippa et al. [41]. Questo approccio potrebbe essere considerato un buon compromesso che, unito ad una attenta distribuzione degli spazi in funzione della morfologia di isolato, potrebbe consentire di migliorare le condizioni acustiche contenendo i costi necessari al trattamento fonoassorbente in facciata, mantenendo anche una riduzione dei livelli di esposizione pedonali [31].

Grafici confronto tipologie di isolato



A_1_0
assorbimento basso
scattering basso

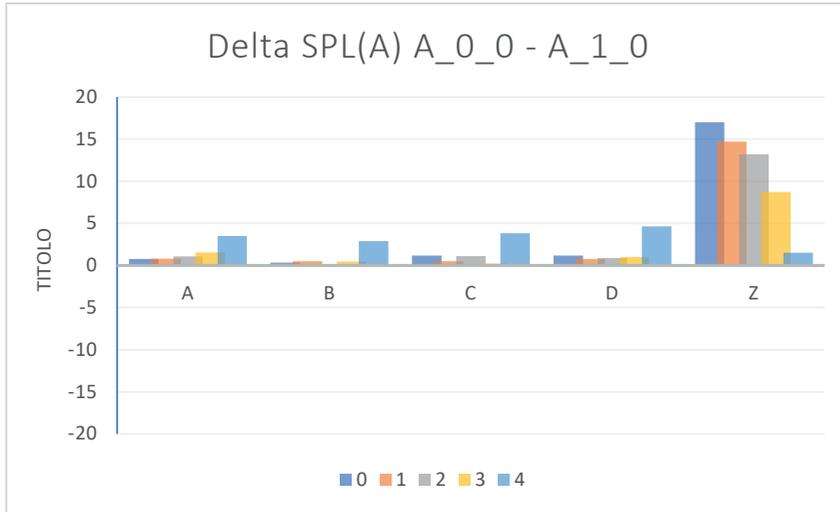
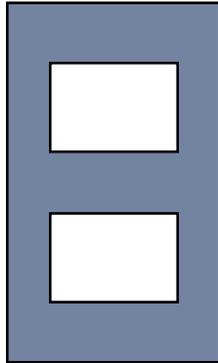


Grafico 7.1



A_2_0
assorbimento basso
scattering basso

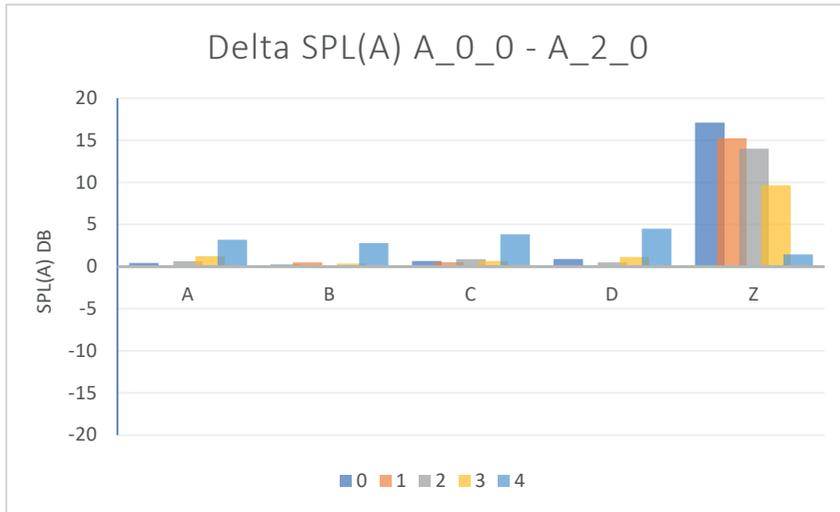
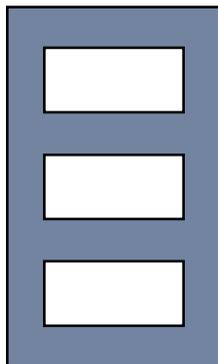


Grafico 7.2



A_3_0
assorbimento basso
scattering basso

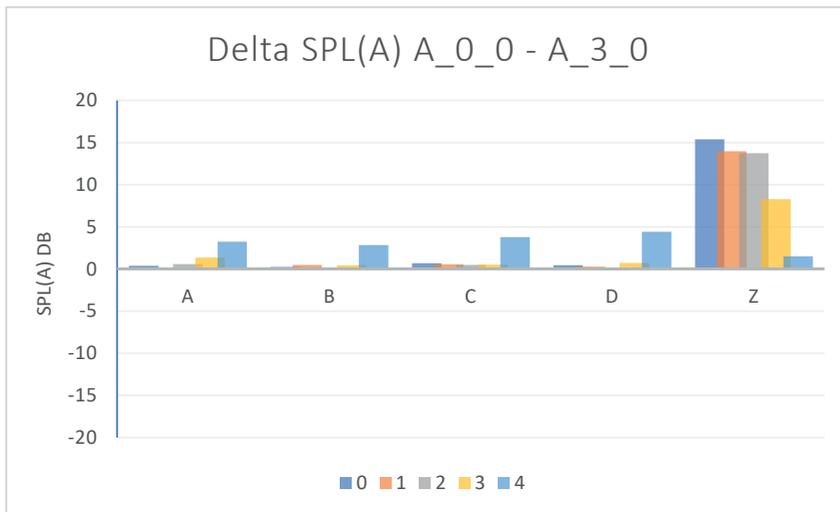
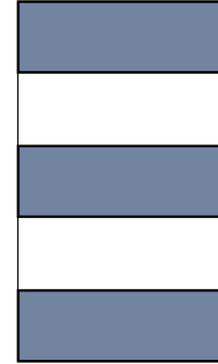


Grafico 7.3

Grafici confronto tipologie di isolato



A_4_0
assorbimento basso
scattering basso

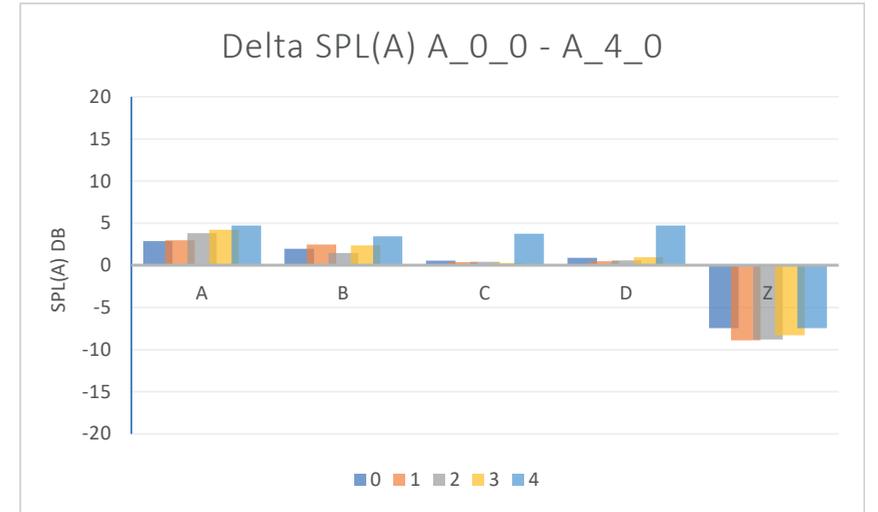
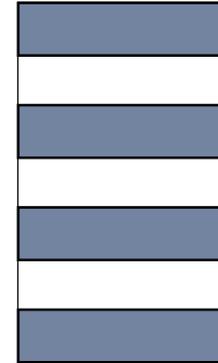


Grafico 7.4



A_5_0
assorbimento basso
scattering basso

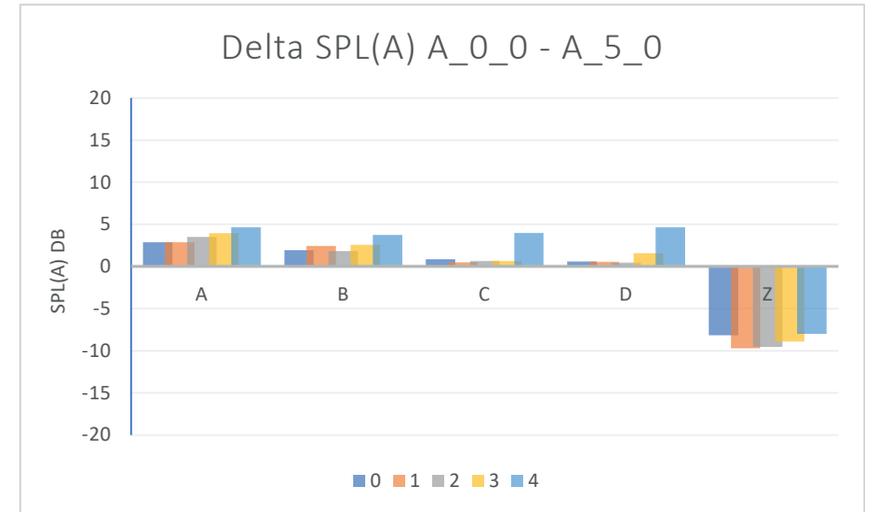
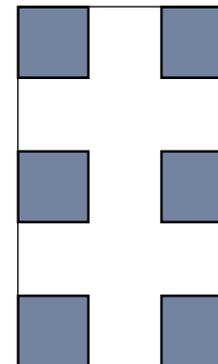


Grafico 7.5



A_6_0
assorbimento basso
scattering basso

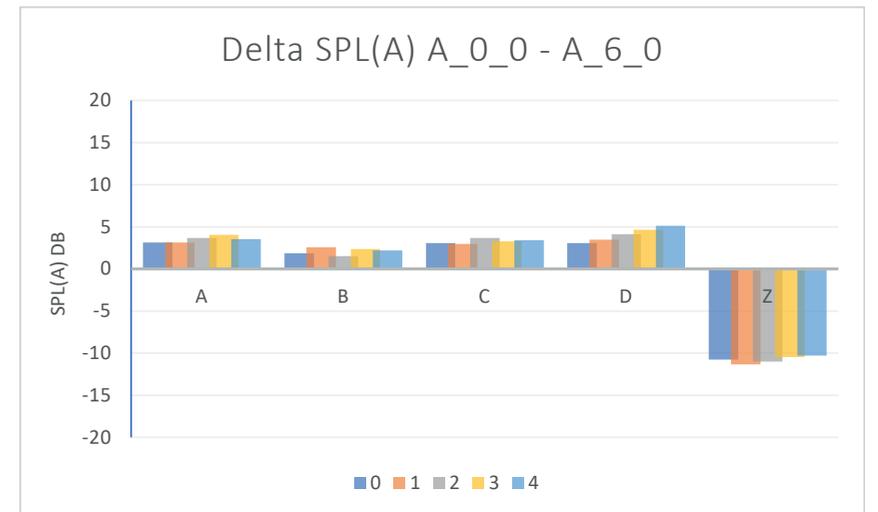
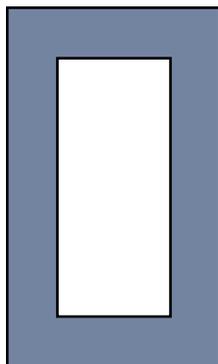


Grafico 7.6

Grafici confronto tipologie di isolato



A_1_1
assorbimento basso
scattering alto

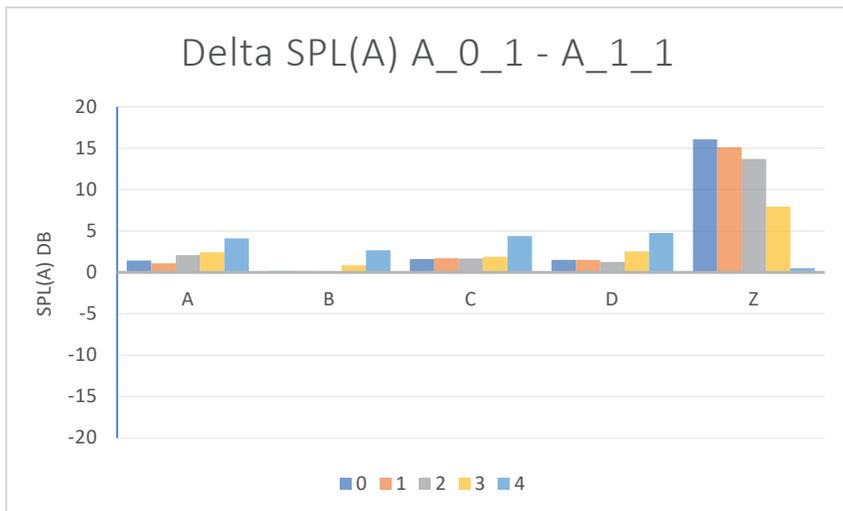
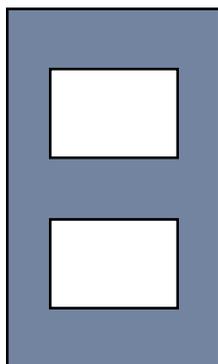


Grafico 7.7



A_2_1
assorbimento basso
scattering alto

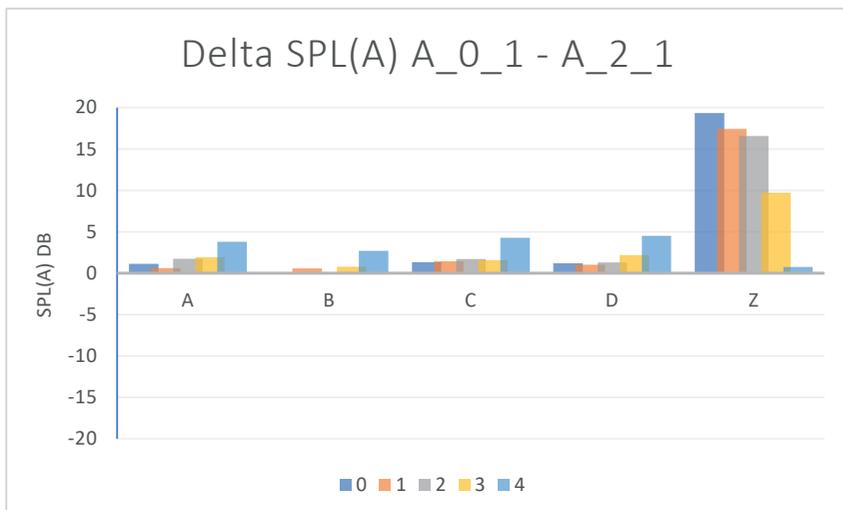
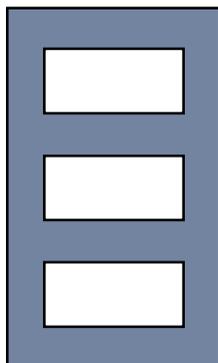


Grafico 7.8



A_3_1
assorbimento basso
scattering alto

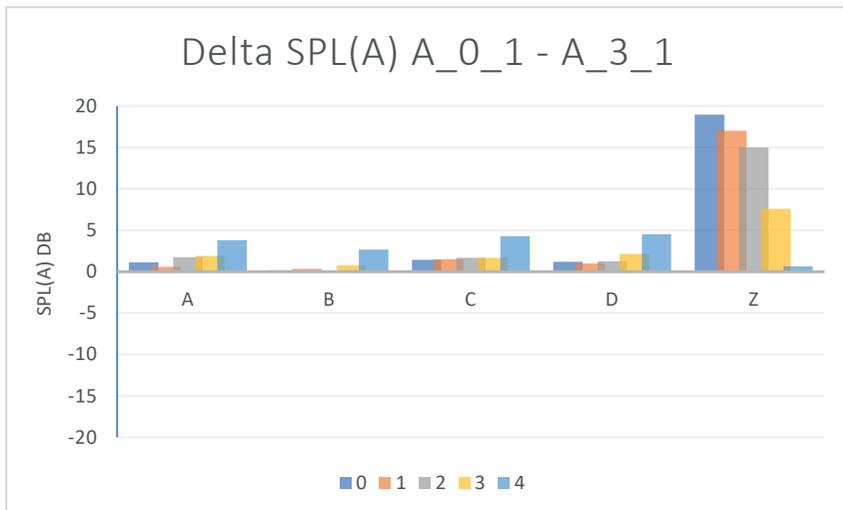
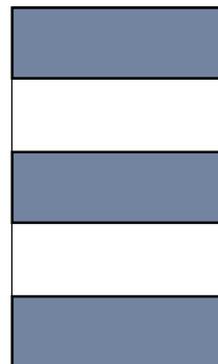


Grafico 7.9

Grafici confronto tipologie di isolato



A_4_1
assorbimento basso
scattering alto

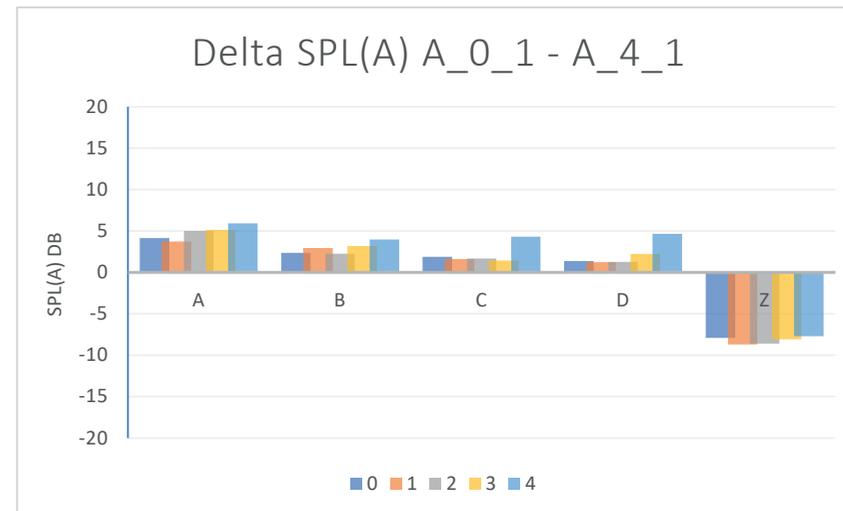
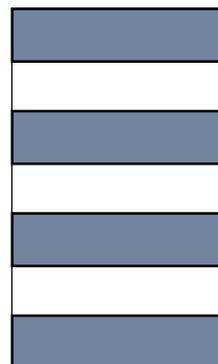


Grafico 7.10



A_5_1
assorbimento basso
scattering alto

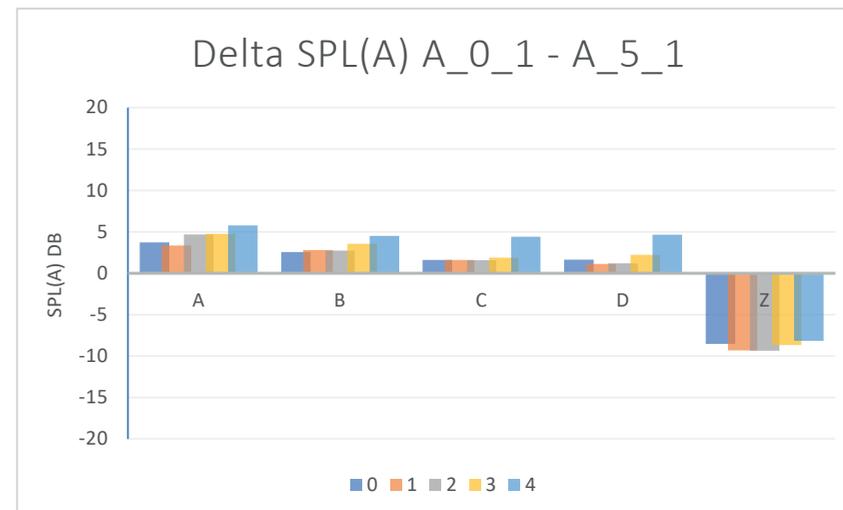
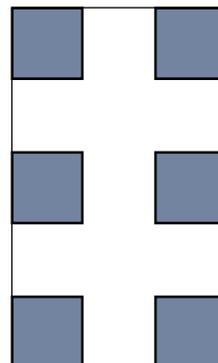


Grafico 7.11



A_6_1
assorbimento basso
scattering alto

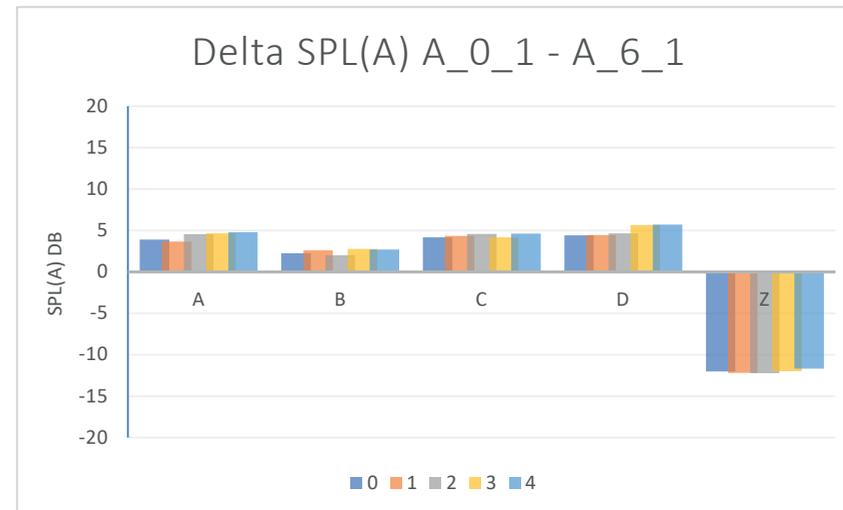
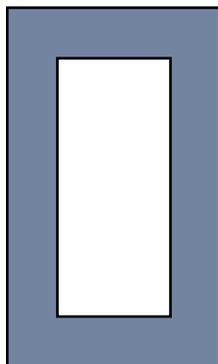


Grafico 7.12

Grafici confronto tipologie di isolato



A_1_2
assorbimento alto
scattering basso

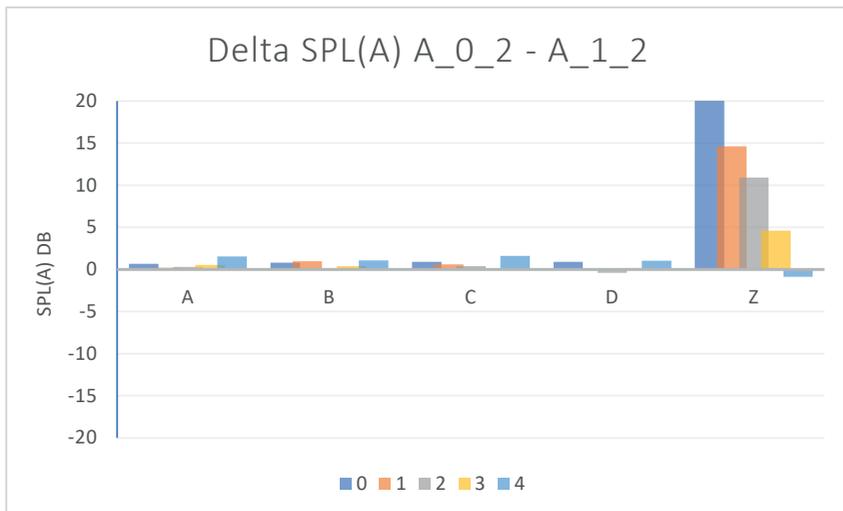
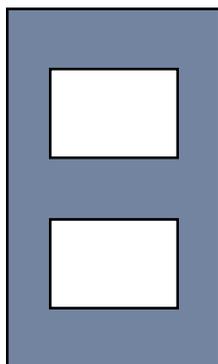


Grafico 7.13



A_2_2
assorbimento alto
scattering basso

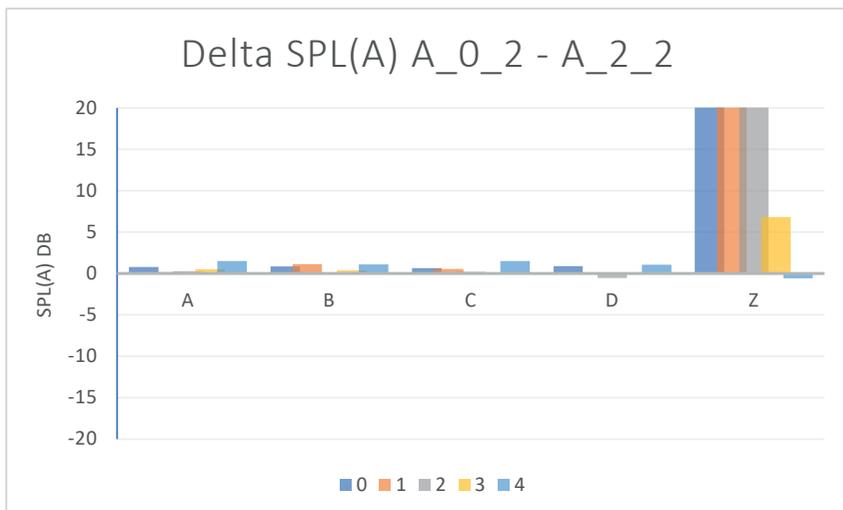
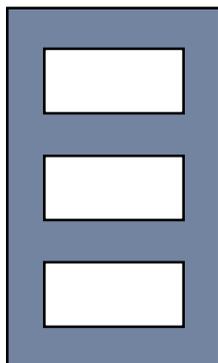


Grafico 7.14



A_3_2
assorbimento alto
scattering basso

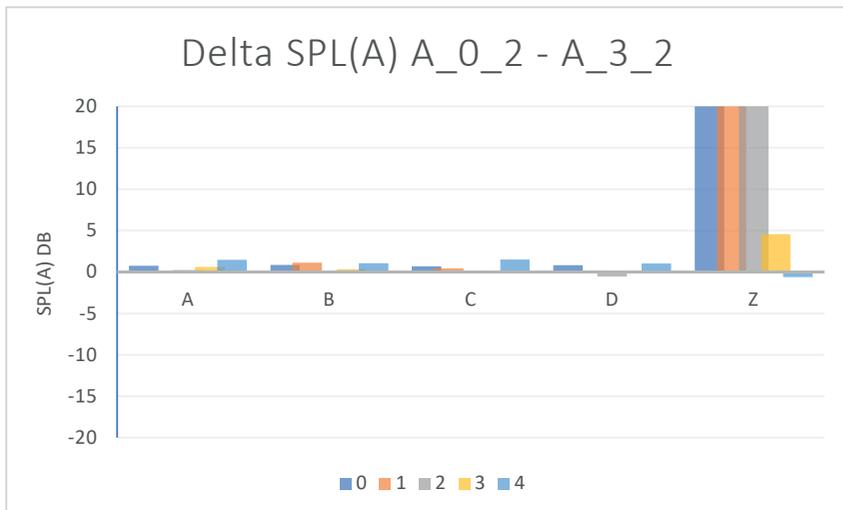
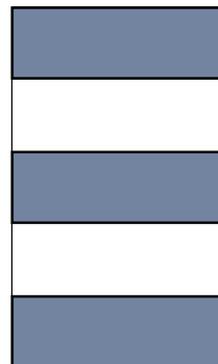


Grafico 7.15

Grafici confronto tipologie di isolato



A_4_2
assorbimento alto
scattering basso

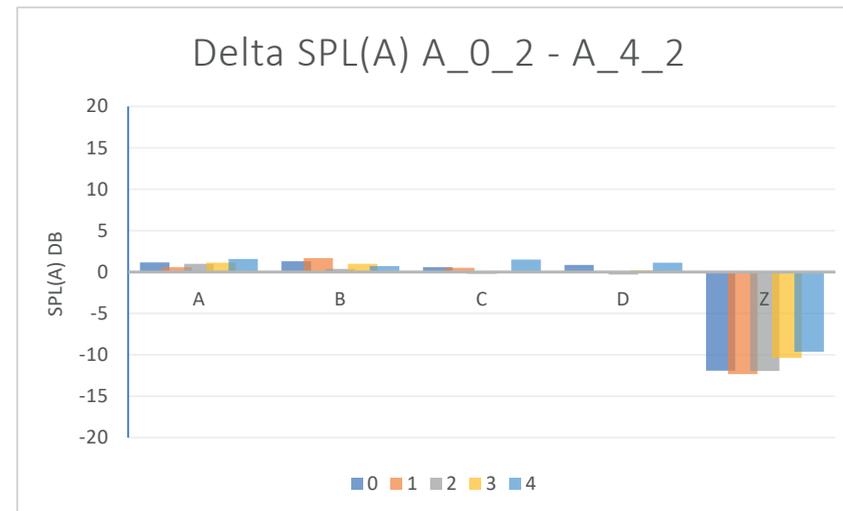
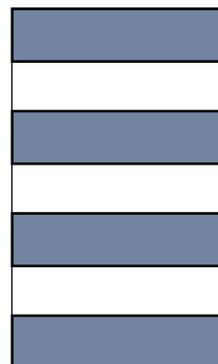


Grafico 7.16



A_5_2
assorbimento alto
scattering basso

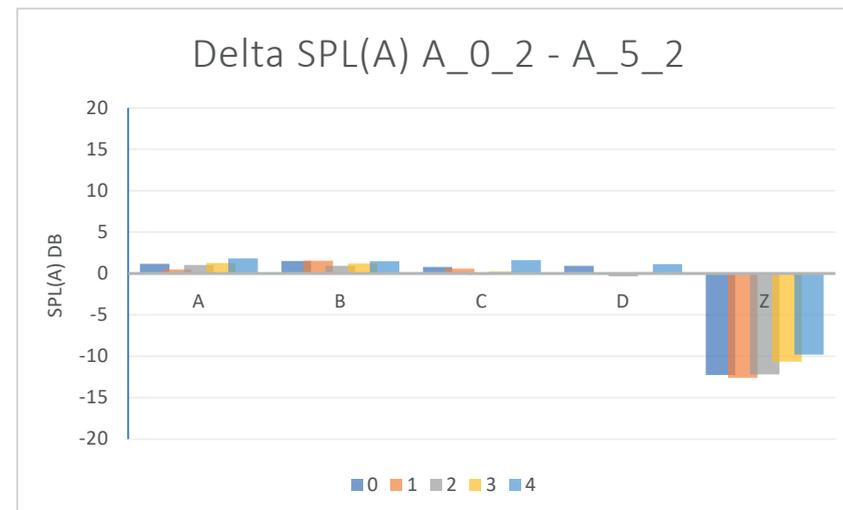
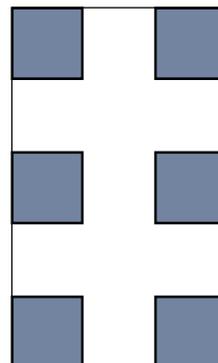


Grafico 7.17



A_6_2
assorbimento alto
scattering basso

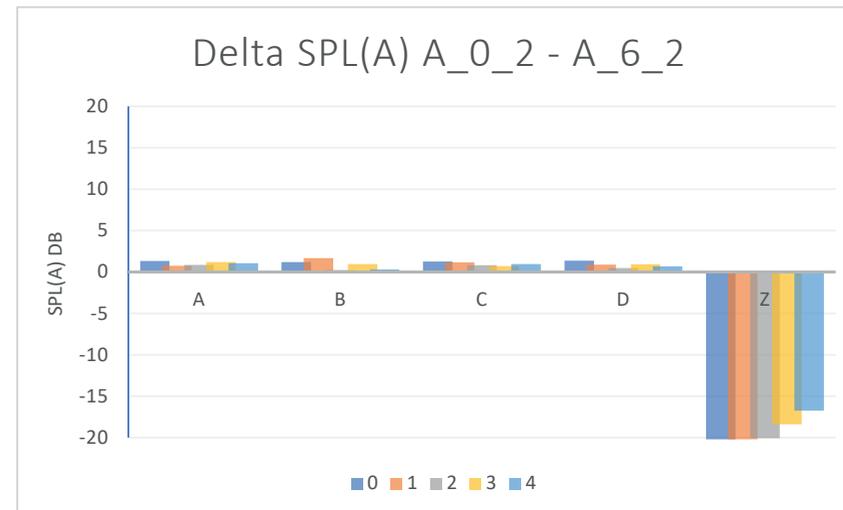
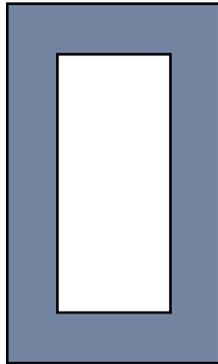


Grafico 7.18

Grafici confronto tipologie di isolato



A_1_3
assorbimento alto
scattering basso

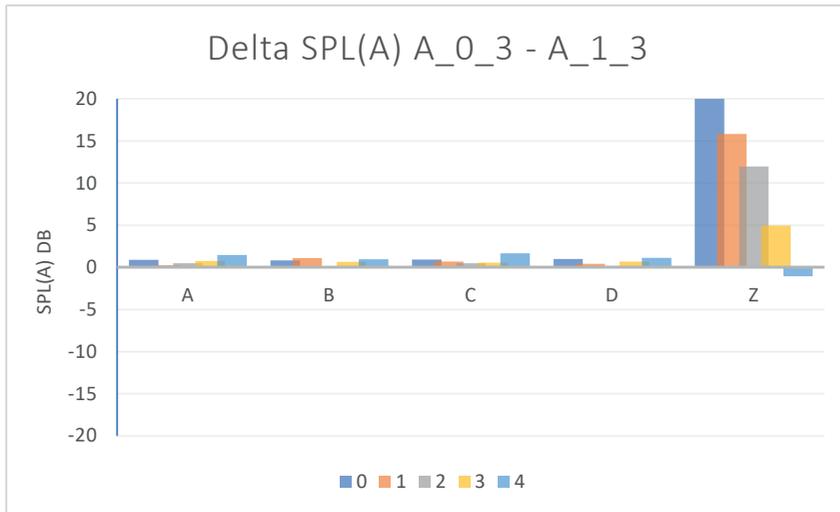
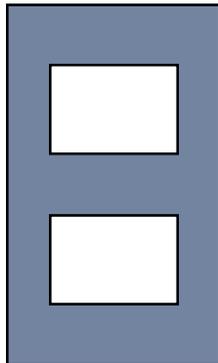


Grafico 7.19



A_2_3
assorbimento alto
scattering basso

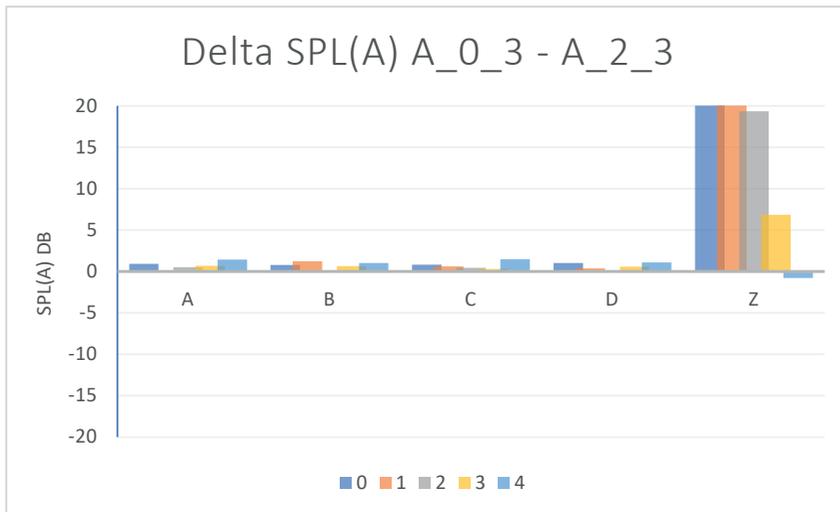
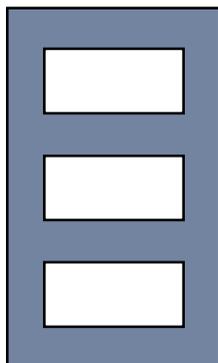


Grafico 7.20



A_3_3
assorbimento alto
scattering basso

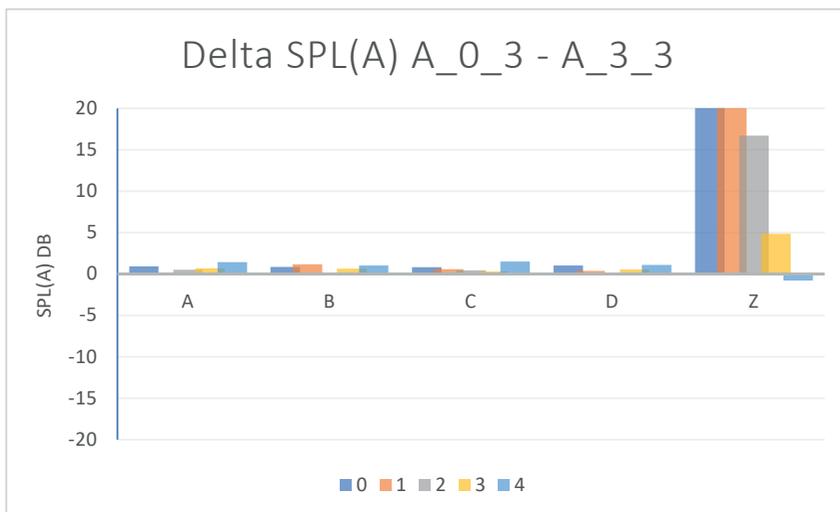
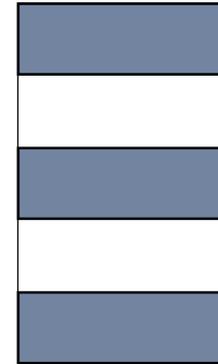


Grafico 7.21

Grafici confronto tipologie di isolato



A_4_3
assorbimento alto
scattering basso

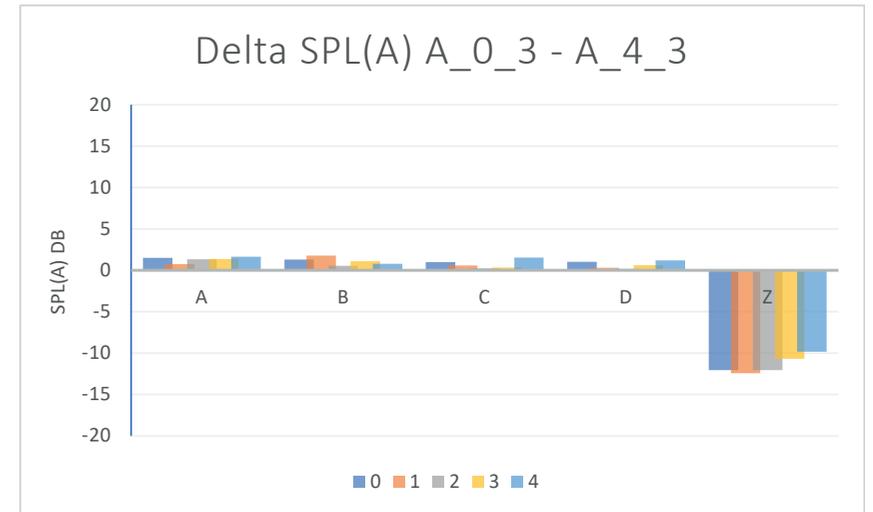
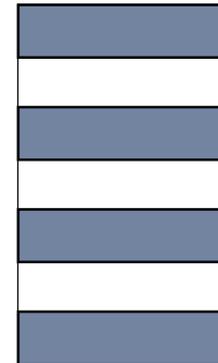


Grafico 7.22



A_5_3
assorbimento alto
scattering basso

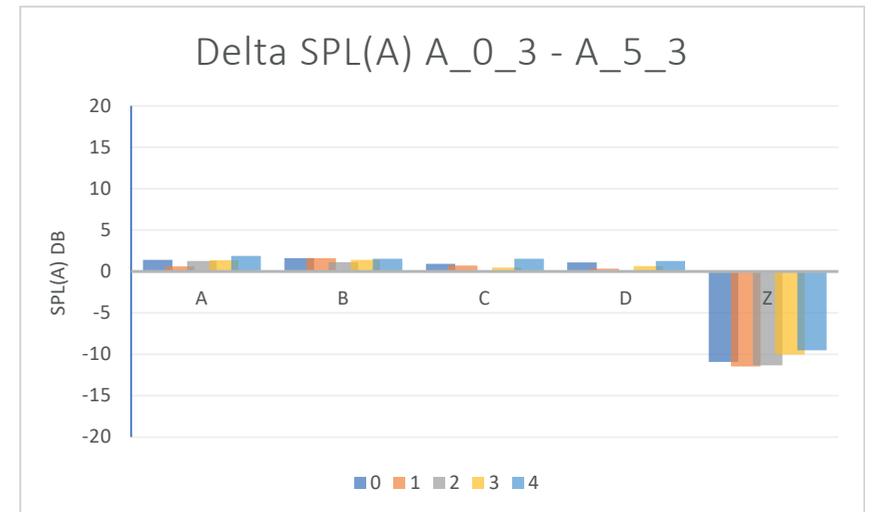
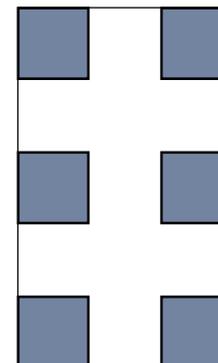


Grafico 7.23



A_6_3
assorbimento alto
scattering basso

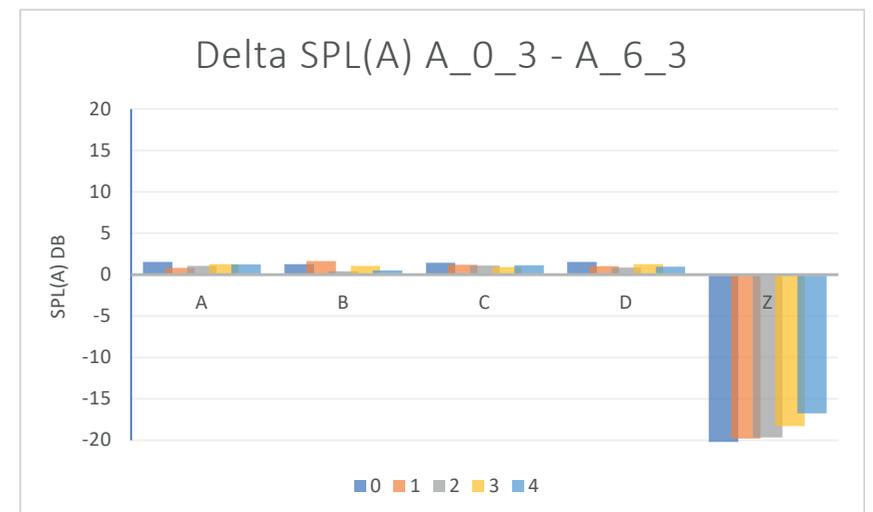


Grafico 7.24

7.3 Confronto dati combinazioni coefficienti

Il confronto fra le diverse combinazioni di coefficienti è stato svolto secondo le stesse procedure di trattamento dei dati raccolti utilizzate per il confronto fra le tipologie di isolati calcolando il delta fra i valori della combinazione di base (assorbimento e scattering bassi) e fra i valori delle altre combinazioni. Anche in questo caso i valori positivi dei grafici corrispondono ad un miglioramento delle condizioni acustiche e quindi una diminuzione dei livelli di pressione sonora. In questo caso le comparazioni sono state svolte fra le configurazioni dei coefficienti dello stesso isolato, in modo da non influenzare i paragoni con gli effetti di diverse geometrie.

Sono stati analizzati i livelli in frequenza dell'SPL e i valori pesati del livello globale SPL_{tot} e del livello globale ponderato SPL(A).

Come si può vedere i grafici mostrano una chiara differenza fra le prime due combinazioni e le ultime due, mostrando un grande impatto sui valori dei livelli acustici dell'aumento del coefficiente si assorbono che si traduce in una riduzione molto importante dei livelli, ad esempio nella differenza fra i livelli del Grafico 7.25 e quelli dei livelli dei Grafici Grafico 7.26 e Grafico 7.27.

Anche nel confronto fra i coefficienti all'interno dello stesso isolato si può notare come l'aumento del coefficiente di scattering quasi non comporti differenze, o comunque abbastanza piccole da non superare la soglia della "Just noticeable difference" ovvero la soglia della differenza minima percepita dall'orecchio umano.

Tuttavia in alcuni casi l'aumento del coefficiente di scattering causa, soprattutto sulle facciate esterne dell'isolato, un leggero peggioramento dei livelli di pressione sonora e anche sulle facciate interne nel caso degli isolati a corte interna, specialmente quando abbinato ad un alto valore del coefficiente di assorbimento (ad esempio nel Grafico 7.26).

Nel caso degli isolati aperti non si notano effetti significativi causati da un aumento del coefficiente di scattering, con livelli che restano praticamente invariati.

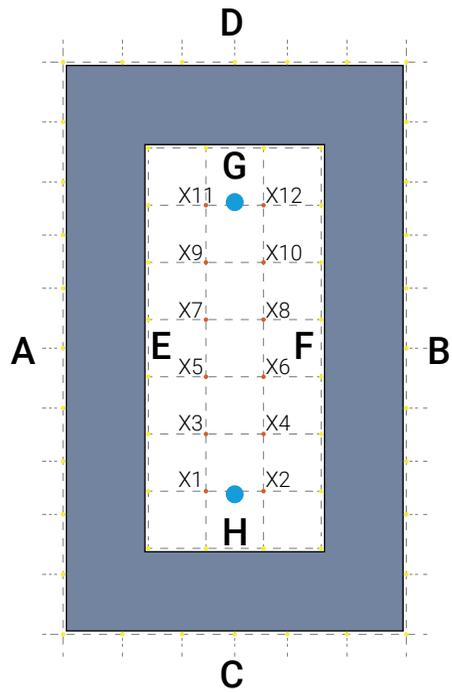
L'analisi dei valori di SPL suddivisi in frequenze mostra un andamento lineare e comparabile a quello dei valori del livello globale (SPL_{tot}) e del livello globale ponderato (SPL(A)), inoltre le differenze fra livelli nelle diverse frequenze seguono gli andamenti dei valori per frequenza dei coefficienti di assorbimento e degli spettri delle sorgenti.

Da sottolineare come anche dai dati relativi ai coefficienti si possa notare come i livelli sonori diminuiscano all'aumentare dell'altezza dei ricevitori nelle facciate esterne, confermando quanto notato nel confronto fra tipologie di isolato.

Nei ricevitori interni ai cortili notiamo invece un andamento inverso con i valori dei livelli che diminuiscono ai piani bassi rispetto a quelli alti. Questo perché i ricevitori ai piani più alti sono meno schermati dagli edifici dalle sorgenti presenti in strada e rispetto al percorso di trasmissione del rumore sono più vicini alla sorgente rispetto ai ricevitori dei piani inferiori, e vengono quindi esposti ad una maggior quantità di riflessioni e di energia trasmessa per diffrazione agli spigoli degli edifici.

Questo andamento dei livelli in facciata in relazione ai piani degli edifici è in linea con quanto riportato in letteratura da Badino et al. (2019) [44].

A.1.0

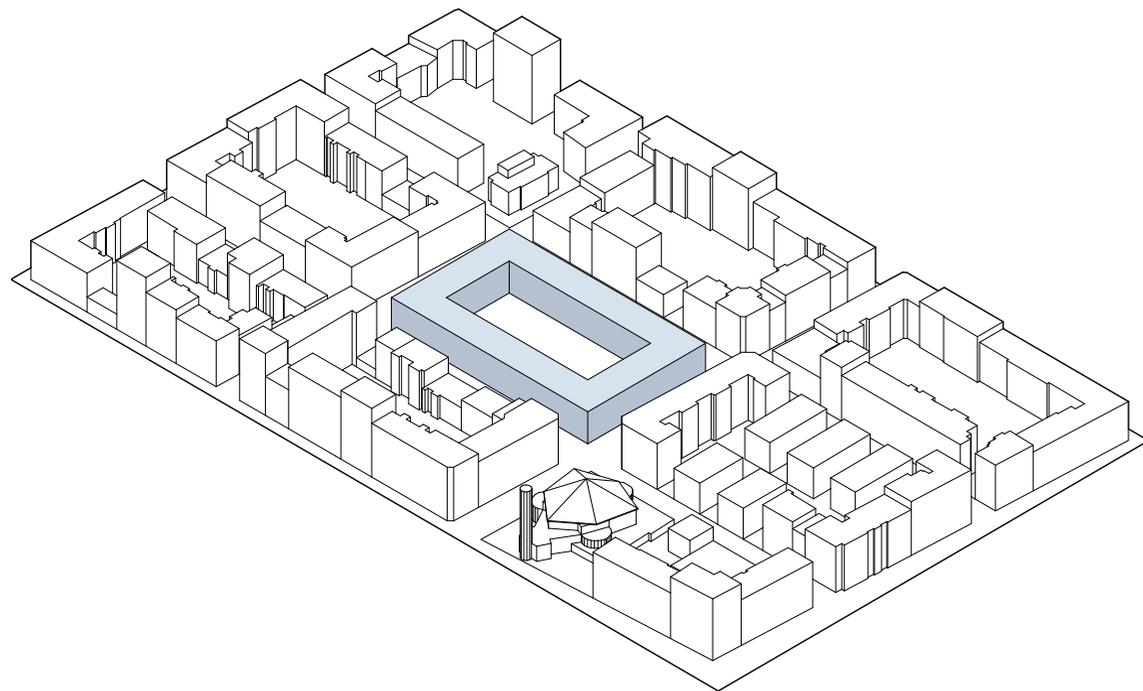


A.1.0 coefficiente di assorbimento: basso
coefficiente di scattering: basso

A.1.1 coefficiente di assorbimento: basso
coefficiente di scattering: alto

A.1.2 coefficiente di assorbimento: alto
coefficiente di scattering: basso

A.1.3 coefficiente di assorbimento: alto
coefficiente di scattering: alto



Delta SPL(A) A_1_0 - A_1_1

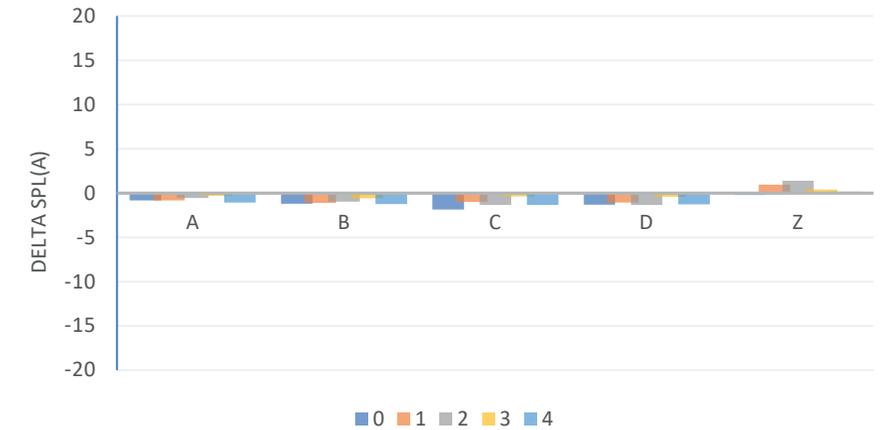


Grafico 7.25

Delta SPL(A) A_1_0 - A_1_2

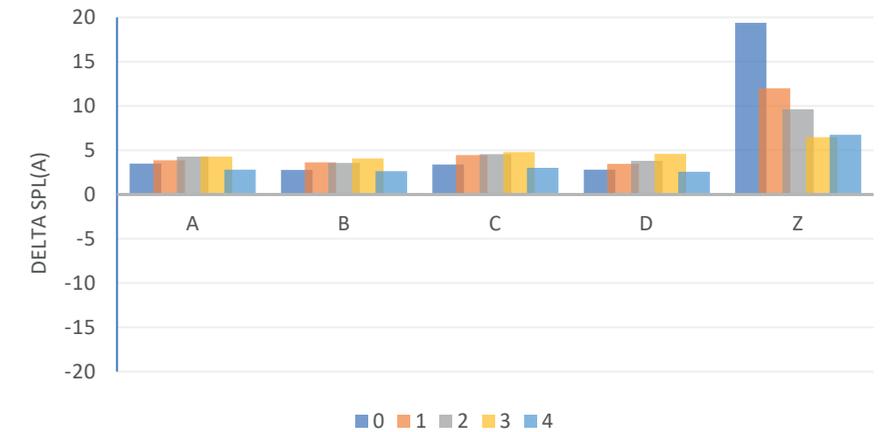


Grafico 7.26

Delta SPL(A) A_1_0 - A_1_3

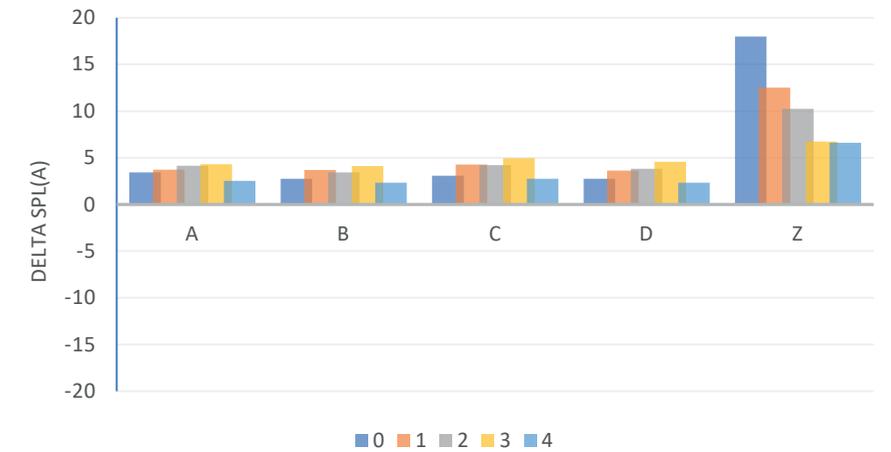
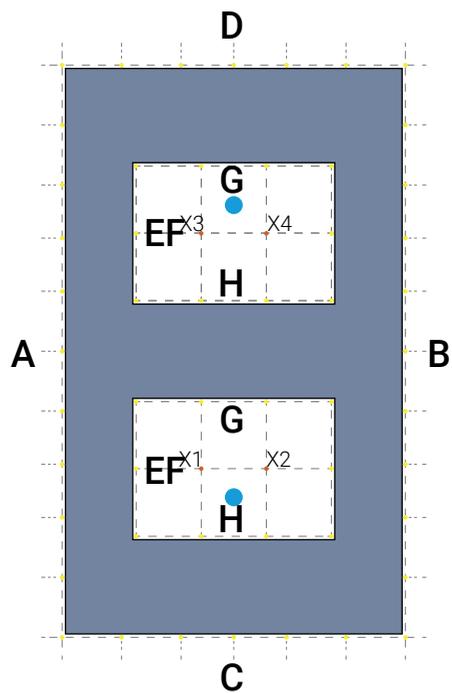


Grafico 7.27

A.2.0

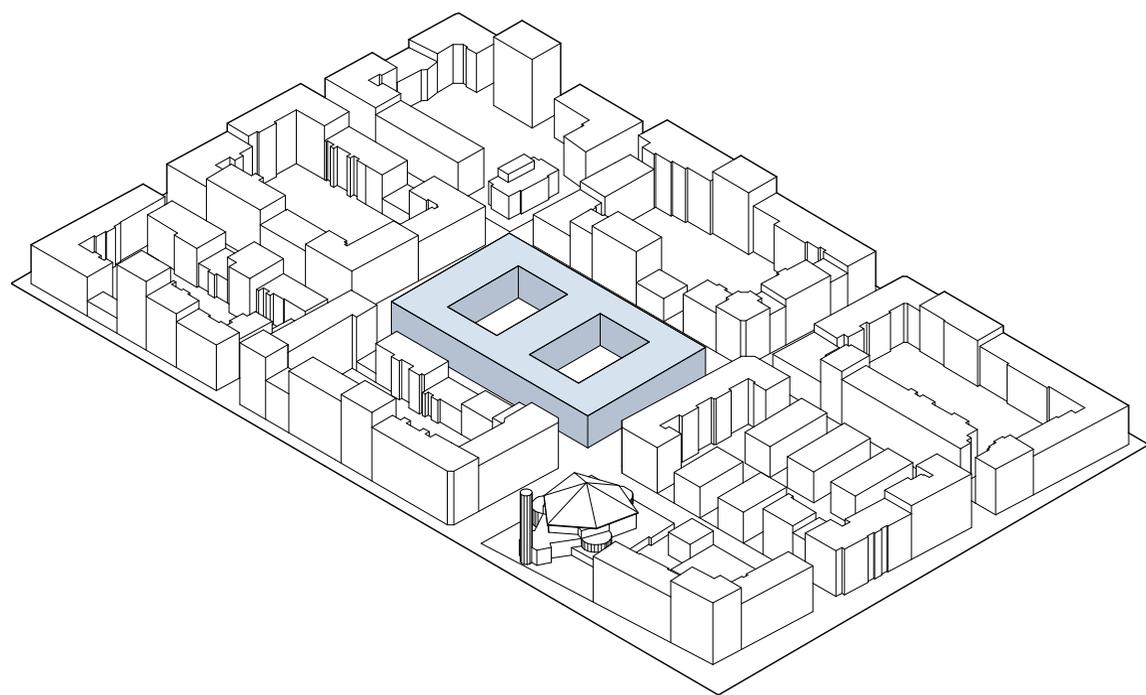


A.2.0 coefficiente di assorbimento: basso
coefficiente di scattering: basso

A.2.1 coefficiente di assorbimento: basso
coefficiente di scattering: alto

A.2.2 coefficiente di assorbimento: alto
coefficiente di scattering: basso

A.2.3 coefficiente di assorbimento: alto
coefficiente di scattering: alto



Delta SPL(A) A_2_0 - A_2_1

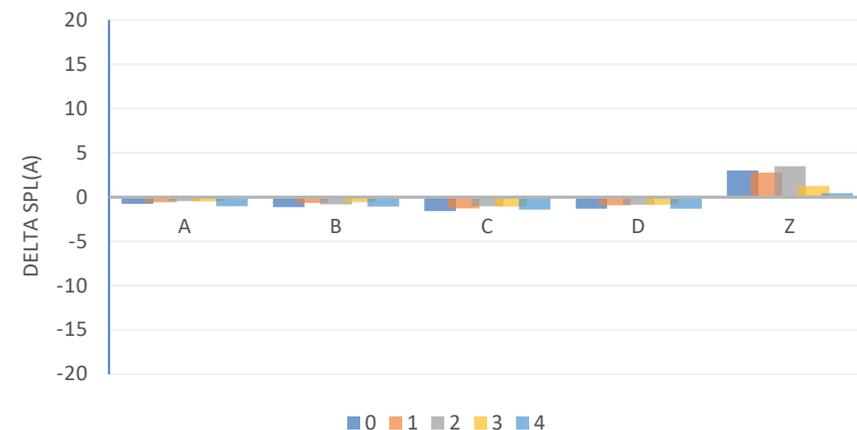


Grafico 7.28

Delta SPL(A) A_2_0 - A_2_2

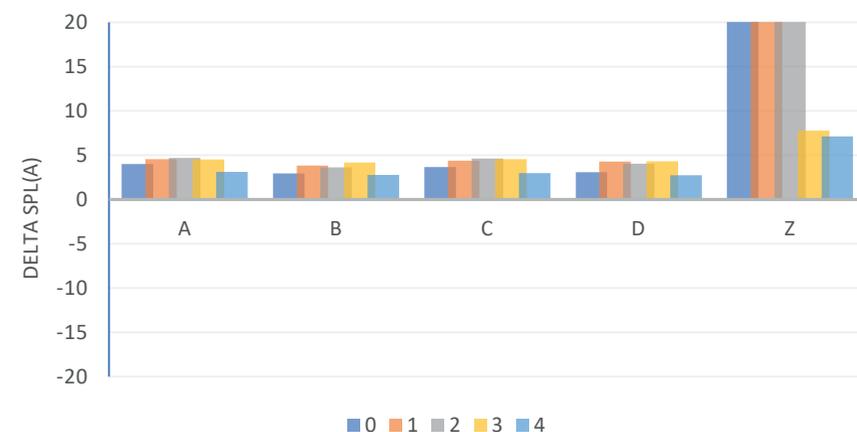


Grafico 7.29

Delta SPL(A) A_2_0 - A_2_3

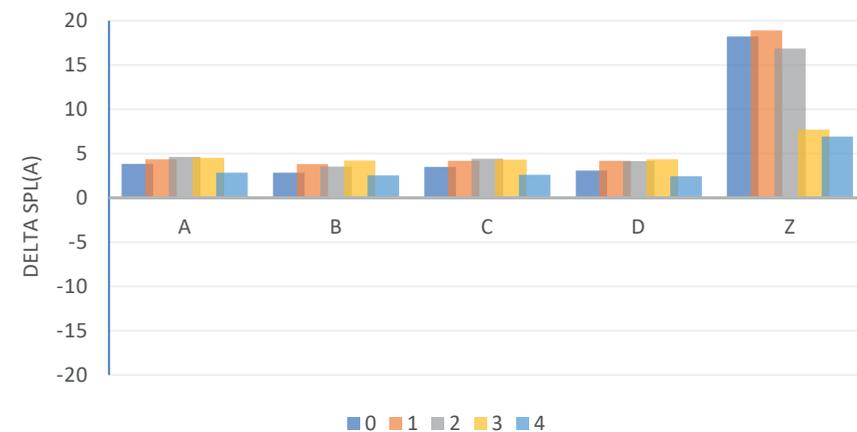
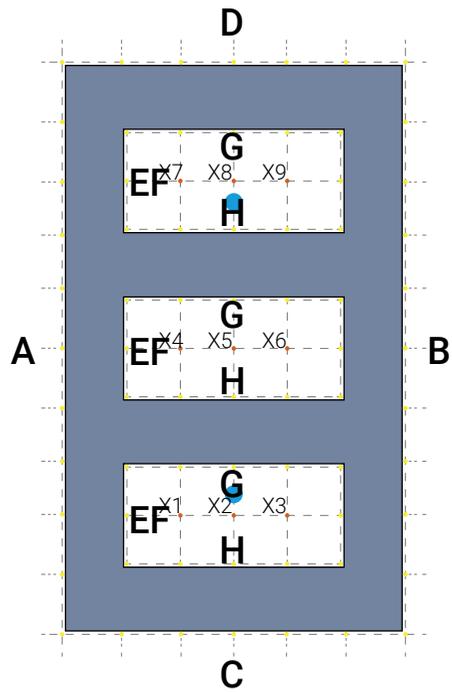


Grafico 7.30

A.3.0

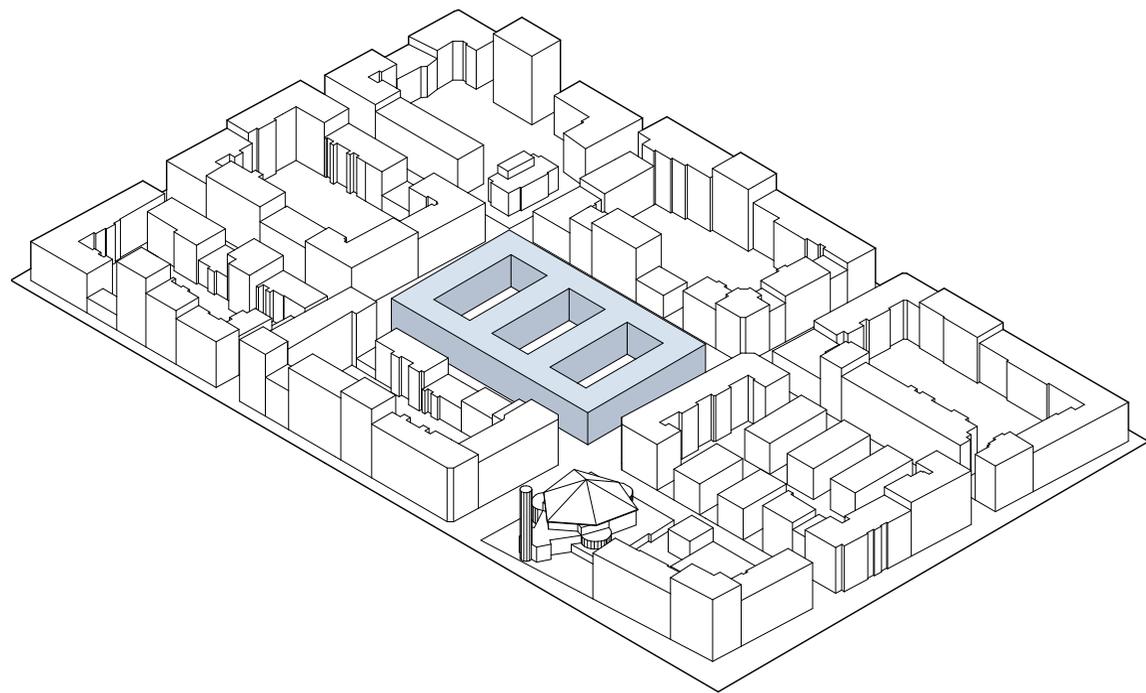


A.3.0 coefficiente di assorbimento: basso
coefficiente di scattering: basso

A.3.1 coefficiente di assorbimento: basso
coefficiente di scattering: alto

A.3.2 coefficiente di assorbimento: alto
coefficiente di scattering: basso

A.3.3 coefficiente di assorbimento: alto
coefficiente di scattering: alto



Delta SPL(A) A_3_0 - A_3_1

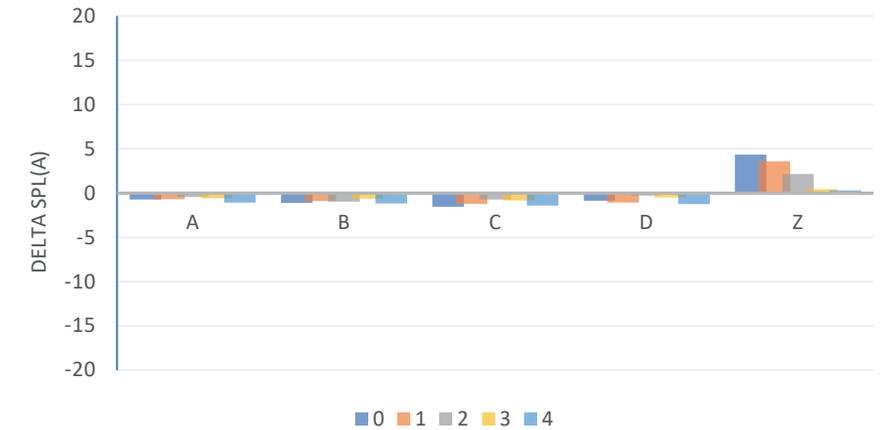


Grafico 7.31

Delta SPL(A) A_3_0 - A_3_2

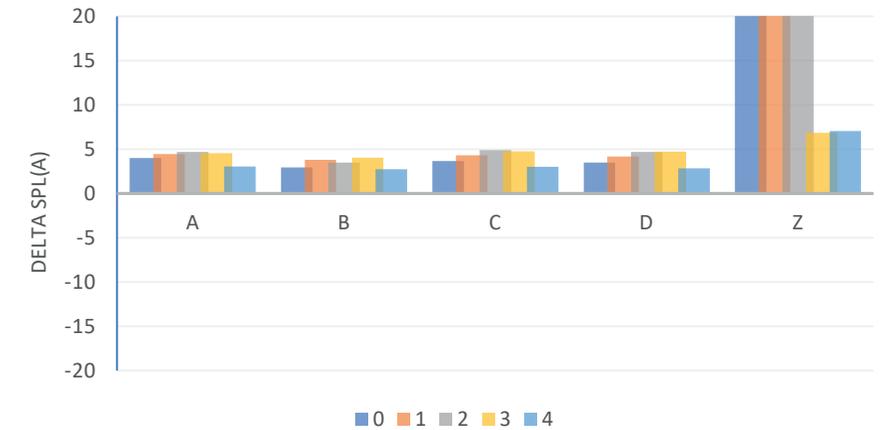


Grafico 7.32

Delta SPL(A) A_3_0 - A_3_3

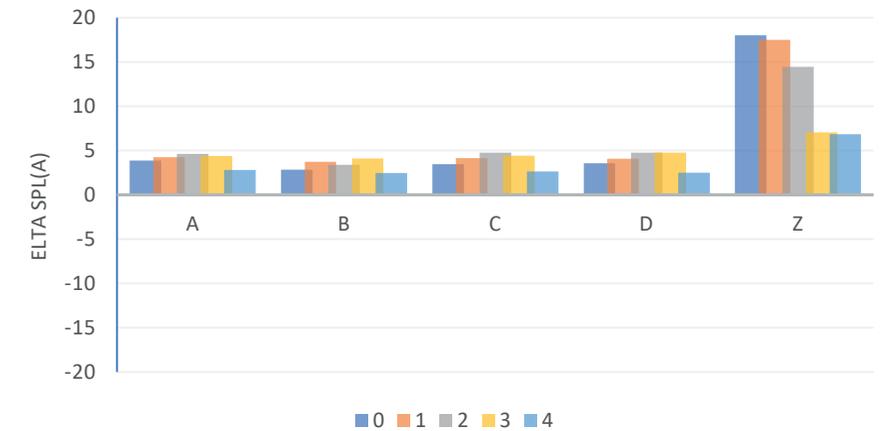
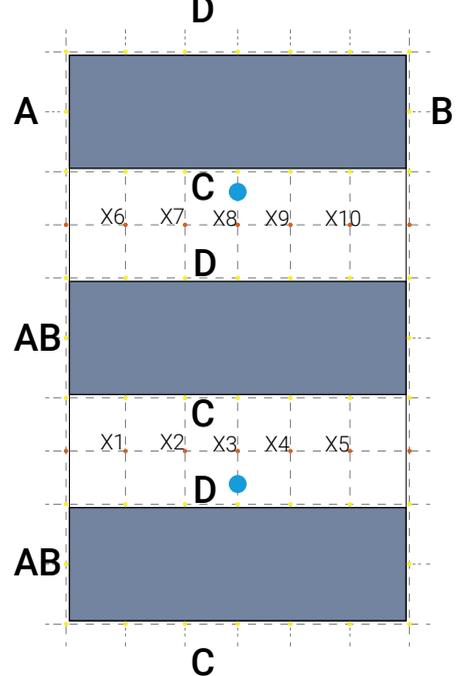


Grafico 7.33

A.4.0

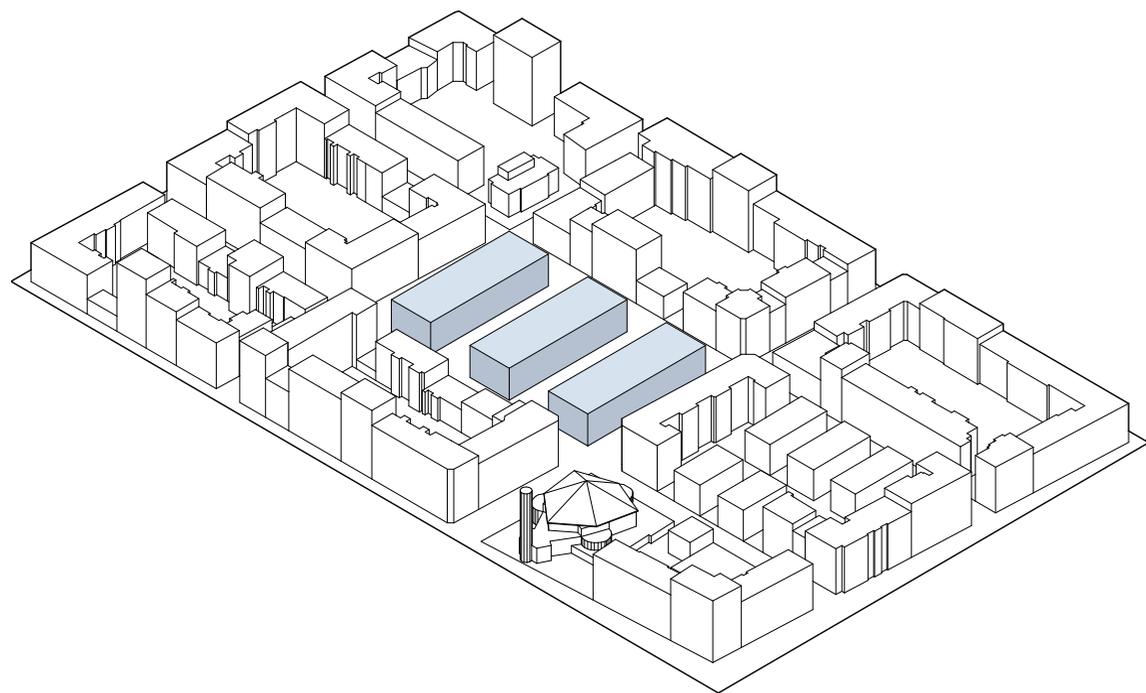


A.4.0 coefficiente di assorbimento: basso
coefficiente di scattering: basso

A.4.1 coefficiente di assorbimento: basso
coefficiente di scattering: alto

A.4.2 coefficiente di assorbimento: alto
coefficiente di scattering: basso

A.4.3 coefficiente di assorbimento: alto
coefficiente di scattering: alto



Delta SPL(A) A_4_0 - A_4_1

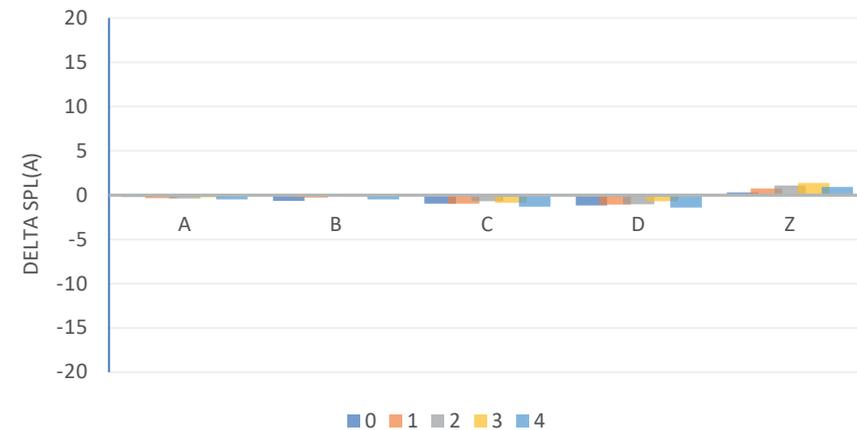


Grafico 7.34

Delta SPL(A) A_4_0 - A_4_2

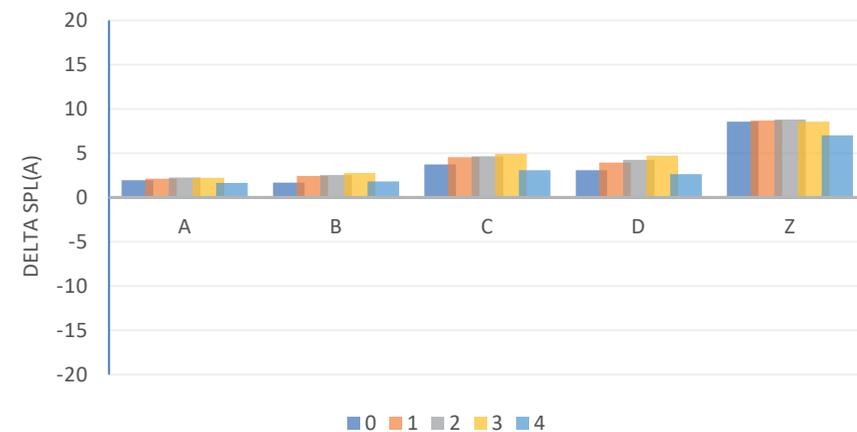


Grafico 7.35

Delta SPL(A) A_4_0 - A_4_3

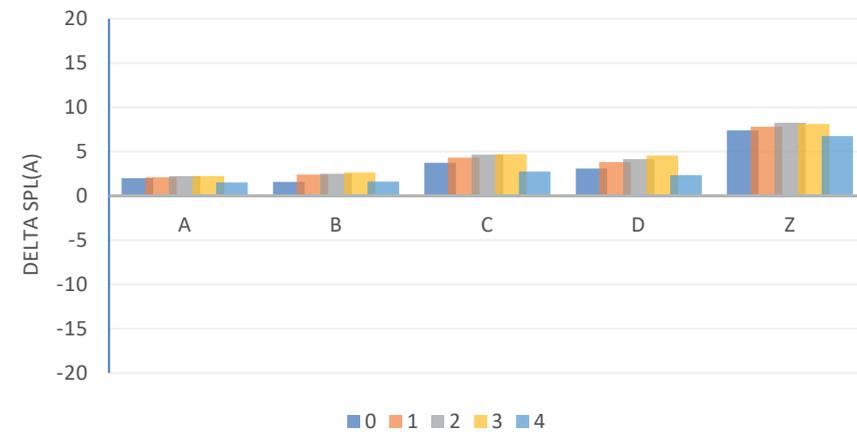
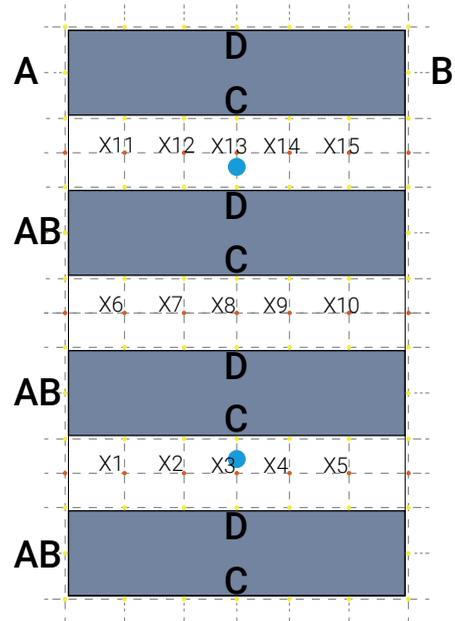


Grafico 7.36

A.5.0

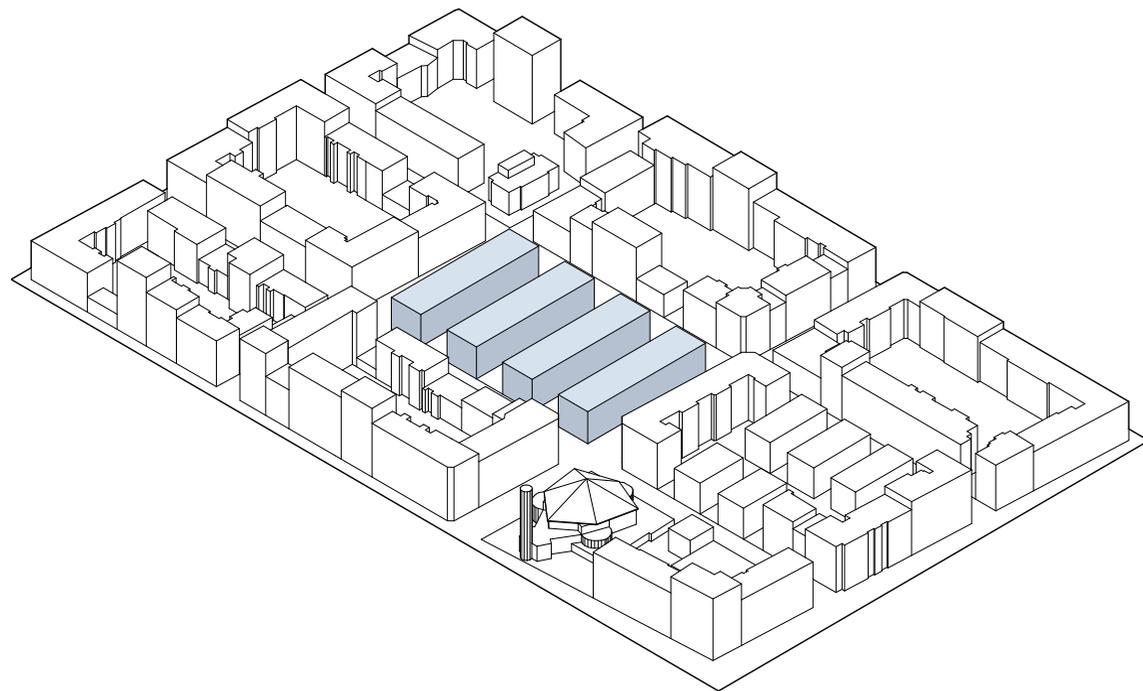


A.5.0 coefficiente di assorbimento: basso
coefficiente di scattering: basso

A.5.1 coefficiente di assorbimento: basso
coefficiente di scattering: alto

A.5.2 coefficiente di assorbimento: alto
coefficiente di scattering: basso

A.5.3 coefficiente di assorbimento: alto
coefficiente di scattering: alto



Delta SPL(A) A_5_0 - A_5_1

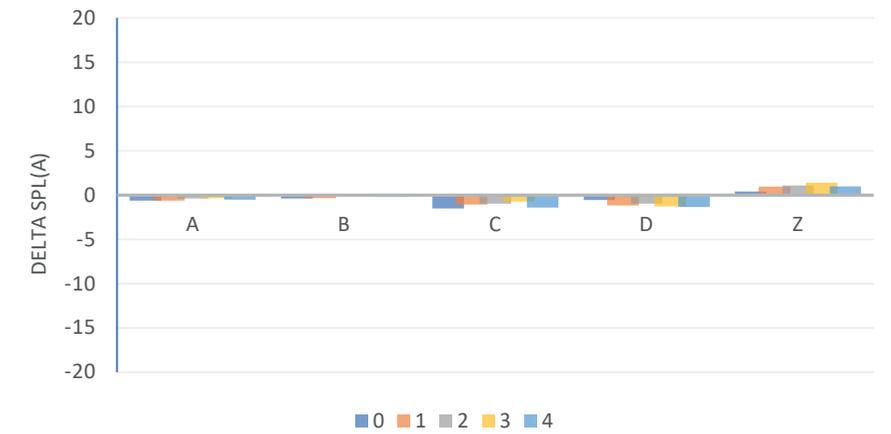


Grafico 7.37

Delta SPL(A) A_5_0 - A_5_2

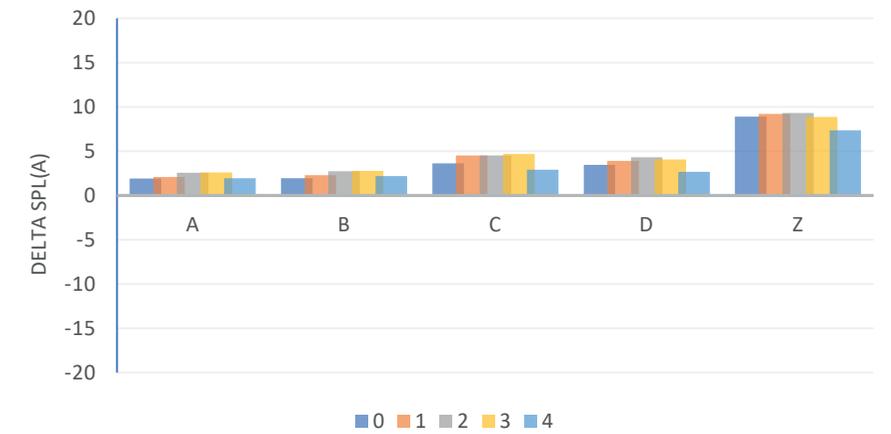


Grafico 7.38

Delta SPL(A) A_5_0 - A_5_3

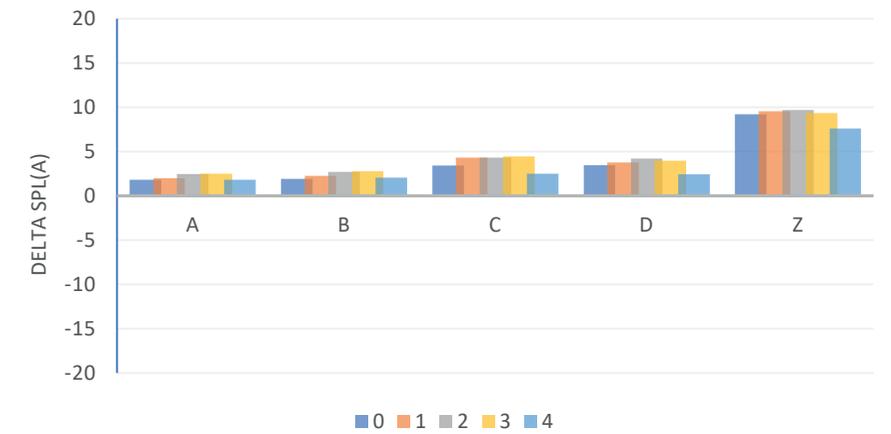
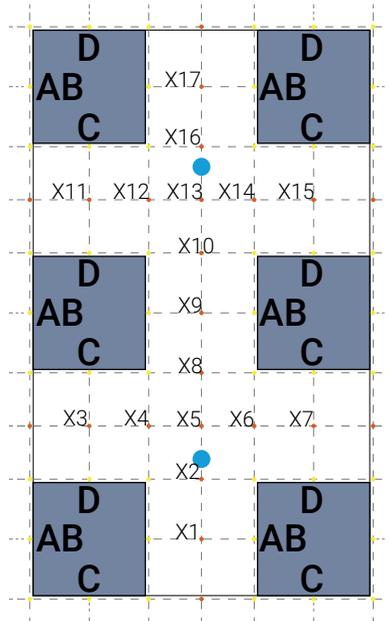


Grafico 7.39

A.6.0

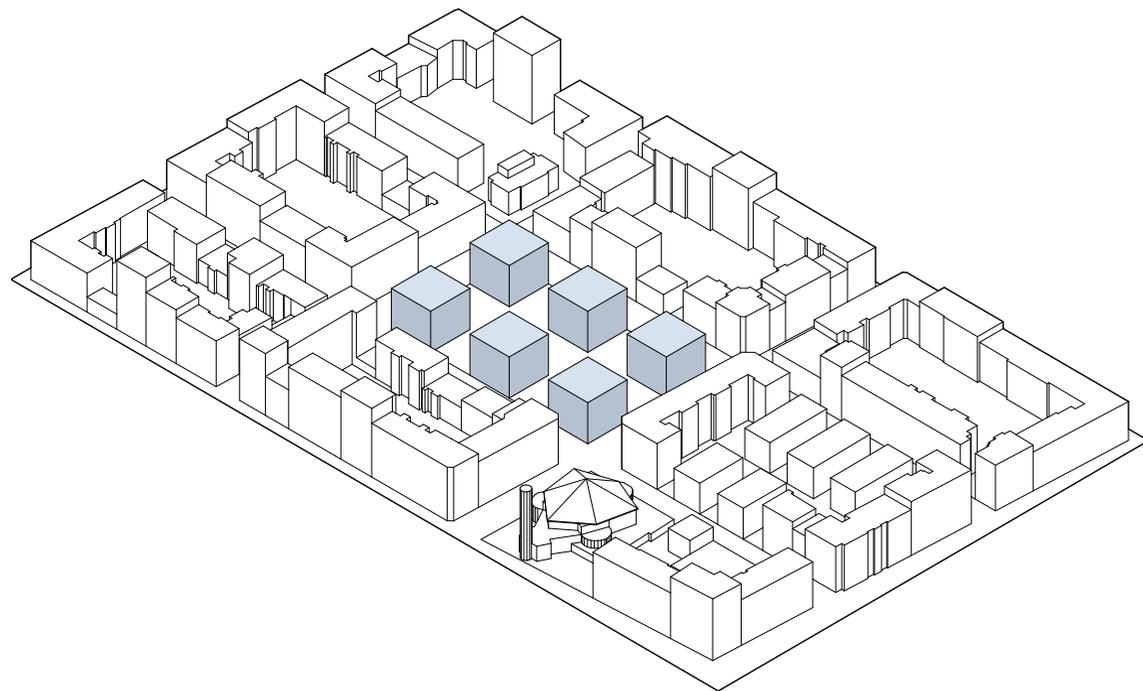


A.6.0 coefficiente di assorbimento: basso
coefficiente di scattering: basso

A.6.1 coefficiente di assorbimento: basso
coefficiente di scattering: alto

A.6.2 coefficiente di assorbimento: alto
coefficiente di scattering: basso

A.6.3 coefficiente di assorbimento: alto
coefficiente di scattering: alto



Delta SPL(A) A_6_0 - A_6_1

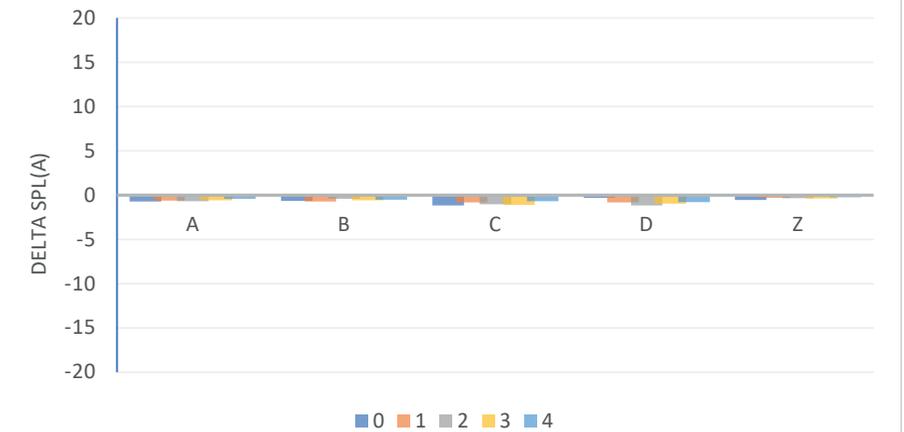


Grafico 7.40

Delta SPL(A) A_6_0 - A_6_2

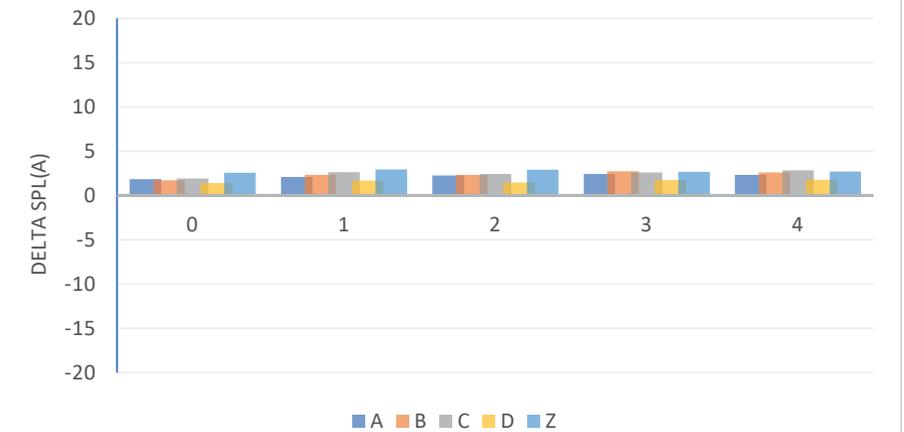


Grafico 7.41

Delta SPL(A) A_6_0 - A_6_3

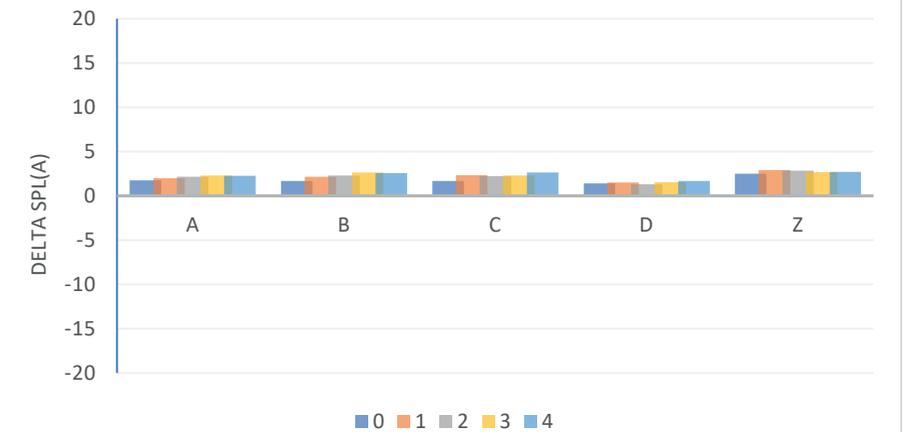


Grafico 7.42

7.4 Analisi statistica dei risultati

L'ultimo step di analisi del lavoro di tesi consiste nell'analisi statistica della grande quantità di dati raccolti, con l'obiettivo di determinare eventuali correlazioni fra i parametri e fattori caratteristici delle diverse configurazioni testate, e per determinare quali fra questi o quali combinazioni di parametri hanno una correlazione statistica sulle condizioni acustiche nelle diverse configurazioni, ovvero quali fattori determinano una reazione nei livelli acustici.

Questo viene fatto attraverso un'analisi Univariate GLM, ovvero un'analisi univariata di un modello lineare generalizzato, una tecnica di statistica descrittiva che, confrontando l'andamento di una variabile dipendente (ovvero il cui valore è dipendente dal comportamento di una serie di fattori fissi), determina quali fattori influenzano la variabile e quanta influenza un loro cambiamento ha sulla variabile dipendente.

Questa tecnica funziona analizzando un campione di dati facente parte di un insieme di dati normalmente distribuiti e caratterizzati da un'omogeneità delle varianze analizzate.

Nel caso in analisi si vuole determinare quali fattori, come ad esempio tipologia di isolato o coefficienti acustici, determinano l'andamento della variabile fissa, ovvero il livello globale o il livello globale ponderato.

L'analisi verifica sia la correlazione dei singoli fattori con le variabili dipendenti, sia la correlazione delle possibili combinazioni di tutti i fattori.

L'analisi è stata impostata separando in due macro gruppi dei ricevitori delle facciate esterne e quelli interni all'isolato in quanto parte di composizioni di dati in condizioni differenti, non riconducibili ad un unico insieme di valori.

I dati di tutti i ricevitori di ogni tipologia e ogni combinazione di coefficienti sono stati raccolti e ad ogni valore dei livelli calcolati nelle simulazioni sono stati associati i fattori caratteristici di cui si vogliono verificare eventuali correlazioni, ovvero tipologia dell'isolato, facciata, numero di piano, coefficiente di assorbimento, coefficiente di scattering e, nel caso di ricevitori esterni la distanza dagli spigoli dell'isolato, nel caso di ricevitori interni all'isolato, la distanza dagli spigoli dei cortili (Immagine 7.37). Questi ultimi due parametri sono stati inseriti per verificare eventuali correlazioni legate alla vicinanza di un ricevitore a elementi geometrici dell'ambiente particolari, come gli incroci delle vie in cui si trovano le sorgenti o la geometria caratteristica degli spazi interni agli isolati, come ad esempio la presenza di spigoli degli edifici, sia concavi che convessi. Questo lavoro di catalogazione e classificazione dei dati è stato svolto tramite l'utilizzo di fogli excel grazie ai sistemi di organizzazione e di nomenclatura dei dati precedentemente adottati.

Le analisi sono state svolte utilizzando SPSS, un noto software per l'analisi

statistica.

L'analisi statistica è stata svolta sui dati relativi al al Livello Globale ponderato SPL(A). Inizialmente nel processo di analisi sono stati considerati anche i dati relativi al livello di pressione sonora SPL in bande d'ottava, ma il numero di dati eccedeva le capacità del software che non riusciva a terminare il processo di analisi. Dal momento che i dati descrittivi non indicavano correlazioni degne di nota legate alle diverse frequenze si è optato per l'uso esclusivo del livello globale ponderato.

	Parametro	value	ricevitore	tipoisolato	ID_facciata	Nr_piano	Distanza_spigoli_strada	Coefficiente_alfa_facciate	Coefficiente_scattering_facciate
4146	SPL(A)	61,2	A.8.0	A_4	A	0	30,60	0.74	0.50
4147	SPL(A)	61,0	A.8.1	A_4	A	1	30,60	0.74	0.50
4148	SPL(A)	60,9	A.8.2	A_4	A	2	30,60	0.74	0.50
4149	SPL(A)	60,0	A.8.3	A_4	A	3	30,60	0.74	0.50
4150	SPL(A)	59,9	A.8.4	A_4	A	4	30,60	0.74	0.50
4151	SPL(A)	61,0	A.9.0	A_4	A	0	21,20	0.74	0.50
4152	SPL(A)	61,6	A.9.1	A_4	A	1	21,20	0.74	0.50
4153	SPL(A)	61,3	A.9.2	A_4	A	2	21,20	0.74	0.50
4154	SPL(A)	60,8	A.9.3	A_4	A	3	21,20	0.74	0.50
4155	SPL(A)	59,6	A.9.4	A_4	A	4	21,20	0.74	0.50
4156	SPL(A)	65,2	B.1.0	A_4	B	0	,00	0.74	0.50
4157	SPL(A)	65,0	B.1.1	A_4	B	1	,00	0.74	0.50
4158	SPL(A)	64,6	B.1.2	A_4	B	2	,00	0.74	0.50
4159	SPL(A)	64,2	B.1.3	A_4	B	3	,00	0.74	0.50
4160	SPL(A)	62,5	B.1.4	A_4	B	4	,00	0.74	0.50
4161	SPL(A)	61,2	B.10.0	A_4	B	0	10,60	0.74	0.50
4162	SPL(A)	60,3	B.10.1	A_4	B	1	10,60	0.74	0.50
4163	SPL(A)	60,8	B.10.2	A_4	B	2	10,60	0.74	0.50
4164	SPL(A)	59,2	B.10.3	A_4	B	3	10,60	0.74	0.50
4165	SPL(A)	59,0	B.10.4	A_4	B	4	10,60	0.74	0.50
4166	SPL(A)	65,7	B.11.0	A_4	B	0	,00	0.74	0.50
4167	SPL(A)	65,3	B.11.1	A_4	B	1	,00	0.74	0.50
4168	SPL(A)	64,4	B.11.2	A_4	B	2	,00	0.74	0.50
4169	SPL(A)	63,7	B.11.3	A_4	B	3	,00	0.74	0.50
4170	SPL(A)	62,6	B.11.4	A_4	B	4	,00	0.74	0.50
4171	SPL(A)	63,0	B.2.0	A_4	B	0	10,60	0.74	0.50
4172	SPL(A)	62,3	B.2.1	A_4	B	1	10,60	0.74	0.50
4173	SPL(A)	63,0	B.2.2	A_4	B	2	10,60	0.74	0.50
4174	SPL(A)	61,9	B.2.3	A_4	B	3	10,60	0.74	0.50
4175	SPL(A)	60,6	B.2.4	A_4	B	4	10,60	0.74	0.50
4176	SPL(A)	63,1	B.3.0	A_4	B	0	21,20	0.74	0.50
4177	SPL(A)	62,4	B.3.1	A_4	B	1	21,20	0.74	0.50
4178	SPL(A)	62,3	B.3.2	A_4	B	2	21,20	0.74	0.50
4179	SPL(A)	62,1	B.3.3	A_4	B	3	21,20	0.74	0.50

Immagine 7.37 Un estratto della struttura dei dati e dei relativi fattori usati per l'analisi statistica.

7.4.1 Analisi dati ricevitori esterni

Le ipotesi preliminari da verificare tramite l'analisi sono:

- i livelli acustici sono influenzati dalla tipologia geometrica di isolato
- i livelli acustici sono influenzati dall'altezza del piano considerato
- i livelli acustici sono influenzati dal coefficiente di assorbimento dei materiali della facciata
- i livelli acustici sono influenzati dal coefficiente di scattering dei materiali della facciata
- i livelli acustici sono influenzati da una o più combinazioni dei precedenti fattori

Inizialmente sono stati considerati e catalogati per l'analisi anche i fattori relativi alla posizione dei ricevitori nell'isolato, che veniva espressa tramite la distanza dagli spigoli, e le diverse frequenze del livello di pressione sonora (SPL). Purtroppo entrambi sono stati scartati dall'analisi in quanto aumentavano esponenzialmente la già grande quantità di dati, eccedendo le capacità del programma che non era in grado di svolgere alcune delle analisi a causa dell'enorme numero di combinazioni possibili.

Tests of Normality							
Coefficiente_alfa_facciate		Kolmogorov-Smirnov (a.)			Shapiro-Wilk		
		Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
SPLa	0.05	0,060	2310	0,000	0,990	2310	0,000
	0.74	0,055	2310	0,000	0,990	2310	0,000
a. Lilliefors Significance Correction							
Tests of Normality							
Coefficiente_scattering_facciate		Kolmogorov-Smirnov (a.)			Shapiro-Wilk		
		Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
SPLa	0.10	0,099	2310	0,000	0,978	2310	0,000
	0.50	0,088	2310	0,000	0,977	2310	0,000
a. Lilliefors Significance Correction							
Tests of Normality							
tipo isolato		Kolmogorov-Smirnov (a.)			Shapiro-Wilk		
		Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
SPLa	A_0	0,103	620	0,000	0,969	620	0,000
	A_1	0,085	640	0,000	0,982	640	0,000
	A_2	0,094	640	0,000	0,979	640	0,000
	A_3	0,096	640	0,000	0,977	640	0,000
	A_4	0,103	640	0,000	0,960	640	0,000
	A_5	0,069	800	0,000	0,985	800	0,000
	A_6	0,090	640	0,000	0,980	640	0,000
a. Lilliefors Significance Correction							

Tests of Normality							
Nr_piano		Kolmogorov-Smirnov (a.)			Shapiro-Wilk		
		Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
SPLa	0	0,118	928	0,000	0,963	928	0,000
	1	0,119	924	0,000	0,967	924	0,000
	2	0,125	908	0,000	0,959	908	0,000
	3	0,122	896	0,000	0,971	896	0,000
	4	0,071	896	0,000	0,972	896	0,000
a. Lilliefors Significance Correction							

Tabella 7.1 risultati test di normalità, in grassetto i valori significativi.

La Tabella 7.1 riporta la verifica dei prerequisiti necessari per svolgere l'analisi, ovvero l'ipotesi di normalità della distribuzione del campione di dati analizzato e l'omogeneità della varianza, la misura che indica quanto i singoli valori della variabile si discostino quadraticamente dalla media matematica dei valori. L'ipotesi di normalità si può considerare verificata quando il p-value risulta superiore al 5% ovvero: $p > 0.05$.

Come si può vedere entrambi i test di normalità di Shapiro-Wilk e Kolmogorov-Smirnov non risultano verificati per la distribuzione dei dati relativi alla variabile di SPL(A) in relazione ai diversi fattori fissi considerati (valori in grassetto nella tabella).

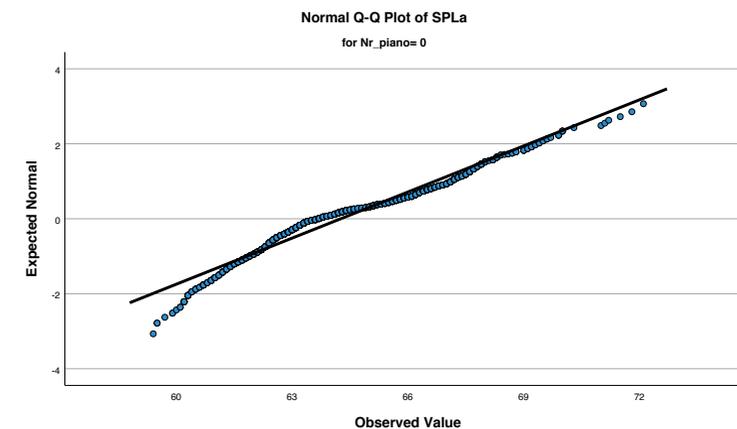


Grafico 7.43 distribuzione dei dati sulla retta di distribuzione normale.

Il Grafico 7.43 riporta la distribuzione del livello di SPL(A) in relazione alla retta, che rappresenta la distribuzione normale dei dati e si può infatti notare un leggero scostamento.

Dal momento che l'ipotesi di normalità non è verificata nei test, è necessario

verificare che i valori di Skewness e Kurtosis siano compresi entro i valori di ± 2 , ovvero i limiti accettabili di deviazione dalla distribuzione normale entro i quali è comunque possibile svolgere l'analisi univariata.

Nella Tabella 7.2 delle descriptive statistics possiamo vedere che con un valore di 0.374 di skewness e di 0.036 di kurtosis i dati rientrano ben al di sotto della tolleranza di ± 2 per poter eseguire l'analisi univariata. Essenzialmente questo significa che la deviazione dei dati dalla normale rientra entro i parametri accettabili dell'analisi ed è quindi possibile procedere.

Descriptive Statistics										
	N	Minimum	Maximum	Mean	Std. Deviation	Variance	Skewness		Kurtosis	
	Statistic	Statistic	Statistic	Statistic	Statistic	Statistic	Statistic	Std. Error	Statistic	Std. Error
SPLa	4620	56.2	72.6	63.513	2.7992	7.836	0.374	0.036	-0.373	0.072
Valid N (listwise)	4620									

Tabella 7.2 statistiche descrittive che riportano i valori di Skewness e Kurtosis (in grassetto).

7.4.1 Correlazioni analisi univariata ricevitori esterni

Come si può vedere nella Tabella 7.3 di correlazione univariata, diversi fattori fissi sono correlati all'andamento dei valori del livello globale ponderato SPL(A). Una correlazione è considerata significativa quando è caratterizzata da un p-value < 0.05 (probability value). Nel caso dei livelli dei ricevitori esterni possiamo vedere che, se considerati singolarmente, risultano significativamente correlati tutti i fattori considerati nelle ipotesi iniziali, ovvero la tipologia di isolato, il numero di piano, il coefficiente di assorbimento e il coefficiente di scattering. Per ognuno di questi fattori viene infatti riportato un p-value uguale a < 0.001 (indicati in grassetto nella tabella) indicando una forte correlazione statistica con l'andamento della variabile.

Osservando i valori dell'effect size possiamo anche fare una classificazione "gerarchica" dei singoli fattori. L'effect size infatti è la porzione di varianza della variabile dipendente che viene associata ad una variabile indipendente o a un gruppo di queste e viene espresso dal valore di Partial Eta Squared. Un valore maggiore corrisponde ad una percentuale di effetti legati al fattore maggiore. Tra i fattori fissi relativi ai ricevitori esterni possiamo quindi vedere come il coefficiente di assorbimento risulti il primo fattore di correlazione, con un Effect size di 0.549 (55%), seguito dal numero di piano con 0.231 (23%) e dalla tipo-

7.4.1 Risultati univariata ricevitori esterni

Tests of Between-Subjects Effects								
Dependent Variable: SPLa								
Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.	Partial Eta Squared	Noncent. Parameter	Observed Power (b)
Corrected Model	22952,519a	139	165.126	58.703	0.000	0.649	8159.767	1.000
Intercept	18161508.437	1	18161508.437	6456532.478	0.000	0.999	6456532.478	1.000
tipo_isolato	2333.305	6	388.884	138.251	0.000	0.158	829.505	1.000
Nr_piano	3738.174	4	934.543	332.236	0.000	0.231	1328.945	1.000
Coefficiente_alfa_facciate	15108.684	1	15108.684	5371.234	0.000	0.549	5371.234	1.000
Coefficiente_scattering_facciate	269.049	1	269.049	95.649	0.000	0.021	95.649	1.000
tipoisolato * Nr_piano	354.811	24	14.784	5.256	0.000	0.028	126.137	1.000
tipoisolato * Coefficiente_alfa_facciate	745.260	6	124.210	44.157	0.000	0.057	264.945	1.000
tipoisolato * Coefficiente_scattering_facciate	26.976	6	4.496	1.598	0.143	0.002	9.590	0.621
Nr_piano * Coefficiente_alfa_facciate	147.080	4	36.770	13.072	0.000	0.012	52.288	1.000
Nr_piano * Coefficiente_scattering_facciate	6.458	4	1.614	0.574	0.682	0.001	2.296	0.192
Coefficiente_alfa_facciate * Coefficiente_scattering_facciate	138.847	1	138.847	49.361	0.000	0.011	49.361	1.000
tipoisolato * Nr_piano * Coefficiente_alfa_facciate	100.754	24	4.198	1.492	0.058	0.008	35.819	0.968
tipoisolato * Nr_piano * Coefficiente_scattering_facciate	7.867	24	0.328	0.117	1.000	0.001	2.797	0.111
tipoisolato * Coefficiente_alfa_facciate * Coefficiente_scattering_facciate	13.770	6	2.295	0.816	0.557	0.001	4.895	0.329
Nr_piano * Coefficiente_alfa_facciate * Coefficiente_scattering_facciate	3.146	4	0.787	0.280	0.891	0.000	1.119	0.113
tipoisolato * Nr_piano * Coefficiente_alfa_facciate * Coefficiente_scattering_facciate	1.810	24	0.075	0.027	1.000	0.000	0.643	0.062
Error	12410.466	4412	2.813					
Total	18401355.390	4552						
Corrected Total	35362.985	4551						

a. R Squared = ,649 (Adjusted R Squared = ,638)

b. Computed using alpha = ,05

Immagine 7.38 risultati analisi univariata dei valori di SPL(A) dei ricevitori esterni all'isolato, in grassetto i valori significativi.

logia di isolato di 0.158 (16%) entrambi significativamente più bassi rispetto al coefficiente di assorbimento.

Inoltre è interessante notare come il coefficiente di scattering, sebbene significativamente correlato presenti un dato di 0.021 (2%) decisamente al di sotto degli altri fattori singoli e di conseguenza con molta meno influenza sugli effetti esercitati sui valori di SPL(A).

Possiamo quindi affermare che nel caso dei ricevitori delle facciate esterne agli isolati l'aumento del coefficiente di assorbimento di facciata sia la strategia più efficace per controllare le condizioni dei livelli acustici in facciata.

I grafici relativi alle medie marginali stimate per i valori di SPL(A) (Immagine 7.39) inoltre mostrano chiaramente un leggero aumento dei livelli all'aumentare del valore del coefficiente di scattering, confermando l'osservazione fatta in

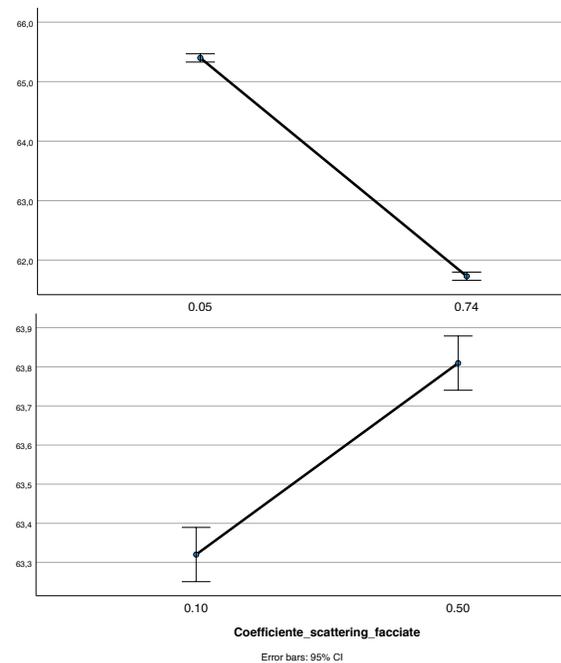


Immagine 7.39 I grafici riportano le medie marginali stimate per la variabile dipendente SPL(A) (barre d'errore 95% CI), ovvero la media stimata di risposta della variabile dipendente per ogni valore dei fattori considerati.

Si può notare bene la differenza d'impatto fra coefficiente di assorbimento e di scattering. La differenza fra i risultati ottenuti utilizzando un coefficiente di assorbimento alto e uno basso è molto maggiore di quella fra i due coefficienti di scattering (appena 0,2 punti di differenza). Il grafico inoltre conferma l'osservazione fatta in precedenza circa il leggero aumento dei livelli acustici causato dall'aumento di scattering in alcuni casi.

precedenza circa l'aumento dei livelli in certi casi.

Inoltre si nota la correlazione dei livelli anche con alcune delle combinazioni incrociate fra i diversi fattori, nello specifico il coefficiente di assorbimento combinato rispettivamente con il numero di piano e con la tipologia di isolato. La combinazione di questi tre fattori insieme invece non risulta significativamente correlata alle variazioni di SPL(A).

L'altra combinazione significativa è quella dei due coefficienti, di assorbimento e scattering, anch'essa correlata all'andamento della variabile.

Il coefficiente di determinazione mostra la percentuale di variazione della variabile dipendente che viene spiegata dall'insieme dei fattori analizzati, un valore più alto significa che i fattori considerati nell'analisi spiegano i fenomeni riscontrati nella variabile e quindi si vuole ottenere un valore più alto possibile. Di conseguenza il coefficiente di determinazione indica anche la proporzione di varianza che può essere predetta partendo dalle variabili indipendenti. Nell'analisi dei livelli dei ricevitori esterni il valore di R quadro è uguale a 0,649 (0,638 per il coefficiente corretto).

Nell'Immagine 7.40 si può apprezzare chiaramente la riduzione dei livelli ai piani più alti degli edifici citata in precedenza. Inoltre si può apprezzare come i livelli medi nelle facciate esterne degli isolati, direttamente esposte alla strada, siano più bassi nel caso di isolati con pianta aperta.

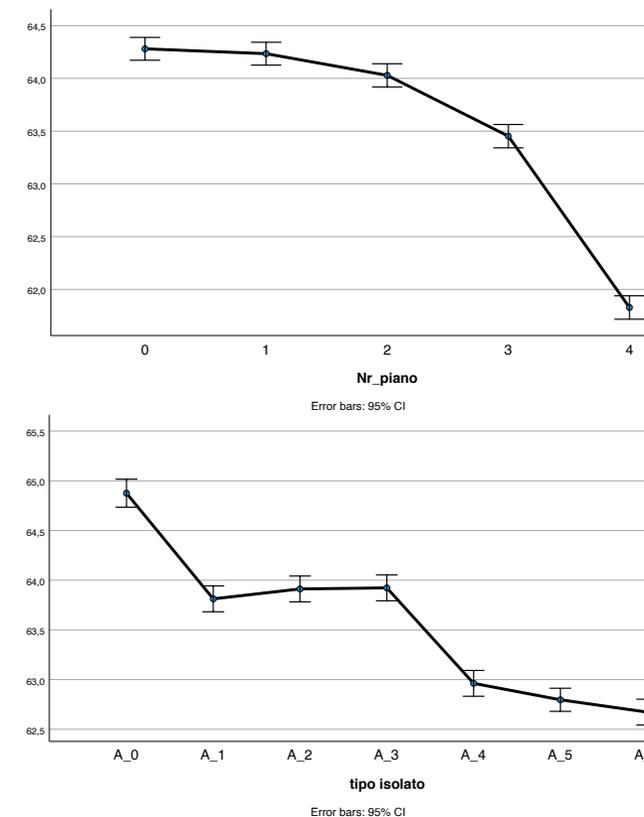


Immagine 7.40 I grafici riportano le medie marginali stimate per la variabile dipendente SPL(A) (barre d'errore 95% CI) ovvero la media stimata di risposta della variabile dipendente per ogni valore dei fattori considerati. Nel primo grafico si può vedere chiaramente l'andamento dei valori rispetto al numero di piano, con un crollo dei valori ai piani alti delle facciate rispetto ai primi tre piani.

Nel secondo grafico si può apprezzare la differenza in facciata fra isolati chiusi e aperti, già evidenziata dall'analisi dei delta fra isolati, con la leggera diminuzione dei livelli che si osserva negli isolati a pianta aperta.

7.4.2 Analisi dati ricevitori interni

Anche nel caso dei ricevitori interni all'isolato si è adottata la stessa metodologia in atto per l'analisi dei ricevitori esterni. Le ipotesi preliminari da verificare tramite l'analisi sono quindi:

- i livelli acustici sono influenzati dalla tipologia geometrica di isolato
- i livelli acustici sono influenzati dall'altezza del piano considerato
- i livelli acustici sono influenzati dal coefficiente di assorbimento dei materiali della facciata
- i livelli acustici sono influenzati dal coefficiente di scattering dei materiali della facciata
- i livelli acustici sono influenzati da una o più combinazioni dei precedenti fattori

Anche in questo caso sono stati inizialmente considerati anche i fattori relativi alla posizione dei ricevitori nell'isolato (caratterizzata tramite la distanza dagli spigoli) e le diverse frequenze del livello di pressione sonora (SPL). Entrambi sono stati scartati dall'analisi in quanto aumentavo la già grande quantità di dati, eccedendo le capacità del programma che non era in grado di svolgere l'analisi a causa dell'enorme numero di combinazioni possibili.

Tests of Normality							
Coefficiente_alfa_facciate		Kolmogorov-Smirnova			Shapiro-Wilk		
		Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
SPLa	0,05	0.118	1744	0.000	0.905	1744	0.000
	0,74	0.093	1744	0.000	0.942	1744	0.000
a. Lilliefors Significance Correction							
Tests of Normality							
Coefficiente_scattering_facciate		Kolmogorov-Smirnova			Shapiro-Wilk		
		Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
SPLa	0,10	0.112	1744	0.000	0.925	1744	0.000
	0,50	0.102	1744	0.000	0.945	1744	0.000
a. Lilliefors Significance Correction							
Tests of Normality							
tipo isolato		Kolmogorov-Smirnova			Shapiro-Wilk		
		Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
SPLa	A_0	0.135	524	0.000	0.939	524	0.000
	A_1	0.110	408	0.000	0.952	408	0.000
	A_2	0.125	376	0.000	0.933	376	0.000
	A_3	0.128	652	0.000	0.945	652	0.000

	A_4	0.166	400	0.000	0.867	400	0.000
	A_5	0.157	580	0.000	0.908	580	0.000
	A_6	0.118	548	0.000	0.903	548	0.000
a. Lilliefors Significance Correction							
Tests of Normality							
Nr_piano		Kolmogorov-Smirnova			Shapiro-Wilk		
		Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
SPLa	0	0.122	1040	0.000	0.915	1040	0.000
	1	0.124	728	0.000	0.937	728	0.000
	2	0.122	724	0.000	0.939	724	0.000
	3	0.117	720	0.000	0.931	720	0.000
	4	0.106	216	0.000	0.931	216	0.000
a. Lilliefors Significance Correction							

Tabella 7.3 Tabella risultati test di normalità, in grassetto i valori significativi.

Come si può vedere nella Tabella 7.3, anche nel caso dei ricevitori interni agli isolati, l'ipotesi di normalità dei dati non viene verificata nei test di Shapiro-Wilk e di Kolmogorov-Smirnov (valori significativi indicati in grassetto). Tutti i fattori presentano p-value con cifre molto inferiori a 0,05 in relazione a tutti i fattori fissi considerati.

Anche in questo caso si procede quindi con la verifica delle statistiche descrittive dei dati per controllare i valori di skewness e Kurtosis, riportata nella Tabella 7.4) che nel caso dei ricevitori interni corrispondono rispettivamente a -0,613 e a 0,041. Come nel caso dei dati relativi ai ricevitori esterni anche qui la discrepanza rispetto alla distribuzione normale è molto contenuta e ampiamente all'interno della tolleranza di +-2.

Descriptive Statistics										
	N	Minimum	Maximum	Mean	Std. Deviation	Variance	Skewness		Kurtosis	
	Statistic	Statistic	Statistic	Statistic	Statistic	Statistic	Statistic	Std. Error	Statistic	Std. Error
SPLa	3488	-1.1	67.4	44.001	16.2949	265.525	-0.613	0.041	-0.408	0.083
Valid N (listwise)	3488									

Tabella 7.4 Tabella statistiche descrittive che riportano i valori di Skewness e Kurtosis (in grassetto).

7.4.2 Correlazioni analisi univariata ricevitori interni

Osservando i risultati dell'analisi univariata nella Tabella 7.5 si notano delle differenze rispetto a quanto osservato nell'insieme dei dati relativi ai ricevitori esterni.

In questo caso infatti notiamo come i fattori, considerati singolarmente siano ancora correlati ai valori di SPL(A), fatta eccezione per il coefficiente di scattering che con un p-value di 0,418 non risulta significativamente correlato con la variabile dipendente. Per quanto riguarda le combinazioni di fattori, il coefficiente di assorbimento e il coefficiente di scattering restano significativamente correlati e rispetto ai ricevitori esterni molte più combinazioni risultano statisticamente correlate ai valori di SPL(A). Infatti risultano significative tutte le combinazioni incrociate fra fattori fissi, fatta eccezione per le combinazioni a due o più fattori che includono il coefficiente di scattering. Secondo questi dati quindi la correlazione del coefficiente di scattering risulta verificata solamente se combinato con il fattore di assorbimento.

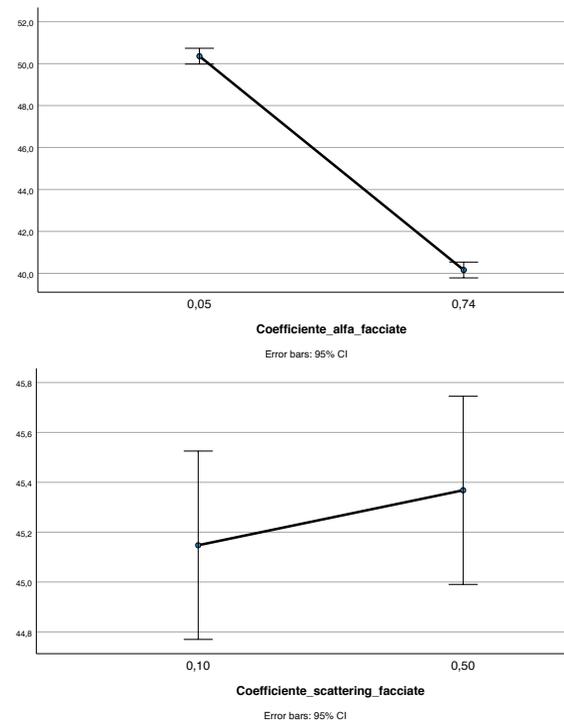


Immagine 7.41 I grafici riportano le medie marginali stimate per la variabile dipendente SPL(A) (barre d'errore 95% CI), ovvero la media stimata di risposta della variabile dipendente per ogni valore dei fattori considerati. Si può notare bene la differenza d'impatto fra coefficiente di assorbimento e di scattering. La differenza fra i risultati ottenuti utilizzando un coefficiente di assorbimento alto e uno basso è molto maggiore di quella fra i due coefficienti di scattering (appena 0,2 punti di differenza). Il grafico inoltre conferma l'osservazione fatta in precedenza circa il leggero aumento dei livelli acustici causato dall'aumento di scattering in alcuni casi.

Tests of Between-Subjects Effects								
Dependent Variable: SPLa								
Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.	Partial Eta Squared	Noncent. Parameter	Observed Power (b)
Corrected Model	840416,095a	139	6046.159	241.869	0.000	0.911	33619.802	1.000
Intercept	2758875.214	1	2758875.214	110365.377	0.000	0.971	110365.377	1.000
tipo_isolato	216921.357	6	36153.559	1446.278	0.000	0.725	8677.670	1.000
Nr_piano	28704.529	4	7176.132	287.072	0.000	0.259	1148.289	1.000
Coefficiente_alfa_facciate	35018.074	1	35018.074	1400.855	0.000	0.299	1400.855	1.000
Coefficiente_scattering_facciate	16.369	1	16.369	0.655	0.418	0.000	0.655	0.128
tipoisolato * Nr_piano	32888.399	24	1370.350	54.819	0.000	0.286	1315.660	1.000
tipoisolato * Coefficiente_alfa_facciate	5576.590	6	929.432	37.181	0.000	0.064	223.085	1.000
tipoisolato * Coefficiente_scattering_facciate	290.068	6	48.345	1.934	0.072	0.004	11.604	0.720
Nr_piano * Coefficiente_alfa_facciate	2779.325	4	694.831	27.796	0.000	0.033	111.183	1.000
Nr_piano * Coefficiente_scattering_facciate	25.827	4	6.457	0.258	0.905	0.000	1.033	0.107
Coefficiente_alfa_facciate * Coefficiente_scattering_facciate	382.632	1	382.632	15.307	0.000	0.005	15.307	0.974
tipoisolato * Nr_piano * Coefficiente_alfa_facciate	4444.005	24	185.167	7.407	0.000	0.051	177.777	1.000
tipoisolato * Nr_piano * Coefficiente_scattering_facciate	579.851	24	24.160	0.967	0.508	0.007	23.196	0.813
tipoisolato * Coefficiente_alfa_facciate * Coefficiente_scattering_facciate	737.180	6	122.863	4.915	0.000	0.009	29.490	0.993
Nr_piano * Coefficiente_alfa_facciate * Coefficiente_scattering_facciate	463.370	4	115.842	4.634	0.001	0.006	18.537	0.949
tipoisolato * Nr_piano * Coefficiente_alfa_facciate * Coefficiente_scattering_facciate	1852.142	24	77.173	3.087	0.000	0.022	74.093	1.000
Error	82192.277	3288	24.998					
Total	7539431.140	3428						
Corrected Total	922608.372	3427						

a. R Squared = ,911 (Adjusted R Squared = ,907)
b. Computed using alpha = ,05

Tabella 7.5 risultati analisi univariata dei valori di SPL(A) dei ricevitori interni all'isolato.

Va sottolineato in merito a questa combinazione il rapporto di importanza fra i due parametri. Infatti l'effect size del fattore singolo del coefficiente di assorbimento, rappresentata dal parametro di Partial Eta Squared, è maggiore dell'effect size della combinazione dei due coefficienti ($0,299 > 0,005$). Questo ci fa supporre che l'effetto della combinazione sulla varianza dei valori di SPL(A) sia notevolmente legata all'effetto del coefficiente di assorbimento rispetto a quello di scattering. Si può inoltre apprezzare nell'Immagine 7.41 grade differenza fra gli effetti sui valori medi generati dalla variazione del coefficiente di assorbimento rispetto al coefficiente di scattering.

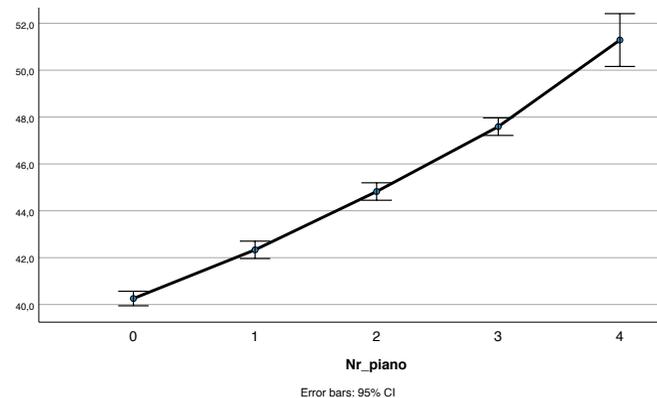
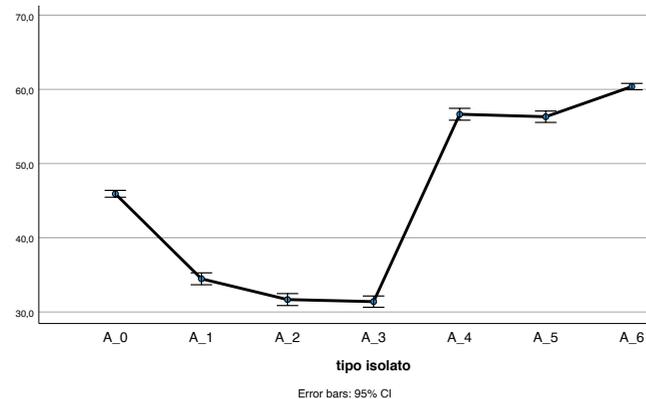


Immagine 7.42 I grafici riportano le medie marginali stimate per la variabile dipendente SPL(A) (barre d'errore 95% CI) ovvero la media stimata di risposta della variabile dipendente per ogni valore dei fattori considerati. Nel primo grafico si può vedere chiaramente l'andamento dei valori rispetto al numero di piano, opposto a quello dei coefficienti esterni.



Nel secondo grafico si osserva la netta differenza fra i livelli interni all'isolato fra i casi di isolato a corte (A1, A2, A3) e isolato aperto (A4, A5, A6). Si nota anche come l'isolato esistente di riferimento presenti una posizione intermedia, coerente con la sua struttura. Infatti si tratta di un isolato a corte che presenta delle aperture sul perimetro e degli edifici con altezze irregolari che ne riducono l'effetto di schermatura.

Il fattore con il valore di impact size maggiore è la tipologia di isolato che presenta un valore di Partial Eta Squared di $0,725$ (72%) confermando l'impatto delle diverse tipologie morfologiche sulle condizioni acustiche dell'ambiente interno agli isolati.

Questa percentuale è particolarmente rappresentativa del potenziale impatto se l'andiamo a paragonare con l'impact size del secondo valore più vicino, quello del coefficiente di assorbimento, che presenta un Partial Eta Squared di $0,259$ (25%).

La presenza di una maggior quantità di fattori e combinazioni che presentano una correlazione significativa si riflette anche nel valore del coefficiente di determinazione. Infatti il valore di R quadro sale a $0,911$ (valore di R quadro aggiustato = $0,907$) che significa quindi che una porzione maggiore della varianza di dati è determinata dai fattori fissi presi in esame.

7.5 Conclusioni analisi statistica

Il confronto dei risultati dell'analisi statistica dei set di dati relativi ai ricevitori delle facciate esterne dell'isolato e dei ricevitori delle facciate e degli spazi interni agli isolati ci forniscono delle indicazioni interessanti sugli effetti delle diverse variabili indipendenti sulle condizioni acustiche dell'ambiente considerato e degli spunti utili in ottica di progettazione.

Sembrerebbe infatti che nelle condizioni testate, per influenzare le condizioni acustiche all'interno di un canyon stradale, e conseguentemente i livelli che vengono registrati sulle facciate degli edifici, sia molto particolarmente efficace controllare le caratteristiche acustiche delle superfici, ovvero andando ad aumentare le capacità di assorbimento tramite l'uso di materiali e soluzioni tecnologiche con alti valori di coefficiente di assorbimento.

Nella protezione degli ambienti interni, e quindi ad esempio nella progettazione di spazi tranquilli, di quiet side e di facciate silenziose, sembra invece fondamentale la considerazione degli aspetti morfologici e distributivi del costruito al di là delle caratteristiche dei materiali. Questo conferma la necessità di un approccio architettonico e globale alle tematiche acustiche e all'ambiente sonoro all'interno degli spazi urbani che può essere fortemente influenzato dal costruito, evitando magari di dover ricorrere a costosi interventi riparativi a posteriori. Inoltre è importante considerare il contesto e lo scopo del progetto specifico. Infatti se le tipologie di isolati a corte interna hanno mostrato capacità di schermatura degli spazi interni indiscutibilmente superiori, gli isolati a pianta aperta presentano livelli di pressione delle facciate leggermente inferiori rispetto alle facciate esterne degli isolati a corte. Quindi se questi ultimi sono preferibili quando si vuole creare uno spazio protetto di qualche tipo, gli isolati a pianta aperta potrebbero essere più vantaggiosi in situazioni in cui la priorità è ridurre i livelli delle facciate, la cui differenza rispetto agli altri isolati potrebbe essere incrementata tramite altre strategie progettuali aggiuntive come il design di facciata tramite materiali assorbenti e di balconi e altri elementi di facciata.

Conclusioni | 08

8.1 Conclusioni

Lo studio delle simulazioni del modello acustico di un isolato di Torino ha permesso di investigare gli effetti di sei diversi tipi di morfologie architettoniche, utilizzando configurazioni di edifici a corte interna, a stecche e a torre, sulle condizioni acustiche dell'ambiente urbano a scala di isolato. Sono stati inoltre studiate diverse configurazioni delle facciate con diverse caratteristiche acustiche, andando specificamente ad intervenire sulle capacità di assorbimento e diffusione acustici delle superfici di facciata.

La metodologia di questo lavoro si è basata sull'utilizzo dei metodi di simulazione ray-tracing che tengono in considerazione anche gli effetti del fenomeno della diffrazione noto come un aspetto importante nelle valutazioni acustiche a scala urbana.

Gli effetti delle diverse variazioni sono stati presentati tramite l'uso di mappe in scala di colore e tramite griglie di ricevitori puntuali, simulando livelli di pressione sonora in frequenza e ponderati. I risultati delle simulazioni sono poi stati confrontati calcolando i delta fra i livelli delle diverse soluzioni e svolgendo un'analisi statistica che ha permesso di rilevare correlazioni fra i livelli sonori e i diversi parametri variati nelle simulazioni.

Questo ha consentito di confermare alcune delle ipotesi iniziali e di sviluppare ulteriori riflessioni sugli effetti acustici dei diversi isolati.

Questo tipo di informazioni e studi è estremamente importante se considerato in ottica delle sfide che il cambiamento climatico e continua crescita dell'urbanizzazione porranno di fronte alla progettazione degli spazi delle città. Inoltre sono utili nel contesto dell'acustica urbana e dell'ambiente sonoro negli spazi cittadini, tematiche già attuali e già parte delle attenzioni progettuali in certi paesi europei.

Un esempio in questo senso è rappresentato dal progetto New European Bauhaus, un'iniziativa "think tank" organizzata dall'unione europea come incubatore di progetti che punta a raccogliere una gamma di progetti e strategie innovative da integrare con il green deal europeo per trasformare gli spazi urbani in un ottica di sostenibilità e integrazione, arrivando alla realizzazione di progetti esemplari che possano fungere da modello. Questo tipo di iniziativa vuole incentivare ed accelerare un cambio di paradigma nel modo in cui pensiamo, progettiamo e realizziamo le nostre città, attraverso lo scambio e la condivisione di conoscenze, esperienze e idee provenienti da diverse prospettive e diversi ambiti, con l'obiettivo di migliorare gli spazi che viviamo rendendoli più accessibili, inclusivi e piacevoli.

L'attenzione al soundscape e all'acustica urbana rientra perfettamente all'interno di questa filosofia di pensiero in quanto elemento necessario alla vivibilità e

al benessere degli spazi delle città.

Chiaramente questo cambio di paradigma nella progettazione e nella costruzione ha bisogno di adeguati supporti legislativi senza i quali aspetti come l'acustica urbana difficilmente diventeranno una priorità dei progettisti, rispetto ad altri aspetti tecnici ma soprattutto economici. Questo nonostante esempi come quello dei Paesi Bassi dimostri che l'impatto del soundscape può avere anche un valore economico sugli immobili generando quindi un ritorno economico. In ogni caso, anche quando siano presenti vincoli di legge, il grande numero di variabili considerate durante le fasi di progettazione evidenzia la necessità di ricerche molto più approfondite in campo acustico, in modo tale che i progettisti abbiano la maggior quantità possibile di informazioni e opzioni al loro servizio. Inoltre è molto importante che si sviluppino procedure e metodi di lavoro standardizzati per la valutazione e la progettazione dell'acustica urbana, che forniscano indicazioni e linee guida pratiche ai progettisti, integrando anche gli aspetti percettivi relativi alla valutazione qualitativa del soundscape degli spazi progettati.

I risultati di questa tesi hanno mostrato che le condizioni acustiche urbane sono influenzate dalla morfologia degli isolati. Nello specifico si è visto come gli isolati a corte interna garantiscano un effetto di schermatura degli spazi interni superiore rispetto agli altri isolati a pianta aperta. Questo fa sì che possano essere considerati un'opzione da preferire nei casi in cui il progetto debba presentare degli spazi e delle facciate tranquille, sia per uso pubblico al piano terra, come nel caso di spazi commerciali o pubblici all'interno dei cortili, sia nel caso di abitazioni che possano usufruire di un lato della casa silenzioso, in cui disporre gli ambienti domestici più sensibili al rumore, e che possano usufruire di uno spazio pubblico "tranquillo" al piano terra.

Nel confronto fra le diverse tipologie di edifici a corte interna, rispettivamente con uno, due e tre cortili, non si sono riscontrate differenze significative, tali da poter considerare una soluzione "migliore" rispetto alle altre, anche considerando che, in un contesto reale, si tratterebbe di una scelta probabilmente guidata da altri fattori, considerati prioritari rispetto all'acustica.

Per quanto riguarda gli isolati con edifici a stecca e a torre è stata riscontrata una correlazione significativa con la riduzione dei livelli di pressione sonora sulle facciate esterne dell'isolato, affacciate sulle strade considerate come sorgente di rumore. Questa considerazione potrebbe avere riscontri progettuali utili in contesti in cui, per qualche ragione, si considerasse prioritario la mitigazione dei livelli delle facciate esposte, magari in casi in cui questi eccedano i livelli consentiti, o se ci si trovasse in contesto in cui non fosse necessario schermare un lato tranquillo, magari perché già naturalmente presente grazie

alle condizioni del contesto e dell'ambiente circostante.

Va sottolineato che, sebbene la mitigazione dei livelli in facciata riscontrata nel caso degli isolati a pianta aperta sia modesta, questa potrebbe essere incrementata tramite altri trattamenti acustici in facciata come ad esempio quelli riguardanti il design di balconi e finestre.

Allo stesso modo questi sistemi potrebbero essere consigliabili nel caso di edifici a corte interna, in cui i livelli di facciata esterni sono rispettivamente più alti, e hanno quindi bisogno di migliorare le condizioni in facciata e a livello pedonale sui lati affacciati sulle strade.

Come nel caso degli isolati a corte, fra i tre cortili a pianta aperta non ci sono differenze statisticamente significative, infatti sebbene il modello con edifici a torre presenti livelli leggermente più bassi la differenza media è al di sotto della JND (Just Noticeable Difference).

La seconda ipotesi della ricerca confermata è quella sull'influenza delle proprietà fonoassorbenti dei materiali applicati in facciata in termini di coefficienti di assorbimento delle facciate. Sebbene fosse piuttosto intuitivo che ad un maggior valore del coefficiente di assorbimento diminuissero i livelli di pressione sonora, è molto interessante notare la differenza con gli effetti legati alle variazioni delle proprietà fonodiffondenti descritte dal coefficiente di scattering. Quest'ultimo infatti ha un effetto significativamente ridotto rispetto al primo, e secondo le analisi statistiche, addirittura non significativamente correlato ai valori di pressione sonora dei ricevitori interni agli isolati. Sebbene questo studio non abbia indagato applicazioni di dettaglio di materiali fonodiffondenti in facciata, si può affermare che l'aumento delle proprietà di scattering delle superfici di facciata non è prioritario rispetto all'uso di materiali assorbenti. L'altro confronto importante che è stato fatto sui risultati relativi ai coefficienti di assorbimento è quello degli effetti statistici del coefficiente rispetto agli effetti delle diverse tipologie di isolato. Infatti, se nel caso degli spazi interni agli isolati la variabile fissa della tipologia di isolato è quella più efficace nella riduzione dei livelli, nel caso delle facciate esterne la variabile relativa all'assorbimento diventa quella gerarchicamente più importante.

Sebbene questa particolare relazione necessiti delle indagini più approfondite, soprattutto riguardo confronto di diverse tipologie di isolato e un maggior numero di fattori descrittivi, se confermata fornirebbe un'utile indicazione su quali aspetti progettuali valorizzare maggiormente in funzione degli obiettivi acustici del singolo progetto.

Lo studio ha inoltre riscontrato, sia nel confronto dei livelli sia tramite l'analisi statistica dei dati, come l'andamento dei livelli di pressione sonora e l'efficacia dei diversi interventi segua linearmente l'andamento dei piani. Infatti nel caso

delle facciate esterne i livelli diminuiscono con l'altezza del piano del ricevitore, probabilmente a causa della combinazione di una maggiore distanza dalla sorgente e della minor porzione di energia sonora riflessa contro le facciate e non fuori dal canyon urbano.

Al contrario nel caso dei ricevitori interni alle corti, i livelli aumentano all'aumentare del numero di piano. In questo caso infatti i ricevitori più in alto sono i più vicini alla sorgente lungo il percorso di propagazione delle onde sonore.

Questo fenomeno può essere molto importante da considerare nella progettazione di interventi in facciata, infatti intervenire sulle facciate ai piani inferiori può essere un buon modo per ottimizzare i costi degli interventi applicandoli solo nelle situazioni in cui la loro efficacia valga il costo aggiuntivo.

Sommario

- La morfologia architettonica degli isolati ha un grande impatto sulla propagazione del suono all'interno degli isolati e sulle facciate degli edifici e di conseguenza sui livelli di pressione sonora.
- Gli isolati a corte interna sono la soluzione che fornisce la migliore schermatura degli spazi interni all'isolato, può essere quindi la soluzione consigliata per i casi in cui sia necessario creare spazi e facciate tranquille per proteggere il benessere degli occupanti.
- Gli isolati a pianta aperta forniscono una modesta riduzione dei livelli di pressione sonora sulle facciate esposte al rumore diretto proveniente dalla strada. Si può inoltre ottenere un'ulteriore riduzione utilizzando trattamenti fonoassorbenti in facciata.
- La tipologia di isolato è il fattore più efficace e importante che determina i livelli acustici negli spazi e sulle facciate interni all'isolato.
- Il coefficiente di assorbimento delle facciate è il fattore più importante nella determinazione dei livelli di pressione sulle facciate esposte al rumore diretto proveniente dalla strada.
- Le variazioni del coefficiente di scattering, sebbene statisticamente significativo, non producono cambiamenti importanti nei livelli. Quando abbinato ad un basso coefficiente di assorbimento, un aumento della diffusività delle facciate crea un leggero aumento dei livelli in facciata.
- I livelli sonori sulle facciate direttamente esposte diminuiscono all'aumentare dell'altezza dei piani degli edifici.
- I livelli sonori sulle facciate interne all'isolato diminuiscono ai piani più bassi dall'isolato, questo perché sono i più lontani dalla sorgente lungo il percorso di propagazione delle onde sonore e quelli maggiormente schermati dagli edifici.

Limiti e futuri sviluppi

Lo studio svolto in questa tesi presenta alcuni limiti che possono dare spunto per possibili sviluppi futuri.

Innanzitutto non è stato possibile calibrare i modelli acustici usati per le simulazioni con i dati di misurazioni acustiche effettuate sul campo, per verificare che i risultati del modello fossero corrispondenti alle condizioni reali del contesto studiato.

Questo ha fatto sì che i valori assoluti ricavati dalle simulazioni non possano essere confermati rispetto alla condizione reale, tuttavia le simulazioni hanno consentito di confrontare le misure relative fra i diversi modelli fornendo un'indicazione valida del loro comportamento e delle loro differenze relative.

Uno degli aspetti critici evidenziato dal lavoro di simulazione e di analisi svolto è rappresentato dalla mancanza di strumenti e software adeguati a integrare l'acustica in un processo progettuale su ampia scala. Se infatti il metodo di lavoro può essere adeguato per finalità di ricerca, ad oggi sono molto pochi i software che consentono di integrare le analisi acustiche sin dalle prime fasi di progetto, specialmente in progetti di grandi dimensioni in cui è ormai essenziale l'integrazione dei diversi ambiti di progettazione tramite l'uso di piattaforme parametriche.

Inoltre anche da un punto di vista di ricerca sono pochi i software di simulazione con le caratteristiche ideali a trattare ambienti esterni urbani con un alto livello di dettaglio, o che considerino adeguatamente fenomeni acustici tipici degli spazi urbani come ad esempio la trasmissione per diffrazione ai bordi. Un'ulteriore limite riguardante il modello acustico è rappresentato dall'utilizzo di un software geometrico (Odeon) infatti secondo alcuni studi presenti in letteratura [40, 80,] questa tipologia di metodo di simulazione potrebbe presentare delle problematiche di precisione e affidabilità dei risultati in un contesto urbano. Per questo motivo un possibile sviluppo potrebbe essere la verifica dei dati ottenuti tramite software wave-based.

Questi aspetti riguardanti i sistemi di simulazione hanno evidenziato come la scelta di programmi per questo tipo di applicazione specifica sia molto limitata, soprattutto nell'ambito di programmi commerciali completi utilizzabili in contesti di progettazione, soprattutto nelle fasi di early design e non di ricerca.

Si sottolinea inoltre come il numero di variazioni simulate e valutate in questo studio sia relativamente limitato. Questo in concomitanza con la scarsa letteratura e gli studi sulla morfologia urbana a scala intermedia fra la progettazione di dettaglio e la pianificazione urbana, rendono quindi necessari ulteriori ricerche per confermare e verificare i risultati di questo studio, e per ampliarli simulando diversi contesti un maggior numero di contesti, di morfologie e di tipologie di sorgenti di rumore.

Bibliografia | 09

1. United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division (2019). *World Urbanization Prospects: The 2018 Revision (ST/ESA/SER.A/420)*. New York: United Nations.
2. World Health Organization, *Environmental Noise Guidelines for the European Region*, 2018, ISBN 978 92 890 5356 3
3. P. Delaitre, C. Lavandier and D. Masson, "Characterization of quiet areas with a new indicator of contrast," in *Proceedings of AIA-DAGA Euroregio Conference*, Merano, 2013.
4. Sarah R. Payne, Neil Bruce, *Exploring the Relationship between Urban Quiet Areas and Perceived Restorative Benefits*. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2019, 16, 1611. doi:10.3390/ijerph16091611
5. Dick Botteldooren, Tjeerd Andringa, Itziar Aspuru, A. Lex Brown, Danièle Dubois, Catherine Guastavino, Jian Kang, Catherine Lavandier, Mats Nilsson, Anna Preis, and Brigitte Schulte-Fortkamp. *From Sonic Environment to Soundscape*. Jian Kang, Brigitte Schulte-Fortkamp, *Soundscape and the Built Environment*. Boca Raton, CRC Press Taylor & Francis Group, 2016, 17-41. ISBN: 978-1-4822-2632-4
6. Sheaf square Sheffield, 30/6/21, https://urbanidentity.info/projects/sheffield_sheaf_square/
7. Marble cemetery New York, 30/6/21, <https://marblecemetery.org/>
8. Plaza de Catalunya, Barcelona, 30/6/2021, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Pla%C3%A7a_catalunya_ci8.JPG
9. Irene van Kamp, Ronny Klæboe, A. Lex Brown, and Peter Lercher, *Soundscapes, Human Restoration, and Quality of Life*. Jian Kang, Brigitte Schulte-Fortkamp, *Soundscape and the Built Environment*. Boca Raton, CRC Press Taylor & Francis Group, 2016, 17-41. ISBN: 978-1-4822-2632-4.
10. Mikael Ögren, Peter Molnár, Lars Barregard, *Road traffic noise abatement scenarios in Gothenburg 2015 – 2035*, *Environmental Research*, 2018, 164, 516-521. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2018.03.011>
11. Natalie Riedel, Heike Köckler, Joachim Scheiner, Irene van Kamp, Raimund Erbel, Adrian Loerbroks, Thomas Claßen and Gabriele Bolte, *Home as a Place of Noise Control for the Elderly? A Cross-Sectional Study on Potential Mediating Effects and Associations between Road Traffic Noise Exposure, Access to a Quiet Side, Dwelling-Related Green and Noise Annoyance*, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2018, 15, 1036, doi:10.3390/ijerph15051036.
12. ARPA Lombardia, glossario indicatori acustici, 30/6/2021, <https://www.arpalombardia.it/Pages/Infrastrutture-di-trasporto/Glossario-Rumore.aspx>

13. QSIDE, 4/6/2021, http://www.qside.se/ex4_am_policy.html
14. Gaetano Licitra, Martin van den Berg, Paul de Vos, *Good practice guide on quiet areas*, European Environment Agency, 2014, EEA Technical report No 4/2014, doi:10.2800/12611, ISBN 978-92-9213-424-2
15. studio nine dots, 4/6/2021, <https://studioninedots.nl/project/het-kasteel/>
16. dp6 studio, <https://www.dp6.nl/en/projecten/voorzieningencluster-laan-van-spartaan>
17. Kawneer, 5/6/2021, (Leeuw van Vlaanderen) https://www.kawneer.com/bcs/architectuursystemen/en/products/project_detail.asp?project=Leeuw_van_Vlaanderen&bus=bcs/architectuursystemen&pc=renovation
18. Pieters Bouwtechniek, 5/6/2021, <https://www.pietersbouwtechniek.nl/en/projects/project?projectid=/projecten/leeuw-van-vlaanderen>
19. WHO European Centre for Environment and Health, WHO Regional Office for Europe, *Burden of disease from environmental noise Quantification of healthy life years lost in Europe*, 2011, ISBN: 978 92 890 0229 5
20. Alan Lex Brown, Irene van Kamp, *WHO Environmental Noise Guidelines for the European Region: A Systematic Review of Transport Noise Interventions and Their Impacts on Health*, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2017, 14, 873. doi:10.3390/ijerph14080873
21. Cristina Calleri, Louena Shtrepi, Alessandro Armando, Arianna Astolfi, *On the influence of different facade materials on the auditory perception of a urban space*. *Proceedings of Internoise conference*, Hong Kong, 27-30 August 2017. <https://doi.org/10.1177%2F1351010X18757353>
22. Trevor J. Cox, Peter D'Antonio, *Acoustic Absorbers and Diffusers Theory, Design and Application*, Third Edition, CRC Press Taylor & Francis Group, Boca Raton, 2017, ISBN 9781498740999
23. Jens Holger Rindel, *Scattering in Room Acoustics and the Related Activities in ISO and AES*, in *proceedings of 17th ICA*, Rome, 2-7 September, 2001; ISBN: 8888387110
24. A. Farina, L. Tronchin, *Comparison between measurements of the scattering and diffusion coefficients*, in *proceedings of 17th ICA*, Rome, 2-7 September, 2001; ISBN: 8888387110
25. Marshall Long, *Architectural Acoustics*, Academic Press, Oxford, 2014, ISBN: 978-0-12-398258-2
26. Michael Vorländer, *Auralization: Fundamentals of Acoustics, Modelling, Simulation, Algorithms and Acoustic Virtual Reality*, Second Edition, ASA Press, Springer Nature, Cham, Switzerland, 2020, ISBN 978-3-030-51202-6

27. Jochen Krimm, *Acoustically effective façades design*, Architecture and the Built environment, Rotterdam, 2018, ISBN 978-94-6366-052-5
28. Louena Shtrepi, Arianna Astolfi, Elena Badino, Giovanni Volpatti, Davide Zampini, *More Than Just Concrete: Acoustically Efficient Porous Concrete with Different Aggregate Shape and Gradation*, Applied Sciences, 2021, 11, 4835, <https://doi.org/10.3390/app11114835>
29. Coop Himmelblau, *Pavilion 21 MINI Opera Space*, 30/6/2021, <http://www.coop-himmelblau.at/architecture/projects/pavilion-21-mini-opera-space>
30. J. Luis Bento Coelho, *Approaches to Urban Soundscape Management, Planning, and Design*. Jian Kang, Brigitte Schulte-Fortkamp, *Soundscape and the Built Environment*. Boca Raton, CRC PressTaylor & Francis Group, 2016, 17-41. ISBN: 978-1-4822-2632-4.
31. Gemma Maria Echevarria Sanchez, Timothy Van Renterghem, Dick Botteldooren. *The effect of street canyon design on traffic noise exposure along roads*. *Building and Environment*, 15 February 2016, 97, 96-110. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.11.033>
32. Manon Raimbault, Danièle Dubois, *Urban soundscapes: Experiences and knowledge*, *Cities*, 2005, 22-5, 339–350. doi:10.1016/j.cities.2005.05.003
33. J. Picaut, L. Simon, *A scale model experiment for the study of sound propagation in urban areas*. *Applied Acoustics*, 2001, 62, 327-340. S0003-682X(00)00028-1
34. K. K. Lu, K. M. Li, *The propagation of sound in narrow street canyons*, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2002, 112, 537. doi: 10.1121/1.1492821
35. Maarten Hornikx, Jens Forssén, *A scale model study of parallel urban canyons*. *Acustica Acta-Acustica*, 2008, 94(2), 265-281. <http://dx.doi.org/10.3813/AAA.918030>
36. Jian Kang, *Sound propagation in street canyons: Comparison between diffusely and geometrically reflecting boundaries*. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2000, 107, 1394. doi:10.1121/1.428580
37. Hiroshi Onaga, Jens Holger Rindel, *Acoustic characteristics of urban streets in relation to scattering caused by building facades*, *Applied Acoustics*, 2007, 68, 310–325. doi:10.1016/j.apacoust.2006.01.010
38. Arnaud Can, Nicolas Fortin, Judicaël Picaut. *Accounting for the effect of diffuse reflections and fittings within street canyons, on the sound propagation predicted by ray tracing codes*. *Applied Acoustics*, 2015, 96, 83–93. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apacoust.2015.03.013>

39. Maarten Hornikx, Jens Forssén, *Noise abatement schemes for shielded canyons*, *Applied Acoustics*, 2009, 70, 267–283. doi:10.1016/j.apacoust.2008.04.002
40. Maarten Hornikx, Jens Forssén, *Modelling of sound propagation to three-dimensional urban courtyards using the extended fourier PSTD method*, *Applied Acoustics*, 2011, 72, 665–676. doi:10.1016/j.apacoust.2011.03.005
41. Tommaso Crippa, Edoardo Dagnini, Gareth Davies and Harry Rees. *Façade Engineering and Soundscape*. In proceedings of the 14th Advanced Building Skins, 28-29 october 2019, Bern Switzerland. https://www.burohappold.com/wp-content/uploads/2019/11/ABS_Facade-Engineering-and-SoundScape.pdf
42. Cristina Calleri, Louena Shtrepi, Alessandro Armando, Arianna Astolfi, *Evaluation of the influence of building façade design on the acoustic characteristics and auditory perception of urban spaces*, *Building Acoustics* 2018, Vol. 25(1) 77–95. DOI: 10.1177/1351010X18757353
43. Armin Taghipour, Tessa Sievers, Kurt Eggenschwiler, *Acoustic Comfort in Virtual Inner Yards with Various Building Facades*, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2019, 16, 249; doi:10.3390/ijerph16020249
44. Elena Badino, Roberto Manca, Louena Shtrepi, Cristina Calleri, Arianna Astolfi. *Effect of façade shape and acoustic cladding on reduction of leisure noise levels in a street canyon*. *Building and Environment*, 2019, 157, 242–256. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.04.039>
45. S. K. Tang, *Noise screening effects of balconies on a building façade*. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2005, 118, 213. doi: 10.1121/1.1931887
46. Shinichi Sakamoto, Ami Aoki, *Numerical and experimental study on noise shielding effect of eaves/louvers attached on building façade*, *Building and Environment*, 2015, 94, 773-784; <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.05.015>
47. Xu Wang, Dongxing Mao, Wuzhou Yu, Zaixiu Jiang, *Acoustic performance of balconies having inhomogeneous ceiling surfaces on a roadside building facade*, *Building and Environment*, 2015, 93, 1-8; <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.06.027>
48. Timothy Van Renterghem, Dick Botteldooren, *The importance of roof shape for road traffic noise shielding in the urban environment*, *Journal of Sound and Vibration*, 2010 329, 1422–1434; doi:10.1016/j.jsv.2009.11.011

49. Timothy Van Renterghem, Dick Botteldooren, Reducing the acoustical façade load from road traffic with green roofs. *Building and Environment*, 2009, 44, 1081–1087. doi:10.1016/j.buildenv.2008.07.013
50. Timothy Van Renterghem, Maarten Hornikx, Jens Forssen, Dick Botteldooren, The potential of building envelope greening to achieve quietness. *Building and Environment*, 2013, 61, 34-44. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.12.001>
51. Bernhard Scharf, Irene Zluwa, Case study investigation of the building physical properties of seven different green roof systems, *Energy and Buildings*, 2017, 151, 564–573. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.06.050>
52. Ahmet B. Besir, Erdem Cuce, Green roofs and facades: A comprehensive review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 82, 915–939. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.106>
53. Z. Azkorra, G. Pérez, J. Coma, L.F. Cabeza, S. Bures, J.E. Álvaro, A. Erkoreka, M. Urrestarazu, Evaluation of green walls as a passive acoustic insulation system for buildings, *Applied Acoustics*, 2015, 89, 46–56. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apacoust.2014.09.010>
54. Hong-Seok Yang, Jian Kang, Chris Cheal, Random-Incidence Absorption and Scattering Coefficients of Vegetation, *Acta Acustica United with acustica*, 2013, 99, 379–388. DOI 10.3813/AAA.918619
55. Chang Liu, Maarten Hornikx, Effect of water content on noise attenuation over vegetated roofs: Results from two field studies, *Building and Environment*, 2018, 146, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.09.022>
56. Kirill V. Horoshenkov, Amir Khan, and Hadj Benkreira, Acoustic properties of low growing plants, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2013, 133(5), 2554; doi: 10.1121/1.4798671
57. Hong Seok Yang a, Jian Kang, Min Sung Choi, Acoustic effects of green roof systems on a low-profiled structure at street level, *Building and Environment*, 2012, 50, 44-55. doi:10.1016/j.buildenv.2011.10.004
58. Timothy Van Renterghem, Dick Botteldooren, Maarten Hornikx, Philippe Jean, Jerome Defrance, Yuliya Smyrnova, Jian Kang, Road traffic noise reduction by vegetated low noise barriers in urban streets. *Proceedings - 9th European Conference on Noise Control, EURONOISE 2012, Prague, 10-13 June 2012*. 2226-5147 (ISSN)
59. Maarten Hornikx, Jens Forssén, Numerical study to the effects of façade properties on sound propagation to a three dimensional urban courtyard. *Proceedings of the Institute of Acoustics & Belgium Acoustical Society*

- Noise in the Built Environment, Ghent, 29-30 April 2010, Vol 32(3), 375-382. 1478-6095 (ISSN)
60. Yuliya Smyrnova, Jian Kang, Maarten Hornikx, Jens Forssén, Effect of vegetation on noise propagation in streets and squares. *Proceedings of the Institute of Acoustics Meeting (IOA), London, United Kingdom, 21 March 2012*. 1-10
61. Hyung Suk Jang, Ho Jun Kim, Jin Yong Jeon, Scale-model method for measuring noise reduction in residential buildings by vegetation, *Building and Environment*, 2015, 86, 81-88; <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.12.020>
62. M. Santamouris, L. Ding, F. Fiorito, P. Oldfield, Paul Osmond, R. Paolini, D. Prasad, A. Synnefa, Passive and active cooling for the outdoor built environment – Analysis and assessment of the cooling potential of mitigation technologies using performance data from 220 large scale projects. *Solar Energy*, 2017, 154, 14–33. <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2016.12.006>
63. Dayi Lai, Wenyu Liu, Tingting Gan, Kuixing Liu, Qingyan Chen, A review of mitigating strategies to improve the thermal environment and thermal comfort in urban outdoor spaces. *Science of the Total Environment*, 2019, 661, 337–353. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.062>
64. Elmira Jamei, Priyadarsini Rajagopalan, Mohammadmehdi Seyedmahmoudian, Yashar Jamei, Review on the impact of urban geometry and pedestrian level greening on outdoor thermal comfort. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 54, 1002–1017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.104>
65. José Rodríguez-Algeciras, Abel Tablada, Andreas Matzarakis, Effect of asymmetrical street canyons on pedestrian thermal comfort in warm-humid climate of Cuba, *Theor Appl Climatol*, 2018, 133, 663–679; DOI 10.1007/s00704-017-2204-8
66. G. Mutani, V. Cristino, M. Bullita, The urban heat island of the Metropolitan City of Turin. *Strategies for a sustainable urban planning. Proceedings of XXIII Convegno A.I.P.T. (Associazione Italiana Proprietà Termofisiche), Torino, 21-22 Settembre 2017*. Doi:11583/2710497
67. Noémi Kántor, Csilla Viktória Gál, Ágnes Gulyás, János Unger, The Impact of Façade Orientation and Woody Vegetation on Summertime Heat Stress Patterns in a Central European Square: Comparison of Radiation Measurements and Simulations. *Advances in Meteorology*, 2018. <https://doi.org/10.1155/2018/2650642>

68. Mohammed A. Bakarman, Jae D. Chang, The influence of height/width ratio on urban heat island in hot-arid climates. Proceedings of International Conference on Sustainable Design, Engineering and Construction, Chicago, 10-13 may 2015, Procedia Engineering, 2015, 118, 101 – 108. doi:10.1016/j.proeng.2015.08.408
69. Fazia Ali-Toudert, Helmut Mayer, Effects of asymmetry, galleries, overhanging facades and vegetation on thermal comfort in urban street canyons. Solar Energy, 2007, 81, 742–754. doi:10.1016/j.solener.2006.10.007
70. Mohammad Taleghani, Laura Kleerekoper, Martin Tenpierik, Andy van den Dobbelen, Outdoor thermal comfort within five different urban forms in the Netherlands. Building and Environment, 2015, 83, 65-78. http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.03.014
71. Guglielmina Mutani, Urban planning for the liveability and thermal comfort of outdoor spaces. Proceedings of 11th Conference on Sustainable of Energy, Water and Environmental Systems, Lisbon, 4-9 September 2016, ISSN 1847-7178.
72. Nassima Mouada, Nouredine Zemmouri, Rim Meziani, Urban morphology, outdoor thermal comfort and walkability in hot, dry cities: Case study in Sidi Okba, Algeria. International review for spatial planning and sustainable development A: Planning Strategies and Design Concepts, 2019, 7(1), 117-133. DOI: http://dx.doi.org/10.14246/irspsda.7.1_117
73. Paul Coseo, Larissa Larsen, Cooling the Heat Island in Compact Urban Environments: The effectiveness of Chicago's Green Alley Program. Proceedings of International Conference on Sustainable Design, Engineering and Construction, Chicago, 10-13 may 2015, Procedia Engineering, 2015, 118, 691–710. doi: 10.1016/j.proeng.2015.08.504
74. Guillermo Rey Gozalo, Juan Miguel Barrigón Morillas, David Montes González, Pedro Atanasio Moraga, Relationships among satisfaction, noise perception, and use of urban green spaces. Science of the Total Environment, 2018, 624, 438–450. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.12.148
75. Alessandro Mazzotta, Guglielmina Mutani, Environmental high performance urban open spaces paving: experimentations in Urban Barriera (Turin, Italy). Proceedings of 6th International Building Physics Conference, IBPC 2015, Energy Procedia, 2015, 78, 669 – 674. doi:10.1016/j.egypro.2015.11.059
76. Federica Rosso, Iacopo Golasi, Veronica Lucia Castaldo, Cristina Piselli, Anna Laura Pisello, Ferdinando Salata, Marco Ferrero, Franco Cotana, Andrea de Lieto Vollaro, On the impact of innovative materials on outdoor

- thermal comfort of pedestrians in historical urban canyons. Renewable Energy, 2018, 118, 825-839. https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.11.074
77. Guglielmina Mutani, Valeria Todeschi, The Effects of Green Roofs on Outdoor Thermal Comfort, Urban Heat Island Mitigation and Energy Savings. Atmosphere 2020, 11, 123. doi:10.3390/atmos11020123
78. Angeliki Chatzidimitriou, Simos Yannasba, Microclimate development in open urban spaces: The influence of form and materials, Energy and Buildings, 2015, 108, 156–174. http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.08.048
79. Lauri Savioja, U. Peter Svensson, Overview of geometrical room acoustic modeling techniques, The Journal of the Acoustical Society of America, 2015, 138, 708; doi: 10.1121/1.4926438
80. Maarten Hornikx, Ten questions concerning computational urban acoustics, Building and Environment, 2016, 106, 409-421; http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.06.028
81. Fabian Brinkmann, Lukas Aspöck, David Ackermann, Steffen Lepa, Michael Vorländer, Stefan Weinzierl, A round robin on room acoustical simulation and auralization, The Journal of the Acoustical Society of America, 2019, 145, 2746; doi: 10.1121/1.5096178
82. Jens Holger Rindel, Gry Bælum Nielsen, Claus Lynge Christensen, Diffraction around corners and over wide barriers in room acoustic simulations. Proceedings of International Congress on Sound and Vibration, Krakow, 6-9 July 2009, ISBN: 9781615677368 1615677364
83. Marshall Long, Architectural acoustics 2nd edition, Academic Press, Oxford, 2014, ISBN: 978-0-12-398258-2
84. Timothy Van Renterghem, Weigang Wei, Jens Forssén, Maarten Hornikx, Mikael Ögren, Dick Botteldooren, Erik Salomons, Improving the accuracy of engineering models at shielded building facades: experimental analysis of turbulence scattering. Proceedings of Inter Noise Conference, Innsbruck, 15-18 September 2013, ISBN: 978-163266267-5
85. ODEON Room Acoustics Software User's Manual Version 15, Published in March 2020, Odeon A/S, Lyngby, Denmark, www.odeon.dk
86. Thomas, Matthew Reuben (2017) Wayverb: A Graphical Tool for Hybrid Room Acoustics Simulation. Masters thesis, University of Huddersfield. http://eprints.hud.ac.uk/id/eprint/33919/
87. Jens Forssén, Patrik Höstmad, Beata Stahre Wästberg, Monica Billger, Mikael Ögren, Fabio Latino, Vasilis Naserentin, Orfeas Eleftheriou, An urban planning tool demonstrator with auralisation and visualisation of the sound

- environment. Proceedings of e-Forum Acusticum, 7-11 December 2020, p. 869-871, DOI: 10.48465/fa.2020.0374
88. Maarten Hornikx, Thomas Krijnen, Louis van Harten, openPSTD: The open source pseudospectral time-domain method for acoustic propagation, *Computer Physics Communications*, 2016, 203, 298–308. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cpc.2016.02.029>
 89. Arthur van der Harten, Pachyderm Acoustical Simulation: Towards Open-Source Sound Analysis, *Architectural Design*, 2013, 83(2), 138-139. DOI:10.1002/ad.1570
 90. Panos Economou, Costas Economou, Reverberation Time (RT) Calculation Based on Room Modal Decay and Using Wave Based Geometrical Acoustics (WBGA) and Modal Parameter Estimation. Proceedings of EuroNoise2018, Crete, 27-31 May 2018, p.2099-2106. ISSN: 2226-5147
 91. Xing Shi, Wenjie Yang, Performance-driven architectural design and optimization technique from a perspective of architects, *Automation in Construction*, 2013, 32, 125–135. <http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2013.01.015>
 92. Erwan Bocher, Gwenaél Guillaume, Judicaël Picaut, Gwendall Petit, Nicolas Fortin. NoiseModelling: An Open Source GIS Based Tool to Produce Environmental Noise Maps. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, MDPI, 2019, 8 (3), pp.130. DOI: 10.3390/ijgi8030130.
 93. SoundPLAN, consultato il 09/06/2021, <https://www.soundplan.eu/en/>
 94. CATT Acoustics, consultato il 09/06/2021, <https://www.catt.se/>
 95. EASE® - Enhanced Acoustic Simulator for Engineers, consultato il 09/06/2021, <https://ease.afmg.eu/>
 96. Parallel FDTD, consultato il 09/06/2021, <https://github.com/juuli/ParallelFDTD>
 97. Picaut, Judicaël, and Nicolas Fortin, I-Simpa, a Graphical User Interface Devoted to Host 3D Sound Propagation Numerical Codes. Proceedings of the Acoustics Nantes Conference, 23-27 april 2012, Nantes, hal-00810893, <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00810893>
 98. Mithrasound, consultato il 09/06/2021, <https://www.geomod.fr/en/geomatics-3d-modelisation/mithrasound/>
 99. Lim-A, consultato il 09/06/2021, <https://softnoise.com/products/predictor-lima/>
 100. Cadna-A, consultato il 09/06/2021 <https://www.datakustik.com/products/cadnar/cadnar/>

101. HaniyehSanaieian, Martin Tenpierik, Keesvanden Linden, Fatemeh Mehdizadeh Seraj, Seyed Majid Mofidi Shemrani, Review of the impact of urban block form on thermal performance, solar access and ventilation, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, 38, 551–560. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.06.007>
102. Guglielmina Mutani, Alessandro Gamba, Salvatore Maio. Space heating energy consumption and urban form. The case study of residential buildings in Turin (Italy). In proceedings of 11th Conference on Sustainable of Energy, Water and Environmental Systems, Lisbon, September 2016, ISSN 1847-7178.
103. Sven Vanderhaegen, Frank Canters, Mapping urban form and function at city block level using spatial metrics, *Landscape and Urban Planning*, 2017, 167, 399–409. <http://dx.doi.org/10.1016/j.landurbplan.2017.05.023>
104. Jonathan Natanian, Or Aleksandrowicz, Thomas Auer, A parametric approach to optimizing urban form, energy balance and environmental quality: The case of Mediterranean districts, *Applied Energy*, 2019, 254, 113637
105. Comune di Torino, mappatura acustica di Torino, 03/11/2020, <http://www.comune.torino.it/ambiente/rumore/mappatura-acustica/index.shtml>
106. ARPAPiemonte, mappatura acustica di Torino, 03/11/2020, https://webgis.arpa.piemonte.it/ags101/services/rumore_vibrazioni/Mappatura_acustica_strade_di_torino/MapServer/WMSServer?
107. Truls Gjestland, Background noise levels in Europe, SINTEF A6631 Report, 2008, Trondheim, Norway, ISBN: 978-82-14-04395-2
108. Arnaud Can, Ludovic Leclercq, Joel Lelong, Dynamic estimation of urban traffic noise: Influence of traffic and noise source representations, *Applied Acoustics*, 2008, 69, 858–867. doi:10.1016/j.apacoust.2007.05.014
109. Meliha Mesihovic, Jens Hoger Rindel, Ingunn Milford, The need for updated traffic noise spectra, used for calculation of sound insulation of windows and facades. In proceedings of 45th Inter Noise conference, 21-24 August 2016, Hamburg, Germany. ISBN 9783939296119 3939296112
110. Giuseppina Emma Puglisi, Acoustics of theoretical urban open spaces through the insertion of vegetation as noise abatement mean : parametric studies and practical guidelines. 2012
111. Vorländer, M., & Mommertz, E. (2000). Definition and measurement of random-incidence scattering coefficients. *Applied Acoustics*, 60(2), 187–199. [https://doi.org/10.1016/S0003-682X\(99\)00056-0](https://doi.org/10.1016/S0003-682X(99)00056-0)