



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI FEDERICO II
FACOLTÀ DI ARCHITETTURA
Dottorato di Ricerca in Tecnologia dell'Architettura
_____ XXIII Ciclo _____
Dipartimento di Progettazione Urbana e di Urbanistica
Dipartimento di Configurazione ed Attuazione dell'Architettura

METODI PER LA VERIFICA DELLA BIOCOMPATIBILITÀ NEL PROGETTO DI ARCHITETTURA

Un approccio integrale al comfort

Dottorando: Arch. Luca Buoninconti
Tutor: Prof. Dora Francese
Co-tutor: Prof. Laura Bellia

Sommario

Premessa	5
1 Biocompatibilità e Architettura. I metodi per la verifica: stato dell'arte e proposte di integrazione	7
1.1 Premessa	
1.2 L'approccio al Benessere in Architettura e nella normativa tecnica	8
.1 Il Benessere secondo la disciplina della Tecnologia dell'Architettura	8
.2 Il Benessere secondo la disciplina della Fisica Tecnica	11
.3 Il comfort termo-igrometrico	12
.4 Il comfort visivo	16
.5 Il comfort uditivo	17
.6 Il disagio psicofisico e sociale	18
1.3 L'analisi del benessere	21
.1 I metodi numerici	21
.1 Termo-fluidodinamica computazionale (CFD), 23	
.2 Motori ibridi Radiosity/Raytrace, 25	
.3 Modelli agli elementi di contorno (BEM) e ai vettori di trasferimento acustico (ATV), 28	
.2 I metodi di analisi a multi criteri	29
.1 GB Tool e Protocollo Itaca, 30	
.2 HQE, 31	
.3 Metodo VAdE, 33	
1.4 Ipotesi di un approccio integrale	36
2 Sviluppo di un nuovo metodo di valutazione	39
2.1 Definizione dei dati	39
2.2 Il prelievo e l'elaborazione dei dati	42
.1 Clima meteorologico, microclima termo-igrometrico e luminoso	42
.2 Clima e microclima acustico	55
.3 I dati relativi all'utenza	61
.4 I dati spaziali, morfologici e funzionali	64
.5 I dati tecnici e tecnologici	69
2.3 I fattori per la valutazione del comfort	74
.1 L'impegno metabolico e lo stress igrotermico	76
.2 L'impegno visivo	79
.3 L'impegno uditivo	82
.4 Gli indicatori psicologici e il livello atteso di benessere	84
.5 La valutazione dinamica del benessere	86

3. Sviluppo di un metodo integrale	89
3.1 Collaudare il metodo proposto mediante casi-studio	89
.1 Criteri di scelta e strumenti di valutazione	89
.2 Selezione dei casi studio	90
.1 La verifica a scala urbana in base ai dati meteorologici, 90	
.2 La verifica a scala di edificio del caso-studio selezionato, 93	
3.2 Valutare il caso-studio con il metodo proposto	95
.1 Implementazione dei dati	95
.2 Valutazione del comfort	99
3.3 Conclusioni	102
.1 Approfondimenti possibili per il modello	102
.2 Applicabilità della ricerca	103
Appendice	
4 Procedure utilizzate nel metodo	107
4.1 Prelievo ed elaborazione dei dati	107
.1 Scala globale, territoriale ed urbana	107
.1 Geo-morfologia ed antropizzazione del territorio, 107	
.2 Dati meteorologici, 112	
.3 Dati acustici, 119	
.4 Dati demografici, sanitari e socio-economici, 127	
.2 Scala edilizia e di unità ambientale	128
.1 Variabili termo-igrometriche, 128	
.2 Variabili visive, 144	
.3 Variabili uditive, 147	
.3 Dati relativi all'utente	148
.1 Caratteristiche fisiche medie, 148	
.2 Caratteristiche metaboliche e resistenza termica dell'abbigliamento, 148	
4.2 Valutazione del comfort	150
.1 Discomfort termo-igrometrico	150
.2 Discomfort visivo	159
.3 Discomfort uditivo	160
.4 Valutazione integrale del comfort	162
Termini e definizioni	165
Leggi e norme	171
Bibliografia	175
Simboli e abbreviazioni	179
Immagini	183
Ringraziamenti	185

Premessa

La ricerca è mirata a sviluppare un metodo per eseguire la valutazione olistica del comfort, che sia atto a prendere in considerazione i numerosi agenti - stressori, fisici e psicologici - che agiscono sulle persone. Il metodo è basato su due principi innovativi: il primo scaturisce dall'osservazione che, com'è noto, il comfort è uno stato mentale, ed è quindi frutto di un complesso equilibrio che si evolve nel tempo e nello spazio a causa delle varie sensazioni, sia di carattere fisico che psicologico. In questo lavoro vengono perciò analizzati i tre tipi di comfort a mediatore energetico (visivo, uditivo e igrotermico), che vengono poi interfacciati con le caratteristiche demografiche e psicologiche dell'utenza, allo scopo di ottenere una stima del benessere che consideri il maggior numero di fattori.

Il secondo principio parte dalla considerazione che spesso i metodi e i programmi per la valutazione del comfort necessitano di grandi quantità di parametri in ingresso, il cui prelievo è complicato, tanto per la capacità tecnica e di settore che il valutatore deve possedere, quanto per l'inaccessibilità del dato stesso, e che tale prelievo dilata notevolmente i tempi di implementazione, rendendo a volte inefficace l'intero protocollo; ciò appare soprattutto controproducente quando il metodo viene usato durante la fase di progettazione preliminare, in cui non sono a disposizione tempi e risorse economiche sufficienti ad intraprendere analisi specialistiche. Eseguendo una stima olistica, è invece possibile ridurre il numero delle variabili, in quanto si può sfruttare la spiccata ridondanza dei parametri. Un approccio integrale consente così di sviluppare metodi e strumenti in grado di ridurre quantità e qualità dei dati richiesti, semplificando ed abbreviando notevolmente le procedure di valutazione.

*Viene dunque in questa tesi sviluppato il **metodo di verifica della biocompatibilità** quale agile sussidio al lavoro dell'Architetto: le condizioni ambientali al contorno che influenzano gli utenti nella percezione del comfort sono infatti strettamente dipendenti dagli elementi tecnici che definiscono lo spazio costruito, e quindi dai materiali che li compongono, dai loro sistemi di assemblaggio, dalla loro forma e posizione relativa. La scelta tra le diverse soluzioni progettuali deve quindi essere supportata da strumenti in grado di eseguire valutazioni complesse, che consentano da un lato di ottenere stime relative ai livelli prestazionali afferenti alla biocompatibilità, ma che dall'altro sappiano orientare la progettazione verso scelte eco-sostenibili, non solo attraverso l'impiego di sistemi passivi, ma anche e soprattutto grazie all'uso di strategie generali di pianificazione (forma, orientamento, distribuzione delle funzioni).*

1 *Biocompatibilità e Architettura. I metodi per la verifica: stato dell'arte e proposte di integrazione*

1.1 Premessa

L'essere uno spazio artificiale fortemente specializzato in grado di soddisfare una o più necessità dell'uomo rende l'Architettura una disciplina certamente orientata alla bio-compatibilità, intesa come la capacità di armonizzarsi con le esigenze umane, senza procurare rigetto o rifiuto. Non a caso il termine nasce con la tecno-scienza medica delle protesi, e sotto numerosi aspetti anche l'Architettura può essere considerata una sorta di "arto artificiale" in grado di fornire al proprio utilizzatore prestazioni che lo spazio naturale non sempre è in grado di assicurare¹.

Si potrebbe quindi affermare - non senza una certa volontà di provocazione - che l'Architettura deve essere bio-compatibile per definizione; qualora non lo fosse, scadrebbe al rango di semplice oggetto artificiale, costruito *dall'uomo* ma non *per l'uomo*, un prodotto privato della sua funzione principale.

È allora lecito chiedersi perché parlare di Bio-architettura, e che cosa dovrebbe avere di differente rispetto all'Architettura. Le ragioni naturalmente sono diverse, ma in linea di massima è ragionevole affermare che, sin dalle prime edificazioni, lo spazio costruito ha acquistato nel tempo diverse e più complesse funzioni: da semplice rifugio, luogo dove trovare riparo, l'uomo ha perseguito un ideale di spazio in grado di essere funzionale alle attività da svolgere, piacevole, accogliente e confortevole; per tale motivo ha sviluppato elementi e sistemi in grado di ricreare le condizioni necessarie al soddisfacimento di questi bisogni. I progressi nel campo della tecnica e la crescente disponibilità di energia hanno dilatato la possibilità di realizzare

¹ Si veda, ad esempio, il concetto di uomo-protesi ripreso recentemente da Umberto Galimberti, dove l'essere umano è oggi dipendente completamente dalla tecnologia, della quale non può più fare a meno. *Cfr.* U. Galimberti, *Psiche e techne. L'uomo nell'età della tecnica*, Feltrinelli, Milano 2000.

impianti in grado di ridurre o di eliminare le sensazioni di disagio all'interno degli ambienti: ambienti: è noto che sistemi di illuminazione, di climatizzazione e fono-isolanti sempre più avanzati oggi, anche in presenza di condizioni al contorno sfavorevoli, hanno condotto alla realizzazione di spazi all'interno dei quali gli utilizzatori possono ritrovare quelle condizioni adatte a svolgere correttamente le loro attività. Questo tipo di approccio al problema dei bisogni produce però due ordini di problemi. Il primo consiste nel constatare che anche gli impianti più sofisticati non sono in grado di rendere lo spazio qualitativamente confortevole come quando queste condizioni sono raggiunte attraverso processi naturali. La qualità della luce del sole, il tepore di un ambiente ben irraggiato sono senza dubbio molto più piacevoli di quanto oggi la tecnica possa offrire nel campo dell'illuminotecnica e della climatizzazione. Il secondo riguarda il consumo di risorse, energetiche e materiche: gli impianti, anche se con il progresso della tecnologia migliorano il proprio rendimento, entrano sempre in conflitto con la Sostenibilità Ambientale. Essi non solo impiegano, nel loro intero ciclo di vita, grandi quantità di energia e materie prime, ma molto spesso hanno il non trascurabile effetto di immettere negli ecosistemi elevati quantitativi di rifiuti, sia solidi che fluidi, aumentando il livello di inquinamento.

Secondo questo scenario, la necessità di rendere confortevole un ambiente attraverso questi sistemi ha come rovescio della medaglia quello di impoverire il pianeta di risorse e di inquinarlo. Oltre a mirare a raggiungere numerosi e complessi obiettivi, la Bio-architettura propone una strategia differente in questo campo: perseguire il soddisfacimento dei bisogni degli utenti degli spazi costruiti attraverso metodi in grado di utilizzare ed esaltare le caratteristiche naturali del sito, con l'impiego di sistemi passivi, intersecati con soluzioni morfologiche e funzionali capaci di aumentarne l'efficacia. La Bio-architettura si presenta così come quella chiave interpretativa in grado di appagare i bisogni non solo degli utilizzatori del singolo prodotto edilizio, ma anche di quelli esterni ad esso. A tale scopo occorre conoscere e valutare tutti i fenomeni legati al soddisfacimento di un'importante esigenza che il costruito deve essere in grado di soddisfare: il *benessere*.

1.2 L'approccio al Benessere in Architettura e nella normativa tecnica

1.2.1 Il Benessere secondo la disciplina della Tecnologia dell'Architettura

Esiste una profonda differenza tra il concetto di benessere nel linguaggio comune e quello utilizzato in Architettura e nella normativa tecnica ad esso collegata. Nel primo, questo viene inteso secondo due comuni accezioni: o come *relax*, legato quindi a particolari condizioni di riposo, o come stato di perfetta forma fisica. Di contro, secondo l'approccio prestazionale, esso è invece una *classe di esigenza* definita come «Insieme delle condizioni relative a stati del sistema edilizio adeguati alla vita, alla salute ed allo svolgimento delle attività degli utenti»². Ne consegue un'importante considerazione: il benessere è quel livello di qualità degli ambienti costruiti in grado di garantire i presupposti necessari a tutelare lo stato di salute e consentire il corretto espletamento delle funzioni al loro interno. Si configura così una catena consequenziale per la quale nell'ambiente sono presenti diversi *agenti* che, attraverso *azioni*, hanno l'*effetto* di modificare le caratteri-

² Cfr. UNI 8289:1981, *Edilizia. Esigenze dell'utenza finale. Classificazione*.

stiche dello spazio³; se queste modifiche sono dannose per l'utente finale, gli oggetti edilizi devono rispondere con *prestazioni* in grado di limitare o annullare i cambiamenti, garantendo quei *requisiti* individuati per il soddisfacimento delle differenti *esigenze*⁴.

La norma non fornisce una elencazione esplicita delle esigenze con le quali articolare la classe benessere; nel corso degli anni si sono comunque sviluppati segmenti, soprattutto nella fisica tecnica, che hanno definito e regolamentato alcune di queste, quali il *benessere termo-igrometrico*, quello *acustico* e quello *luminoso*, a cui si aggiunge il più recente interesse per la *qualità dell'aria*; nel campo dell'edilizia ospedaliera e farmaceutica si sono studiate e sviluppate le caratteristiche di *asetticità* degli ambienti; in quello della medicina invece si è sviluppato l'interesse per l'*elettrosmog*.

Allo scopo di organizzare sia le conoscenze che le azioni da compiere per ottenere un sistema edilizio in grado di soddisfare le necessità dell'utenza, occorre individuare criteri univoci di identificazione e classificazione, che la norma già indica implicitamente.

Per prima cosa, il benessere viene distinto, nella sua definizione, tra condizioni che modificano lo stato di salute e quelle che ostacolano o favoriscono lo svolgimento delle attività. Per tale motivo, un prima grande divisione può essere operata proponendo una separazione tra *salute* e *comfort*, dove la prima può indicarsi come l'insieme delle condizioni atte a garantire l'assenza di malattie o danni, anche temporanei, all'organismo di tipo fisico, psicologico e sociale, mentre la seconda è definita come l'insieme delle condizioni per le quali l'utente è portato ad avere un atteggiamento mentale di soddisfazione nei confronti dell'ambiente in cui si trova.

Dal punto di vista dell'analisi del fenomeno da parte della norma, la concatenazione agente-azione-effetto, che modifica l'ambiente e incide sull'utente alterando il grado di qualità iniziale di benessere, consente di orientare meglio le strategie necessarie per garantire il soddisfacimento dell'esigenza in quanto mette in luce la possibilità di intervenire sulle cause (rimuovendole, o amplificandole), sui fenomeni che mediano l'azione (ostacolandoli o favorendoli), sui fruitori degli ambienti (proteggendoli o esponendoli al fenomeno), a seconda dell'effetto - negativo o positivo - che possono avere.

La distinzione esistente nella UNI in *categorie di agenti*⁵ consente di differenziare la natura delle entità, articolandole in naturali, artificiali, di progetto, di uso.

Le *azioni*⁶ sono per definizione normativa già suddivise in fisiche e chimiche, ma può essere utile proporre un ulteriore raggruppamento nelle due *classi*: dei *mediatori energetici* e di quelli *materici* allo scopo di comprendere più facilmente le interrelazioni tra azioni differenti per effetto di concause comuni. Si avranno così mediatori di energia *meccanica*, *termica*, *elettromagnetica*; e di contro mediatori di materia *chimico-fisica* e *biologica*. Differenziare il tipo di azione consente di intervenire sul sistema di propagazione dei fenomeni, ostacolandoli o favorendoli a seconda dell'effetto sull'utente finale.

³ Per le definizioni di agente, azione ed effetto cfr. UNI 8290-3:1987, *Edilizia residenziale. Sistema tecnologico. Analisi degli agenti*.

⁴ Cfr. UNI 10838:1999, *Edilizia. Terminologia riferita all'utenza, alle prestazioni, al processo edilizio e alla qualità edilizia*.

⁵ Cfr. UNI 8290-3, *op. cit.*

⁶ *Ivi.*

Gli *effetti* sono articolati nella norma in base ai *fattori* di riferimento⁷; si distinguono quindi in acustici, atmosferici, biologici, chimici, elettrici ed elettromagnetici, idrici, ignei, luminosi, meccanici, termici. Questo consente di «conoscere ed interpretare [...] e strumentarne il controllo»⁸. Alcuni autori⁹ preferiscono un approccio di tipo antropocentrico, che individua e classifica le esigenze in base ai sistemi di scambio tra il corpo umano e l'ambiente. Oltre ai quattro sensi (non si considera il gusto, che non viene sollecitato dalle condizioni ambientali degli oggetti di architettura), occorre aggiungere anche il sistema di termoregolazione e quello immunitario. Questa suddivisione consente di individuare più facilmente i meccanismi di protezione degli utenti finali, allo scopo di difenderli dagli effetti che possono essere di disturbo alle attività o nocivi alla salute.

<i>Esigenza</i>	<i>Sub-Esigenza</i>	<i>Sensibilità o sistema</i>	<i>Effetto</i>	<i>Azione</i>	<i>Categoria di agente</i>	
Comfort	Comfort uditivo	Sensibilità uditiva	Acustico	Meccanica	Energética	Naturale
	Comfort visivo	Sensibilità visiva	Luminoso	Elettromagnetica		
	Comfort termigrometrico	Sistema di termoregolazione	Atmosferico Termico	Termica		
Salute	Comfort tattile	Sensibilità tattile	Chimico	Chimico-fisica	Materica	Di progetto
	Salubrità	Sistema immunitario	Chimico Biologico	Chimico-fisica Biologica		
	Qualità dell'aria	Sensibilità olfattiva	Chimico Biologico	Chimico-fisica Biologica		
	Elettrosmog	Sistema immunitario	Elettrico e elettromagnetico	Elettromagnetica		

Tabella 1-1 Suddivisione della classe di esigenza "Benessere"

Tutte queste considerazioni sono riportate sinotticamente nella Tabella 1-1: *Categoria di agente*, *Azione* ed *Effetto*, anche se basate su alcuni principi normativi, sono state elaborate secondo il proposto raggruppamento delle azioni in *energetiche* e *materiche*, come conseguenza ai precedenti ragionamenti sulle classi di mediatori; *Sensibilità o sistema* è una rielaborazione dell'approccio antropocentrico. Si prospetta quindi l'idea di suddividere la classe Benessere in sette sub-esigenze, per nominare le quali viene privilegiata, ove possibile, una terminologia che richiami direttamente i sensi umani coinvolti. Le sub-esigenze così individuate sono quindi raggruppate nelle due categorie *Comfort* e *Salute* a seconda del livello di danno che possono procurare agli utenti.

Lo scopo di questo approccio è quello di costruire una struttura logica grazie alla quale è possibile leggere il complesso fenomeno che è alla base della percezione del comfort. Le condizioni che determinano l'atteggiamento mentale di soddisfazione da parte di chi fruisce di un particolare

⁷ *Ivi.*

⁸ *Ivi.*

⁹ Cfr. Hausladen G., Sager C., *Climate Design: Solution for Buildings that can do more with less Technology*, Birkhauser, Heidelberg 2006. Cfr. anche Francese D. *Architettura e vivibilità. Modelli di verifica, principi di biocompatibilità, esempi di opere per il rispetto ambientale*, FrancoAngeli, Milano 2007.

spazio sono infatti numerose, e sono determinate da diversi fattori: di carattere tecnico e tecnologico, perché dipendono dai materiali, dai sub-componenti, dai sistemi di assemblaggio e connessione; di tipo spaziale e funzionale, in quanto sono legati alla dimensione, alla forma ed all'utilizzo da parte degli utenti; di tipo ambientale, e quindi legati alle caratteristiche fisiche e alle condizioni psicologiche che vengono a determinarsi puntualmente nello spazio e nel tempo. L'Architettura non è il *contenitore* all'interno del quale si possono o meno verificare quelle prestazioni tali da garantire un determinato livello di qualità, ma è la *causa* di quelle prestazioni, ed in quanto tale deve necessariamente essere considerata l'oggetto di analisi privilegiato in questo lavoro.

1.2.2 Il Benessere secondo la disciplina della Fisica Tecnica

Tutti i modelli matematici di interpretazione delle modalità di propagazione dell'energia¹⁰ sono stati messi a punto nella seconda metà dell'ottocento¹¹. Per tale motivo, le analisi delle azioni a mediazione energetica hanno avuto, nel corso del novecento, un notevole sviluppo, che si è riflesso nella normativa e nella legislazione vigente.

Secondo tale approccio, il requisito di comfort viene soddisfatto se sussistono particolari condizioni, che possono definirsi come *micro ambientali*¹²; in altre parole, quando le caratteristiche fisiche della porzione di spazio che scambia energeticamente con l'individuo assumono particolari valori, allora gli utenti non percepiscono sgradevoli sensazioni di disagio. La fisica tecnica ha sviluppato così metodi e strumenti di calcolo per determinare queste caratteristiche fisiche.

Tali procedimenti sono spesso delle riduzioni delle complesse operazioni che occorrerebbero per poter risolvere le difficili equazioni che reggono i differenti problemi; norme e leggi provvedono quindi a definire delle procedure per il reperimento e l'elaborazione delle condizioni iniziali, e i sistemi di calcolo e gli obiettivi da raggiungere per garantire – qualora siano soddisfatti i presupposti teorici posti alla base della semplificazione – il raggiungimento dei parametri fisici ritenuti di comfort per gli utilizzatori.

Come è ovvio, le norme si suddividono per ambiti disciplinari di riferimento, dal quale spesso traggono la denominazione; preferendo qui una prospettiva antropocentrica, i diversi tipi di comfort saranno invece denominati a seconda del senso o del sistema coinvolto: comfort uditivo in luogo di acustico, visivo invece di luminoso; il comfort termo-igrometrico mantiene la stessa denominazione in entrambi i casi.

¹⁰ Si considerano qui esclusivamente le modellazioni che interpretano il comportamento macroscopico dell'energia – che viene comunemente applicato alla scala di osservazione tipica delle applicazioni di Architettura. Sono quindi trascurati gli effetti quantistici e relativistici del problema.

¹¹ In particolare, le equazioni di Maxwell sul campo elettromagnetico sono state pubblicate nel 1873; Carnot nel 1824, Kelvin nel 1848, Joule nel 1850, Clausius nel 1855 hanno definito il modello termodinamico; le equazioni di Navier-Stokes del 1822 consentono di modellare problemi di fluidodinamica; Helmholtz nel 1863 pubblicò le equazioni che consentono di descrivere qualunque fenomeno acustico.

¹² Si denota con questo termine quelle condizioni ambientali con le quali gli utenti scambiano direttamente; il termine comunemente in uso – condizioni microclimatiche – è limitato infatti ai soli fenomeni fisici coinvolti negli scambi termigrometrici. Qui si vuole estendere il concetto a tutti i fenomeni fisici legati ai differenti tipi di comfort con mediatore energetico.

Al di là delle differenti discipline, è possibile distinguere due tipi di regole, e cioè:

- norme che definiscono i *requisiti*¹³ e le conseguenti *specificazioni di prestazione*¹⁴ che consentono di esprimerne il grado di soddisfacimento¹⁵;
- norme che definiscono gli *attributi*, le *variabili* e le loro *specifiche di prestazione*¹⁶, nonché le modalità di definizione dei dati al contorno e di calcolo.

Queste differiscono tra loro a seconda dell'obiettivo che vogliono raggiungere, ed in particolare si distinguono:

- gruppi di norme che vengono utilizzate per dimensionare gli impianti;
- gruppi di norme che stabiliscono criteri scientifici per valutare il livello di benessere negli ambienti in funzione dei suoi parametri fisici.

È interessante notare come la prima tipologia pervenga a semplificazioni teoriche dei differenti problemi attraverso processi sintetici ed aggregativi, grazie ai quali le condizioni iniziali e di calcolo vengono rese notevolmente più agili; il secondo insieme invece consente di approcciare con maggior rigore teorico il problema del comfort, ed è utilizzato come riferimento dai sistemi software, che verranno discussi successivamente.

1.2.3 Il comfort termo-igrometrico

Le norme relative alla determinazione delle condizioni ambientali di comfort si basano su diversi indici di prestazione, dipendenti dal livello di semplificazione del problema.

La temperatura dell'aria¹⁷ è una delle principali variabili che influenzano il comfort igrotermico: quando vengono raggiunti particolari valori – detti appunto di benessere – è possibile assicurare, in condizioni standard¹⁸, il soddisfacimento del 60-65% degli occupanti, con il 5% di insoddisfatti ed il restante 30-35% di leggermente insoddisfatti¹⁹. Per poter ottenere risultati probabilisticamente più affidabili, o valutare condizioni più complesse, occorre utilizzare indici indiretti che impiegano un maggior numero di variabili: alcuni di questi sono adottati sia da ASHRAE che da ISO; altri sono stati sviluppati in ambito biometeorologico, e trovano maggiore applicazione nella valutazione delle condizioni ambientali negli spazi aperti.

Il metodo *PMV-PPD* sviluppato da Fanger²⁰ consente di calcolare lo stress termico di un utilizzatore a partire da quattro parametri *ambientali* (temperatura dell'aria e media radiante, velocità e umidità relativa) e due *individuali* (vestiario, metabolismo), in base ai quali è possibile valutare la sensazione termica media (*PMV*), impiegando la nota scala a sette punti, e la relativa distribuzione statistica (*PPD*). Attualmente, il metodo di Fanger

¹³ Cfr. UNI 10838, *op. cit.*

¹⁴ *Ivi.*

¹⁵ Alcune volte le norme non riportano esplicitamente le informazioni necessarie per definire le specificazioni di prestazione, ma queste possono essere indirettamente ricavate dagli ambiti disciplinari di riferimento della fisica tecnica.

¹⁶ Cfr. UNI 10838, *op. cit.*

¹⁷ Quando non diversamente specificato, per temperatura dell'aria si intende quella di bulbo asciutto.

¹⁸ È usuale considerare che gli utenti siano in condizioni standard quando sono a riposo ed indossano un abbigliamento adeguato alla temperatura dell'aria.

¹⁹ Cfr. Buratti C., *Impianti di climatizzazione e condizionamento*, Morlacchi, Perugia, pag. 12.

²⁰ Cfr. § 4.2.1.

è adottato per la stima in ambienti termicamente moderati anche dalla norma americana²¹ che lo affianca ai tradizionali indici di temperatura precedentemente impiegati; questi, considerando condizioni predefinite di attività metabolica sedentaria, di vestiario e di velocità dell'aria, sono di più semplice elaborazione ma sicuramente meno precisi. Gli indici di benessere disponibili in ambito biometeorologico utilizzano quasi nella totalità solo due parametri: temperatura ed umidità relativa; ad eccezione dell'annullarsi della velocità dell'aria (calma di vento), non sono specificate le altre condizioni (attività metabolica netta, vestiario, temperatura radiante) considerate nella determinazione del tipo di sensazione prodotto dei soggetti. Detti indici²² vengono spesso impiegati dai servizi meteorologici per indicare la *temperatura percepita*: tutti, infatti, dispongono di proprie scale di *sensazione termica* redatte in funzione del livello di comfort, anche se si riscontra una discreta disomogeneità dei risultati.

La validità scientifica del metodo *PMV-PPD* è comunque limitata da diverse condizioni: stazionarietà, attività metabolica sedentaria, *range* di temperatura dell'aria compreso tra 10 e 30°C e tra 10 e 40°C per la media radiante, e velocità relativa del vento compresa tra 0 e 1,0 m/s. Abbandonando la condizione di regime stazionario, la normativa europea²³ distingue ridotti cicli di temperature, con differenza di picchi minore o uguale ad 1 K e/o flussi contenuti entro 2 K/h, rispetto al regime transitorio vero e proprio. Per i primi, il regime permanente può essere applicato con errore trascurabile; nel secondo caso, se le condizioni evolvono verso un decremento del discomfort, e quindi il *PMV* si avvicina a 0, allora può applicarsi la stessa valutazione fatta in condizione di regime permanente; al contrario, durante i primi 30 minuti si avverte una sensazione di disagio più marcata rispetto a quella prevista in condizioni stazionarie: ne consegue che in questa fase il metodo *PMV-PPD* restituisce valori di discomfort più bassi di quanto in realtà non si avverta²⁴.

Quando le condizioni ambientali ricadono esternamente al *range* entro il quale è possibile applicare il metodo, ma è ancora valida la limitazione al regime permanente – situazione che si verifica nei luoghi di produzione a carattere industriale con ambienti termici severi, come fabbriche ed officine – allora si utilizzano indici indiretti differenti. Negli ambienti severi freddi²⁵, la norma²⁶ introduce il concetto di *durata limite di esposizione DLE* che determina il massimo stress termico supportabile da un individuo sano ed abile al lavo-

²¹ Cfr. ASHRAE Standard 55/2004, *Thermal environmental conditions for human occupancy*.

²² La norma americana utilizza la dicitura di *environmental indices*, traducibile come *indici ambientali* (cfr. ASHRAE, *Handbook – Fundamentals*, op. cit., pag.8.19); l'Istituto di Biometeorologia del CNR impiega il termine di *indici di disagio* (cfr. Portale dell'Istituto di Biometeorologia, www.ibimet.cnr.it); le norme ISO ed UNI invece non usano terminologie particolari.

²³ Cfr. UNI EN ISO 7730:2006, *Ergonomia degli ambienti termici. Determinazione analitica e interpretazione del benessere termico mediante il calcolo degli indici PMV e PPD e dei criteri di benessere termico locale*.

²⁴ Cfr. P. Fanger, *Assessment of man's thermal comfort in practice*, *British Journal of Industrial Medicine*, pag.315.

²⁵ Cfr. § 4.2.1.

²⁶ Cfr. UNI ENV ISO 11079:2008, *Ergonomia degli ambienti termici. Determinazione e interpretazione dello stress termico da freddo con l'utilizzo dell'isolamento termico dell'abbigliamento richiesto (IREQ) e degli effetti del raffreddamento locale*.

ro. In caso di ambienti severi caldi, il limite²⁷ può essere determinato invece dalla potenza termica dispersa attraverso la pelle, che corrisponde ad un valore di sudorazione massima tollerabile da un individuo²⁸, misurato con un *indice di stress di calore HSI*.

I modelli *adattivi* rispetto ai precedenti approcci tendono a considerare che i soggetti immersi in un ambiente interagiscono con esso attraverso variazioni comportamentali volontarie (modifica del vestiario, della postura e della posizione, del livello di attività, della ventilazione, della quantità e qualità di cibo e liquidi assunti), fisiologiche involontarie (mutando la sudorazione, il flusso sanguigno, il brivido e la perdita di sali) e psicologiche (quando esperienze pregresse ed aspettative modificano la percezione degli stimoli sensoriali)²⁹. Questo ha consentito di sviluppare diversi studi in base ai quali le condizioni di comfort variano in funzione della temperatura media mensile esterna³⁰. Anche quando le condizioni ambientali sono tali da garantire il comfort, possono verificarsi alcuni presupposti in grado di generare sgradevoli sensazioni su una porzione del corpo degli utenti; in tal caso occorre verificare anche il discomfort locale, che può essere generato da diversi fenomeni, quali³¹:

- gradiente termico verticale;
- asimmetria radiante;
- temperature delle superfici;
- correnti d'aria.

La verifica degli indici che esprimono le condizioni di discomfort locale hanno una validità scientifica solo se si dispone di rilievi e/o calcoli estremamente raffinati, in grado di definire con precisione le condizioni fisiche nell'immediato intorno dell'utente che, in questo caso, non sono disponibili.

Tenuto conto di tutto ciò, è possibile proporre un metodo di valutazione³² che consenta di integrare il *PMV-PPD* con i modelli adattivi, il *DLE* e lo *HSI*, allo scopo di disporre di un unico criterio di stima in grado di poter eseguire misura del comfort in ogni condizione, e che sia contemporaneamente basato su sistemi ampiamente condivisi.

Per poter applicare il metodo occorre quindi definire le variabili fisiche necessarie per svolgere la valutazione, e quindi da un lato le condizioni climatiche del luogo in cui si esegue la stima, e dall'altro i parametri ambientali che si registrerebbero negli edifici. Ciò comporta la necessità di conoscere le caratteristiche morfologiche e funzionali del territorio su cui insiste la costruzione oggetto della stima, tutti gli elementi tecnici che interagiscono con l'ambiente esterno, e quelli che separano le differenti unità ambientali interne. Particolare attenzione dovrà quindi essere posta sull'analisi e sulla classificazione delle chiusure e delle partizioni interne, ed in particolare modo degli infissi, la cui movimentazione da parte degli utenti può modificare le caratteristiche ambientali e, quindi, il livello di comfort percepito.

²⁷ Cfr. ASHRAE, *Handbook – Fundamentals*, op. cit., pag.8.20.

²⁸ Cfr. § 4.2.1. Il WBGT, proposto in ambito normativo europeo (cfr. UNI EN 27243:1996, *Ambienti caldi. Valutazione dello stress termico per l'uomo negli ambienti di lavoro, basata sull'indice WBGT (temperatura a bulbo umido e del globotermometro)*) è un indice sintetico che trova applicazione nelle misurazioni dirette delle condizioni di stress termico nei luoghi di lavoro.

²⁹ Cfr. ASHRAE, *Handbook – Fundamentals*, op. cit., pag.8.18. Cfr. anche Burratti C., *Impianti di climatizzazione e condizionamento*, Morlacchi, Perugia, pag. 27.

³⁰ Cfr. § 4.2.1.

³¹ Cfr. UNI EN ISO 7730, op. cit..

³² Cfr. § 4.2.1.

La norma italiana³³ mette a disposizione una serie di dati meteorologici, riferiti ai capoluoghi di provincia, e gli algoritmi che consentono di elaborarli³⁴; sfortunatamente, questi sono sufficienti ad determinare solo una parte dei valori che occorrono, per cui si rende necessario ampliarli utilizzando anche altre fonti³⁵. Conosciute le condizioni esterne, bisogna calcolare i parametri ambientali che si trovano all'interno delle costruzioni; qui si possono distinguere due approcci metodologici differenti, dipendenti dall'obiettivo che la norma si pone: il primo viene adottato sia per la determinazione del *carico termico* (cioè la massima quantità di calore dispersa da uno o più ambienti termicamente omogenei allo scopo di dimensionare gli impianti di climatizzazione³⁶), che del *fabbisogno energetico normalizzato* (corrispondente all'aliquota di energia impiegata per la climatizzazione di un edificio³⁷), mentre il secondo si utilizza per il calcolo dinamico della temperatura degli ambienti privi di sistemi di termoregolazione³⁸. Dal punto di vista fisico, entrambi i metodi considerano che il flusso termico attraverso gli elementi tecnici sia monodimensionale ma, nel primo caso, esso è anche stazionario, mentre nel secondo varia in funzione del tempo: per questo motivo, volendo analizzare ambienti che possono essere sforniti di impianti termo-regolanti, il primo sistema è inefficace in quanto viene meno il presupposto di temperatura costante sul quale si basa l'intero approccio. La valutazione dinamica è sicuramente molto più laboriosa, ma può essere facilmente *meccanizzata* attraverso l'impiego di fogli di calcolo, consentendo altresì di fornire i dati necessari per la stima delle condizioni di comfort ambientale.

Per eseguire la valutazione del comfort igrotermico occorre individuare anche i parametri relativi all'utenza, e cioè il livello di attività metabolica e la resistenza termica del vestiario. Per il primo, la norma offre diversi approcci a seconda del livello di precisione che si vuole perseguire³⁹; naturalmente, più ridotto è il margine di errore e più complesso si presenta il prelievo dei dati⁴⁰. Anche la resistenza termica dei vestiti può essere determinata grazie ad un metodo relativamente semplice⁴¹, e può essere indivi-

³³ Cfr. UNI 10349:1994, *Riscaldamento e raffrescamento degli edifici. Dati climatici*.

³⁴ Cfr. § 4.1.1.2. La UNI 10349 non consente di determinare tutte le variabili che occorrono per cui in appendice si propone un metodo che consente di intersecare questi valori con quelli registrati nell'Atlante Meteorologico d'Italia.

³⁵ Cfr. anche §2.2.1.

³⁶ Cfr. UNI EN 12831:2006, *Impianti di riscaldamento negli edifici. Metodo di calcolo del carico termico di progetto*.

³⁷ Cfr. UNI EN ISO 13790:2008, *Prestazione energetica degli edifici. Calcolo del fabbisogno di energia per il riscaldamento e il raffrescamento*.

³⁸ Cfr. UNI 10375:1995, *Metodo di calcolo della temperatura interna estiva degli ambienti*. La norma è concettualmente utilizzabile in qualsiasi periodo dell'anno, anche in presenza di sistemi di riscaldamento e raffrescamento, in quanto è possibile tenere conto dei contributi termici nell'equazione che regola il problema. Nel caso in cui sia presente un sistema di termoregolazione, questo provvede a mantenere costante la temperatura interna attraverso l'accensione e lo spegnimento del sistema di climatizzazione: per tale motivo, la norma non si applica perché il valore di temperatura interna è già noto.

³⁹ Cfr. UNI EN ISO 8996:2005, *Ergonomia degli ambienti termici. Determinazione del metabolismo energetico*. Il metabolismo viene spesso misurato in met, dove sussiste la relazione $1 \text{ met} = 58.2 \text{ W m}^{-2}$.

⁴⁰ Cfr. § 4.1.3.2.

⁴¹ Cfr. UNI EN ISO 9920:2007, *Ergonomia degli ambienti termici. Valutazione dell'isolamento termico e della resistenza evaporativa dell'abbigliamento*.

duato a partire dai capi di abbigliamento che, a loro volta, vengono solitamente indossati in determinati periodi dell'anno e/o per svolgere particolari mansioni⁴².

1.2.4 Il comfort visivo

Per la particolare importanza che riveste il senso della vista, la norma riconosce che i requisiti illuminotecnici soddisfano tre esigenze fondamentali, e cioè il comfort visivo, inteso come la sensazione di benessere che contribuisce in via indiretta ad aumentare la produttività delle attività svolte, la prestazione visiva, che è l'attitudine a eseguire i *compiti visivi* anche in condizioni difficili e protratti nel tempo, e la sicurezza⁴³. Occorre anche qui sottolineare che la maggior parte del corpo normativo è prodotto per regolamentare ed indirizzare la progettazione e realizzazione di impianti, ad uso dei quali definisce e limita i principali parametri che caratterizzano l'ambiente luminoso⁴⁴. Queste indicazioni possono comunque essere prese in considerazione anche nel caso in cui la fonte è naturale, anche se, com'è facilmente intuibile, le modalità di stima sono differenti a causa della diversa origine della luce⁴⁵. È possibile quindi proporre un quadro sinottico che indichi i limiti dei parametri ottimali di comfort luminoso, redatto attraverso il confronto delle diverse norme ed adattato per la luce naturale⁴⁶.

Il calcolo in un ambiente soggetto all'accesso solare avviene, come è noto, grazie all'impiego del *fattore di luce diurna*, o *daylight factor DF*, che rappresenta la percentuale di luce entrante nel locale in rapporto alla quantità esterna; la norma⁴⁷ consente di calcolare un valore medio grazie ad una formula sintetica che si basa sul modello *CIE overcast sky* che simula la luminanza della volta celeste in condizioni di nuvolosità elevata, e quindi in assenza di luce diretta del sole⁴⁸. Per questo motivo si propone di impiegare un metodo di stima analogo al *DF* che utilizzi modelli di cielo anisotropo, e che tenga presente le reali condizioni di copertura nuvolosa derivate direttamente dall'elaborazione dei dati meteorologici⁴⁹. Nella valutazione delle condizioni di illuminamento riveste quindi grande importanza l'analisi del luogo, intesa non soltanto come la raccolta dei dati relativi alle condizioni meteo, ma anche e soprattutto la conoscenza della morfologia del territorio, la presenza di ostacoli fisici e di quant'altro influisce sulla propagazione dei raggi solari. Grandissima importanza riveste l'orientamento, la forma e la dimensione delle aperture verso l'esterno, per cui grande cura deve essere rivolta alla stesura dell'abaco degli infissi, classificando anche i sistemi di chiusura (tapparelle, veneziane, etc.) e di oscuramento (tende esterne ed interne), che consentono agli utenti di modificare in modo significativo l'accesso della luce all'interno degli ambienti.

⁴² Cfr. § 4.1.3.2.

⁴³ Cfr. UNI EN 12464-1:2004, *Luce e illuminazione. Illuminazione dei posti di lavoro. Parte 1: Posti di lavoro in interni*.

⁴⁴ Cfr. § 4.2.2.

⁴⁵ Cfr. UNI 10840:2007, *Luci e illuminazione. Locali scolastici. Criteri generali per l'illuminazione artificiale e naturale*. Si noti come le poche norme relative a sistemi passivi siano esclusivamente ad appannaggio dell'edilizia scolastica.

⁴⁶ Cfr. § 4.2.2.

⁴⁷ Cfr. UNI 10840:2007, *op. cit.*.

⁴⁸ Impiegando *CIE overcast sky*, due infissi esterni uguali ma con diversa esposizione generano lo stesso illuminamento interno.

⁴⁹ Cfr. § 4.1.1.2.

1.2.5 Il comfort uditivo

Quando si parla di comfort uditivo si valutano principalmente le condizioni di disagio che sono procurate dalla presenza dell'inquinamento acustico, e cioè di rumori non graditi e non desiderati; d'altro canto però esiste anche un altro aspetto, e cioè la sensazione di benessere che deriva dall'ascolto volontario di stimoli acustici, come ad esempio sentire musica o seguire un discorso che interessa. Questo fenomeno, che sicuramente contribuisce a modificare l'atteggiamento mentale di gradimento verso le condizioni ambientali, non sarà qui sviluppato, in quanto meriterebbe uno studio approfondito sui meccanismi psicologici di coinvolgimento emotivo che il messaggio sonoro – e la sua decodificazione – comporta sugli ascoltatori; saranno invece considerate quelle condizioni che possono rendere agevole o meno, parafrasando l'analoga definizione in campo illuminotecnico, il *compito uditivo* da parte degli utenti.

Le sollecitazioni acustiche intense possono causare diversi danni sia uditivi (ronzii, sordità temporanea o permanente) che extrauditivi (insonnia, irritabilità, sindrome ansio-depressiva, aumento della pressione arteriosa). Le cause di discomfort sono sostanzialmente tre: un elevato *rumore di fondo*, pari al livello di pressione sonora che mediamente si manifesta nell'ambiente, un alto *rumore di picco*, che consiste in un fenomeno limitato nel tempo, ed una grande *esposizione personale quotidiana al rumore*, che rappresenta il livello medio di pressione sonora al quale un utente è esposto durante un periodo di otto ore.

La legislazione⁵⁰ stabilisce valori limite e di qualità per il rumore di fondo nelle aree esterne in funzione dell'uso del territorio, definendo sia il *valore limite di immissione assoluto*, che rappresenta la pressione sonora media limite, che il *valore limite di immissione differenziale*, che invece consiste nel massimo aumento osservabile nella fluttuazione temporale⁵¹. Accanto a questi, altri autori definiscono tipologia di fonte, intensità sonora ed effetti sull'attività umana in base ai quali possibile elaborare una tabella di riferimento per valutare le condizioni di comfort in funzione attività svolta all'interno di un ambiente⁵². A ciò si aggiunge che sia la norma⁵³ che la legislazione⁵⁴ definiscono anche i valori al di là dei quali possono insorgere problemi fisici irreversibili. Occorre poi considerare che, con l'avanzare dell'età, la soglia audiometrica si modifica⁵⁵; è quindi necessario tener presente anche questa variazione nella valutazione del comfort uditivo. Nel caso in cui la sollecitazione acustica non è inquinante, e cioè l'utente ha la necessità di ascoltare la fonte sonora, ed il livello di rumore ambientale è al di sotto dei valori limite, la qualità dell'ascolto è data dal *tempo di riverberazione*⁵⁶.

⁵⁰ Cfr. Legge 26 ottobre 1995 n.447, *Legge quadro sull'inquinamento acustico*.

⁵¹ Cfr. § 0.

⁵² Cfr. § 0.

⁵³ Cfr. UNI ISO 226:2007, *Acustica. Curve normalizzate di equal livello di sensazione sonora*. Nella norma le curve isophon si limitano al valore di 120 dB, che può essere considerato il valore massimo udibile senza incorrere in danni irreversibili.

⁵⁴ Cfr. D. Lgs. 9 aprile 2008 n°81, *Attuazione dell'art.1 della legge 3 agosto 2007, n.123, in materia di tutela della salute e della sicurezza nei luoghi di lavoro*. La soglia per un rumore di picco è fissata a 135 dB(A).

⁵⁵ Cfr § 4.1.3.1.

⁵⁶ Cfr. UNI EN ISO 3882-2:2008, *Acustica. Misurazione dei parametri acustici negli ambienti. Parte 2: tempo di riverberazione negli ambienti ordinari*.

Per poter eseguire la valutazione del discomfort uditivo è quindi necessario definire la variazione temporale del clima acustico, la trasmissione del rumore all'interno degli ambienti, l'attività che gli utenti stanno svolgendo, ed eventualmente la riverberazione del suono. Tutto ciò è influenzato principalmente da tre elementi principali. Il primo è il livello di antropizzazione del territorio, che è rappresentativo sia della quantità e qualità di attività umane presenti, che sono la causa principale del rumore di fondo, sia della presenza di ostacoli che si frappongono tra la sorgente disturbante e l'ascoltatore, che è maggiore dove la densità edilizia è più elevata. Il secondo è legato alla qualità degli elementi tecnici che costituiscono le chiusure e le partizioni interne degli ambienti costruiti, attraverso i quali i rumori si propagano fino a raggiungere gli utenti. Il terzo è invece funzione della forma degli ambienti, e quindi della riverberazione degli stessi, che è una delle cause che possono arrecare disturbo all'ascolto degli stimoli acustici, quando questi sono necessari all'espletamento del compito uditivo.

Per definire il rumore di fondo presente, se sono in vigore i Piani di zonizzazione acustica, il prelievo dei dati è senz'altro più semplice; al contrario, si dovrà provvedere all'individuazione delle fonti principali di inquinamento ed alla valutazione del decadimento del segnale dalla sorgente all'ascoltatore⁵⁷. Se l'utente svolge attività in spazi chiusi, occorre anche stimare l'assorbimento dei rumori esterni attraverso le chiusure dell'edificio e le partizioni interne, queste ultime estremamente importanti nei meccanismi di isolamento acustico, necessari quando sono presenti fonti di rumore interne alle costruzioni⁵⁸.

1.2.6 Il disagio psicofisico e sociale

Come precedentemente accennato⁵⁹, il modello *statico* alla base delle applicazioni della fisica tecnica più comuni non tiene conto dei comportamenti *attivi* dei soggetti, che tendono a reagire alle situazioni di discomfort attraverso variazioni psicologiche e comportamentali, volontarie ed inconsce, in grado di modificare, attenuandole, le sensazioni di disagio. Sviluppata in ambito igrotermico, la teoria adattiva divide il comportamento umano in tre categorie, a loro volta suddivise in⁶⁰:

- Adattamento comportamentale (*behavioral adjustment*), che include tutte le modifiche ai flussi di massa ed energia che governano la sensazione fisiologica, e si articolano in:
 - a. Adattamento individuale, che implica la modifica delle variabili personali, quali l'attività, la postura, la posizione, il tipo di vestiario, mangiare o bere cibi caldi o freddi;
 - b. Adattamento ambientale, che consiste nella variazione dell'intorno, come l'apertura o chiusura di finestre, porte, sistemi di oscuramento;
 - c. Adattamento culturale, che include le attività abituali, riposo, abbigliamento usuale.
- Adattamento fisiologico (*physiological adaptation*), che annovera tutti i cambiamenti che l'esposizione prolungata ad un particolare ambiente produce sulla reazione fisiologica dei soggetti, e si divide in:

⁵⁷ Cfr. § 4.1.1.3.

⁵⁸ Cfr. § 4.1.2.3.

⁵⁹ Cfr. § 1.2.3.

⁶⁰ Cfr. ASHRAE, *Developing an Adaptive Model of Thermal Comfort and Preference*, pagg.3-13.

- a. Adattamento genetico, di un singolo individuo o di un gruppo di persone, percepibile nell'arco temporale di una vita intera;
- b. Assuefazione, consistente nella variazione fisiologica osservabile su una scala temporale di alcuni giorni o settimane.
- Adattamento psicologico (*psychological adaptation*), che raccoglie tutti quei fenomeni che contribuiscono a modificare la percezione del discomfort, in base all'esperienza pregressa ed alle aspettative dei diversi soggetti.

Proprio quest'ultima forma di adattamento è alla base delle pratiche costruttive dell'Architettura tradizionale, perché, fondandosi sul patrimonio di conoscenze accumulato nel tempo e trasmesso alle successive generazioni, ha consentito di sviluppare quelle variazioni morfologiche e tecniche, variabili da zona a zona, che costituiscono l'adeguamento alle caratteristiche peculiari del territorio.

La Figura 1-1 illustra la differenza esistente tra il classico approccio statico ed il modello adattivo, dove esistono complessi processi circolari di ritorno (*feedback loop*). Il sistema di retroazioni mette in luce il meccanismo di difesa del corpo che, alla sollecitazione di elementi stressori esterni (*stressors*) reagisce con regolazioni a breve, medio e lungo termine in grado di riportare l'organismo in condizioni di omeostasi biologica e psichica. D'altro canto, la presenza di una preesistente sindrome di adattamento può essere motivo di alterazione della sensazione di discomfort, ed in particolare:

- lo stress fisiologico comporta un incremento dell'attività cardiaca (accelerazione del battito ed ipertensione arteriosa) ed un conseguente aumento della sudorazione e/o la dilatazione delle pupille, che modificano le sensazioni di comfort igrotermico e visivo;
- lo stress psicologico aumenta lo stato ansioso dei soggetti - al quale si accompagnano fenomeni fisiologici come palpitazioni, tremori e nausea - che tende ad amplificare tutte le sensazioni di discomfort.

Il disagio psicofisico, quando è legato ad una distribuzione statistica sulla popolazione, rientra nelle normali condizioni di variabilità probabilistica della percezione di comfort; diverso è il caso in cui la tipologia di utenza presenti concentrazioni di condizioni patologiche (ospedali, case di cura, case di riposo), o di debolezza fisica e psicologica (anziani, bambini). Attualmente non sono disponibili studi che mettono in stretta correlazione i livelli di stress con la percezione del comfort, né tantomeno sono stati elaborati indicatori quantitativi in grado di eseguire una valutazione della sindrome di adattamento⁶¹; si preferisce quindi misurare gli elementi stressori, piuttosto che il fenomeno in sé, che possono annoverarsi in: caratteristiche temperamentali e della personalità, capacità intellettive, livello culturale, condizioni socio economiche. Da quest'ultimo punto di vista, significativi sono gli indicatori proposti a livello comunitario utilizzati per l'assegnazione dei fondi strutturali Europei da destinarsi ai *quartieri in crisi*⁶², quali una soglia demografica di 20.000 abitanti, elevato tasso di disoccupazione, scarsa attività economica, notevole

⁶¹ Anche quando si assume un quadro sintomatico di riferimento, come l'aumento della pressione arteriosa e del battito cardiaco, si riscontra che in condizioni particolari gli individui possono non avvertire sintomi patologici (*eustress*, cioè una situazione che, oltre la norma, viene rilevata dal soggetto come quotidiana). Cfr. Lucini D. *et al.*, *Impact of chronic psychological stress on autonomic cardiovascular regulation in otherwise healthy subject*, pagg.1201-1206.

⁶² Cfr. Ministero dello Sviluppo Economico, *Rapporto annuale del 2006 del Dipartimento per le Politiche di sviluppo e Coesione sugli interventi nelle aree sottoutilizzate*, pag. 2.

povertà ed emarginazione, esigenza specifica di riconversione a seguito di problemi socioeconomici locali, forte presenza di immigrati, gruppi etnici e minoranze, profughi, basso livello d'istruzione, carenze significative di specializzazione e tassi elevati di abbandono scolastico, elevata criminalità, andamento demografico precario, ambiente particolarmente degradato. Per tale motivo, Istat ha elaborato nel periodo 2000/2006, e cioè in concomitanza con il progetto *Urban II*⁶³, una serie di indicatori in grado di misurare il disagio sociale, ed in particolare ha assunto il valore di *soglia di povertà* come principale parametro⁶⁴, al quale se ne affiancano altri, quali il contesto abitativo (qualità degli alloggi), l'accesso ai servizi fondamentali (ASL, pronto soccorso, asili nido, scuola materna), l'acquisizione di beni e servizi essenziali (capacità di pagare bollette, accedere a cure mediche), la necessità di ricorrere ad aiuti informali (aiuti in natura o danaro da amici o parenti), la sensazione soggettiva di povertà⁶⁵.

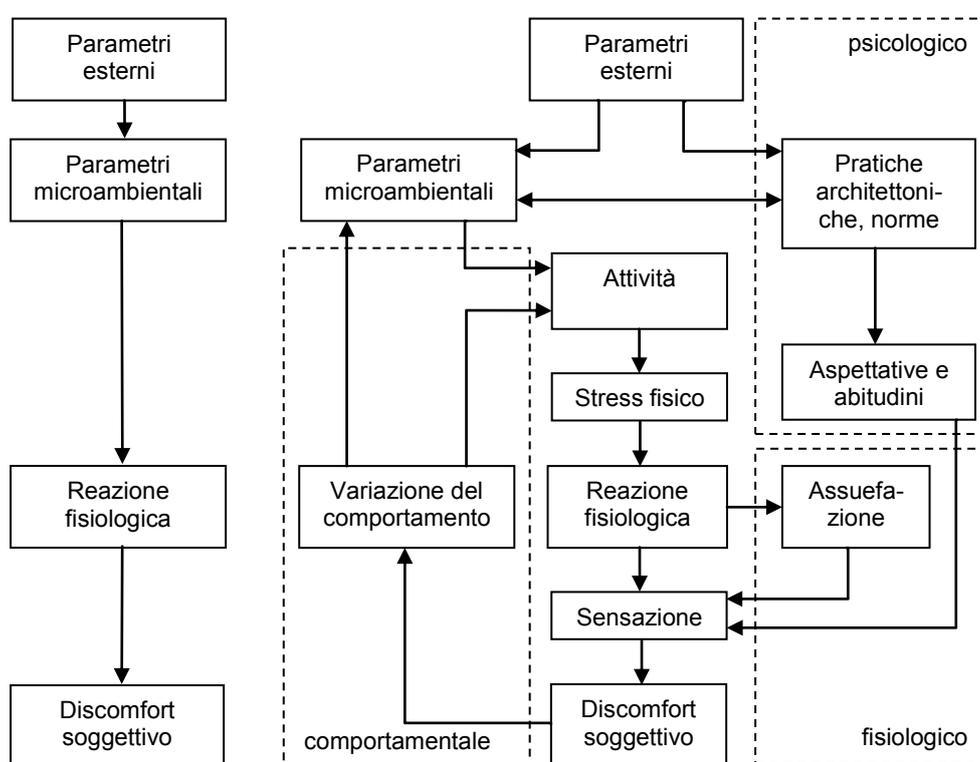


Figura 1-1 Schema statico e, a destra, adattivo di valutazione del comfort

L'elevato numero di variabili ha spinto il Dipartimento per le Politiche di Sviluppo, in collaborazione con la Regione Toscana, ad elaborare nel 2006 un sistema sintetico e maggiormente intelligibile in grado di restituire tre indicatori a partire da un insieme di circa quaranta variabili rappresentativo della misura del disagio sociale⁶⁶. Impiegando l'analisi delle componenti principa-

⁶³ *Ibidem*. Cfr. anche Comunicazione della Commissione agli Stati Membri, *Orientamenti relativi all'iniziativa comunitaria concernente la revitalizzazione economica e sociale delle città e delle zone adiacenti in crisi, per promuovere uno sviluppo urbano sostenibile Urban II*.

⁶⁴ Cfr. Istat, *La misura della povertà assoluta*. Cfr. anche Istat, *La povertà relativa in Italia nel 2007*.

⁶⁵ Cfr. Istat, *La povertà e l'esclusione sociale nelle regioni italiane*.

⁶⁶ Cfr. Iris, Istituto ricerche interventi sociali, *Politiche economiche e per la competitività di città e reti urbane nella futura programmazione comunitaria in Regioni Ob2*.

li, o PCA, lo studio costruisce per tredici provincie italiane gli indicatori di:

- disagio lavorativo, espresso dal grado di coinvolgimento in un mercato del lavoro efficiente, costruito sul tasso di occupazione, di attività e di disoccupazione;
- disagio socio relazionale, elaborato sulla percentuale di famiglie senza nucleo e su quella di persone divorziate, separate o vedove;
- disagio abitativo, descritto dall'indice di inutilizzo del patrimonio abitativo, calcolato dalle percentuali di abitazioni senza riscaldamento, vuote e sfornite di linea telefonica;

tutte le variabili sono state selezionate per la loro invariabilità rispetto al contesto, e la loro manifesta relazione nei confronti del tipo di disagio che occorre valutare.

1.3 L'analisi del benessere

1.3.1 I metodi numerici

La possibilità di eseguire un elevatissimo numero di calcoli attraverso l'impiego di personal computers ha determinato una notevole diffusione di softwares dedicati alla valutazione delle condizioni ambientali e del comfort degli utenti. Vista la grande eterogeneità, occorre immediatamente distinguere i programmi che semi-automatizzano i metodi in uso nella normativa da quelli che risolvono numericamente i modelli fisici che descrivono i diversi meccanismi di azione: i primi hanno l'obiettivo di affiancare i professionisti nell'applicazione delle regole tecniche allo scopo di rendere il lavoro più celere e preciso, mentre i secondi hanno il fine di eseguire i complicati calcoli necessari per risolvere i sistemi differenziali non lineari che esprimono il problema. Dal punto di vista teorico, i softwares del secondo genere offrono un approccio differente rispetto a quello normativo già visto nel paragrafo precedente: impiegando l'elevata capacità computazionale di un calcolatore, è possibile ottenere una descrizione estremamente precisa dei fenomeni, grazie alla quale si possono ottenere le condizioni micro ambientali con le quali eseguire la valutazione del comfort degli utenti.

I metodi risolutivi adottati nell'approccio ai sistemi differenziali possono elencarsi in:

- Metodo alle differenze finite;
- Metodo agli elementi finiti (FEM);
- Metodo ai volumi finiti.

Il primo metodo, consistente nel sostituire il rapporto incrementale alla derivata, permette di ottenere funzioni che, per incrementi sempre più piccoli, convergono rapidamente verso la soluzione esatta⁶⁷; nonostante siano di semplice implementazione, attualmente le differenze finite non vengono impiegate in quanto si preferiscono approcci in grado di modellare situazioni più complesse.

Il FEM divide il dominio continuo di calcolo in elementi discreti che, nel caso piano, sono triangolari o quadrati, e nel caso spaziale sono un reticolo composto da tetraedri ed esaedri; questa suddivisione consente di applicare alle singole entità geometriche un sistema di soluzioni che appros-

⁶⁷ Cfr. L. M. Milne-Thomson, *The Calculus of Finite Differences*, MacMillan, Londra 1933, e M. Abramowitz e I. Stegun, *Handbook of Mathematical Functions with Formulas, Graphs, and Mathematical Tables*.

sima il modello. La convergenza verso la soluzione esatta è quindi data dal grado di discretizzazione del modello⁶⁸, e le funzioni utilizzate sono di solito polinomiali. Il metodo agli elementi finiti trova applicazione nella modellazione di corpi solidi, anche di particolare complessità.

Il metodo ai volumi finiti, concettualmente simile al precedente, suddivide lo spazio in volumi elementari, la cui correlazione viene scritta in funzione della forma integrale delle equazioni; anche qui la convergenza verso la soluzione esatta avviene per discretizzazioni più elevate del volume modellizzato⁶⁹; il metodo si applica principalmente nell'analisi dei fluidi.

I softwares che utilizzano i metodi di soluzione numerica si compongono generalmente di tre parti. La prima di queste è denominata *preprocessore* ed è quel componente di programma nel quale viene implementato il problema. I dati in ingresso sono di duplice natura: la parte geometrica, intendendo con questa la configurazione spaziale di tutti gli elementi che compongono lo scenario di calcolo quali forma, posizione, orientamento, può essere o modellata da altri programmi CAD ed importata successivamente o inserita direttamente; i dati fisici del problema, come le condizioni al contorno, l'evoluzione temporale delle stesse e le qualità specifiche degli elementi, vengono di solito immessi nel programma di calcolo. La fase di implementazione si conclude con la generazione della discretizzazione, ottenendo la *mesh* finale di calcolo; l'operazione è di solito svolta automaticamente dal software, anche se si richiedono diversi parametri, come le ampiezze massima e minima degli elementi, dai quali dipende l'accuratezza della suddivisione, aumentando la quale si incrementano i tempi di calcolo. La fase di implementazione è sempre estremamente delicata in quanto errori anche marginali possono ripercuotersi sia sull'accuratezza della soluzione che sulla convergenza della stessa: per tale motivo, alcuni programmi hanno un algoritmo per il controllo della mesh in grado di evidenziare i punti critici, anche se questa procedura non riesce a rilevare tutti i possibili errori che possono essere generati in fase di calcolo. Ne deriva che la modellazione deve seguire delle regole rigide, derivate dal sistema di discretizzazione e calcolo che il software utilizza in fase di elaborazione della soluzione. La seconda parte del programma, denominata *processore* o *kernel*, esegue il calcolo vero e proprio che, per le numerose operazioni richieste, utilizza un'elevata quantità di risorse hardware; per questo motivo, i softwares impiegano diverse strategie che hanno lo scopo di ridurre i tempi di elaborazione e di aumentare l'efficienza, consistenti nel calcolare soluzioni con un basso livello di approssimazione ed iterare le stesse eseguendo calcoli più precisi esclusivamente nei punti dove la necessità lo richiede. Questo tipo di approccio richiede una implementazione estremamente precisa, e può in alcuni casi generare la divergenza della soluzione. Il *post processore* è infine quel componente in grado di originare files, grafici ed immagini tramite i quali è possibile leggere o visualizzare i dati relativi alla soluzione trovata; i dati scritti e tabulati possono essere poi utilizzati in programmi di videoscrittura, mentre grafici statici ed animati possono essere visualizzati in presentazioni multimediali.

⁶⁸ Cfr. O. Zienkiewicz, *The finite element method*, Mc Graw Hill, New York 1979.

⁶⁹ Cfr. A. Quarteroni, *Modellistica numerica per problemi differenziali*, Springer Verlag Italia, Milano 2008.

1.3.1.1 Termo-fluidodinamica computazionale (CFD)

Nei problemi di scambio termico, un complesso e fondamentale ruolo gioca il meccanismo di trasmissione per convezione, per il quale si rende necessario l'approccio ai volumi finiti: infatti, se conduzione ed irraggiamento possono essere modellati con il FEM, i movimenti dell'aria richiedono la terza metodologia di soluzione. Questa tipologia di software viene spesso indicata con l'acronimo inglese *CFD*, riduzione di *computational fluid dynamics*, a sottolineare la capacità di eseguire calcoli dinamici sull'andamento dei fluidi, ma, dato che vengono impiegati algoritmi per calcolare lo scambio energetico anche attraverso gli altri due fenomeni, si dovrebbe più correttamente parlare di *thermo-fluidodinamica computazionale*.

L'implementazione geometrica è particolarmente complessa: solidi estremamente articolati possono generare errori nella fase di discretizzazione, ma anche l'ordine di creazione degli oggetti può influire sul modello implementato, soprattutto quando corpi solidi si interpenetrano⁷⁰. L'impiego di formati di importazione dati⁷¹ da programmi di disegno CAD consente soltanto di disporre di una base grafica su cui costruire le entità geometriche, a meno di non utilizzare preprocessori dedicati, e molto complessi, in grado di realizzare qualsiasi configurazione spaziale e di definirne il comportamento igrotermico dei diversi elementi⁷²; molto spesso, però, il modello di calcolo è estremamente semplificato, non solo per le notevoli difficoltà di inserimento dei dati, ma anche per ottenere files più snelli su cui eseguire il calcolo della soluzione (Figura 1-2). I softwares mettono poi a disposizione alcuni oggetti già modellati, come ventilatori, estrattori, fonti di calore ed anche modelli umani, che semplificano il lavoro. Alcuni programmi sono dedicati alla implementazione dei problemi fluidodinamici in edilizia: in pratica essi sono delle riduzioni di motori di calcolo più complessi, nei quali figurano soltanto oggetti e comportamenti termici di uso comune⁷³. La mesh viene generata automaticamente dagli algoritmi dei programmi; l'utente decide la tipologia di solido (parallelepipedo o poliedro) ed il *range* dimensionale dello stesso (dimensioni minima e massima che il volume finito può assumere), mentre il software esegue un controllo di congruenza generale degli elementi, evitando così gli errori più grossolani. Generalmente, è abbastanza complesso decidere il grado di accuratezza da impostare, in quanto un elevato numero di elementi comporta un enorme carico di calcolo per la macchina, ed aumenta la possibilità di generare errori e divergenze durante il processo iterativo di soluzione.

⁷⁰ L'ordine di creazione viene impiegato in luogo delle sottrazioni booleane in programmi come AirPak di Fluent™, allo scopo di definire qual è il solido finale che viene modellato.

⁷¹ È comune l'impiego di DXF di AutoDesk™, un file database in formato ASCII che può essere aperto e letto da numerosi linguaggi, di alto e basso livello.

⁷² Il preprocessore GAMBIT, utilizzato per Fluent™ consente modellazioni estremamente complesse, ma con tempi di implementazione decisamente lunghi.

⁷³ Alcuni softwares, come Airpak, forniscono domini di calcolo limitati nello spazio (*constrained*), molto comodi quando occorre modellare ambienti chiusi; nel caso in cui occorre realizzare calcoli in spazi aperti, allora occorre estendere il dominio molto al di là delle dimensioni fisiche dell'ambiente considerato, allo scopo di ridurre gli errori al contorno.

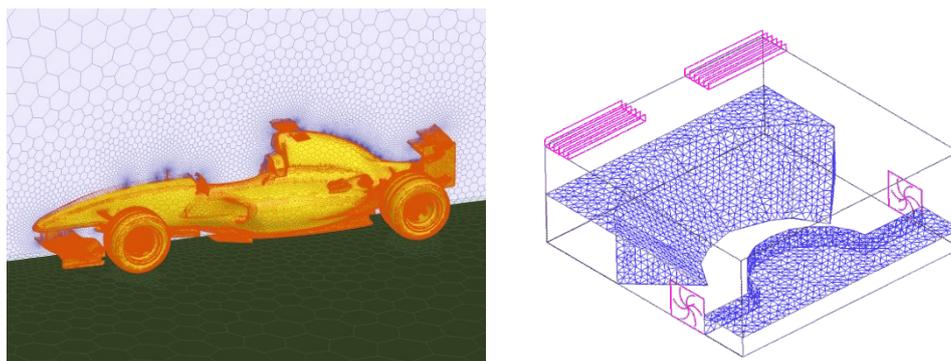


Figura 1-2 Modellazioni per kernel CFD con preprocessore dedicato e, a destra, con software semplificato per l'implementazione di problemi architettonici

Il kernel può essere abilitato a risolvere le equazioni di moto del fluido, di trasmissione del calore, o entrambe: è buona norma attivare il processore per ricercare la soluzione delle relazioni strettamente necessarie al problema analizzato, evitando inutili sovraccarichi al software ed abbassando la probabilità di generare errori. Ulteriori dati da inserire sono i margini di errore al di sotto dei quali il processore arresta il processo di iterazione, e rappresentano i limiti di convergenza della soluzione; naturalmente anche questi valori devono essere ottenuti trovando l'opportuno bilanciamento tra la necessità di ottenere un discreto livello di approssimazione delle soluzioni e la possibilità di originare errori durante il processo risolutivo.

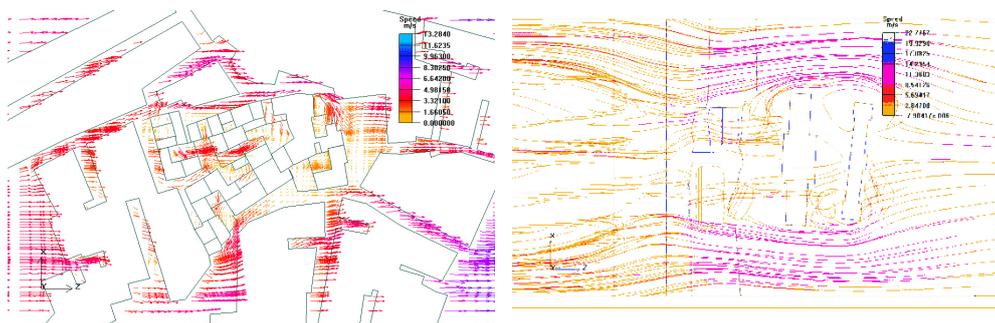


Figura 1-3 Rappresentazioni del flusso d'aria utilizzando i campi vettoriale e particellare

I post processori consentono di avere una visualizzazione estremamente chiara delle soluzioni: i flussi possono essere visualizzati sia con la consueta rappresentazione vettoriale che con quella particellare, nella quale vengono raffigurate le traiettorie di differenti particelle durante il moto dell'aria (Figura 1-3).

Più consueta, ma sempre estremamente chiara, è la mappatura del campo termico attraverso differenti zone di colore (Figura 1-4). Tutte le rappresentazioni possono essere animate, consentendo di visualizzare l'evoluzione temporale del fenomeno.

Naturalmente è possibile esportare file di testo all'interno dei quali, per ogni punto della mesh, vengono riportati i valori dei diversi fenomeni fisici, quali temperatura, velocità e direzione dell'aria, allo scopo di disporre anche dei dati analitici in base ai quali il post processore produce le rappresentazioni grafiche.

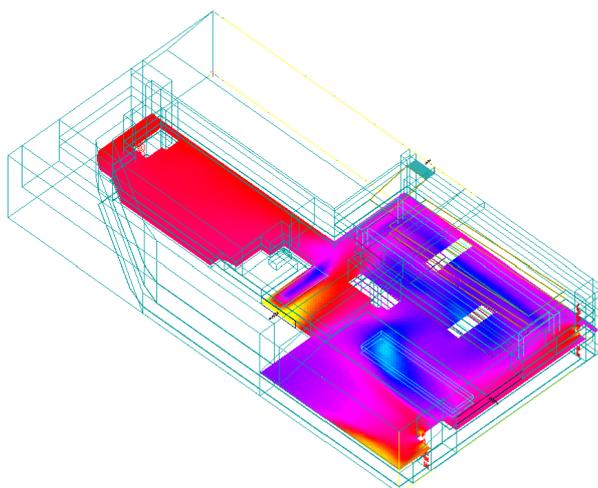


Figura 1-4 Rappresentazione del campo delle temperature

1.3.1.2 Motori ibridi Radiosity/Raytrace

I programmi di calcolo della distribuzione della luce, naturale o artificiale, all'interno di una scena opportunamente modellata, sono numerosi, e non sempre si basano su procedure di calcolo accurate; molti di questi, infatti, vengono impiegati esclusivamente per ottenere risultati *verosimili* in processi di renderizzazione, aventi lo scopo di creare una imitazione credibile della realtà, che rappresenta l'obiettivo della *Virtual reality*. Per questo motivo, occorre distinguere i softwares che effettuano, anche per approssimazione, il calcolo dell'equazione di rendering basata sulla legge di conservazione dell'energia, rispetto ad altri che compiono un semplice processo di *colorazione* della scena. I principali criteri di soluzione dell'equazione di rendering sono due: il metodo Radiosity e quello Raytrace. Il primo esegue una suddivisione delle superfici del modello, che può essere costruito con un qualsiasi programma CAD, impiegando elementi triangolari e quadrangolari (*patch*), le cui dimensioni minime e massime vengono stabilite dall'utente per via diretta o indiretta⁷⁴; a questo punto, per ogni patch, il software provvede a calcolare l'illuminamento che la superficie riceve dalle fonti di luce naturale e/o artificiale, e ne determina l'aliquota diffusa in base al colore associato all'oggetto⁷⁵. Nella seconda iterazione, l'algoritmo calcola la luce che ogni patch riceve dalle altre per effetto della diffusione, determinando sia il nuovo livello di illuminamento che il nuovo livello di diffusione; secondo tale approccio, ogni superficie *spara* luce sulle altre, ed è per tale motivo che spesso si parla di *shooting radiosity*. Calcolata la quantità di energia uscente dalle fonti di illuminamento, è possibile determinare l'aliquota incidente e riflessa dalle superfici; il secondo valore diminuisce ad ogni iterazione, perché tende asintoticamente a zero, e fornisce indirettamente una misura dell'accuratezza della soluzione. Il calcolo termina automaticamente quando l'energia residua ancora da distribuire sulle superfici raggiunge un valore soglia, stabilito in partenza dall'utente, ovvero viene arrestato manualmente dall'utilizzatore. Come in tutti i metodi FEN, anche il Radiosity converge più rapidamente quando la mesh è opportunamente costruita; a tal fine l'algoritmo di suddi-

⁷⁴ Vista la notevole diffusione commerciale di programmi di renderizzazione, molto spesso questi sono corredati di procedure passo-passo che consentono anche agli utenti inesperti di stabilire il grado di raffinatezza della soluzione.

⁷⁵ Per semplicità, il modello assunto è quello della diffusione uniforme.

visione delle superfici impiega un criterio *adattivo* grazie al quale il numero di poligoni impiegati varia in funzione dell'illuminamento, ed in particolare ne riduce le dimensioni quando il contrasto su una singola patch supera una soglia definita dal grado di accuratezza richiesto nella determinazione della soluzione (Figura 1-5). La convergenza della soluzione, anche se lenta, si verifica sempre; nonostante questa certezza, è buona norma costruire il modello geometrico correttamente, allo scopo di non dover utilizzare mesh troppo raffinate per ovviare al classico problema che la soluzione Radiosity comporta, e cioè lo *shadow leak*, che si verifica quando la dimensione minima della patch è troppo elevata o le primitive geometriche sono costruite male (Figura 1-6). In generale, ad ogni discontinuità geometrica (intersezioni, buchi), le superfici devono essere costruite in modo da produrre patch regolari (principalmente convesse e con un basso numero di triangoli o quadrangoli irregolari), in modo da avere una maggiore efficienza in termini di convergenza (Figura 1-7).

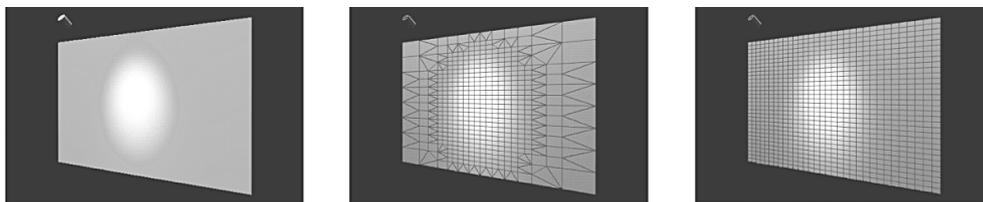


Figura 1-5 Confronto tra una suddivisione adattiva (al centro) rispetto ad una mesh costante (a destra), per un stesso livello di accuratezza della soluzione (a sinistra)

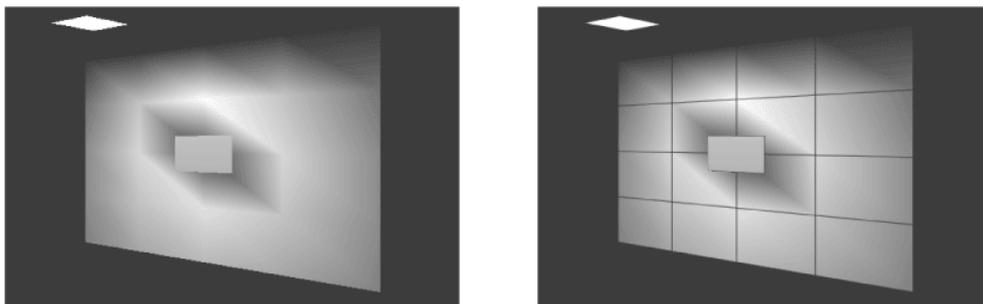


Figura 1-6 Esempio di *shadow leak* prodotto da una mesh grossolana ed una geometria di partenza scorretta

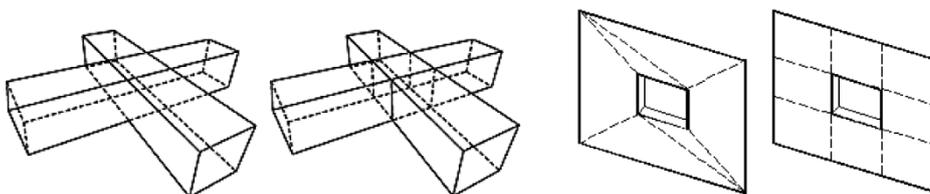


Figura 1-7 Due esempi di costruzione scorretta e (a destra) corretta di solidi geometrici per una migliore efficienza in fase di calcolo della soluzione

I vantaggi della soluzione Radiosity consistono nel determinare con grande accuratezza le aliquote di illuminamento dovute alla diffusione della luce nell'ambiente, e nell'essere indifferente alla posizione dell'osservatore; gli svantaggi risiedono nella impossibilità di simulare correttamente le discontinuità dei fenomeni fisici, alle quali sostituisce approssimazioni che non sempre raggiungono un livello sufficiente di accettabilità. I problemi che si incontrano sono due: le *jagged shadows*, o ombre 'a dente di sega', e l'incapacità di generare riflessioni speculari su superfici lucide. Per tale motivo i softwares

avanzati di calcolo impiegano motori ibridi che utilizzano anche il metodo Raytrace; questo valuta tutti i possibili percorsi che partono dall'osservatore e colpiscono gli oggetti che compongono la scena: se questi hanno superfici lucide, allora l'algoritmo determina la deviazione che il percorso subisce per effetto della riflessione, e prosegue fino ad incontrare un secondo oggetto, dove itera il processo; se la superficie non è riflettente, allora ne misura il livello di illuminamento ed il colore. Normalmente, il numero di riflessioni che ogni percorso può subire è modificabile dall'utente, in modo da calibrare i tempi di elaborazione. Il motore Raytrace consente quindi di determinare con estrema precisione i bordi delle ombre e delle riflessioni, ma non è in grado di calcolare la luce diffusa: la combinazione con la mesh Radiosity consente così di unire i vantaggi delle due soluzioni e di ottenere effetti di grande realismo, con un assoluto controllo dell'abbagliamento (Figura 1-8). La modellazione delle luci deve essere estremamente accurata, ed in particolar modo la simulazione dell'illuminamento naturale, composto da un'aliquota diretta proveniente dal disco solare e di una diffusa in arrivo dalla volta celeste, deve tener conto della posizione geografica del sito, ma anche delle condizioni di nuvolosità, che modificano sia la quantità di flusso luminoso che la temperatura di colore. Tutti i programmi di renderizzazione hanno algoritmi per stabilire la posizione apparente del sole; ben più rara è la possibilità di variarne l'intensità, per simulare le condizioni meteorologiche, e di calcolare la quantità di luce diffusa dal cielo. I softwares più avanzati consentono quindi di modificare posizione, intensità e temperatura di colore della luce solare diretta, ed intensità e temperatura di colore della luce diffusa, lasciando all'utilizzatore il compito, non facile, di stabilire il valore da associare alle diverse variabili; altri dispongono di procedure guidate che stabiliscono, in base al livello di nuvolosità, tipologia, quantità e qualità del flusso⁷⁶.

Terminata la fase di calcolo, oltre alla fotorenderizzazione è possibile ottenere immagini che, impiegando una pseudo colorazione della scena o esplicitandone direttamente i valori, restituiscono la luminanza o l'illuminamento delle diverse superfici (Figura 1-9). A volte è anche possibile selezionare direttamente un punto per conoscerne le caratteristiche fisiche, o esportare i valori cercati in un file di testo, da utilizzare in altre applicazioni⁷⁷.

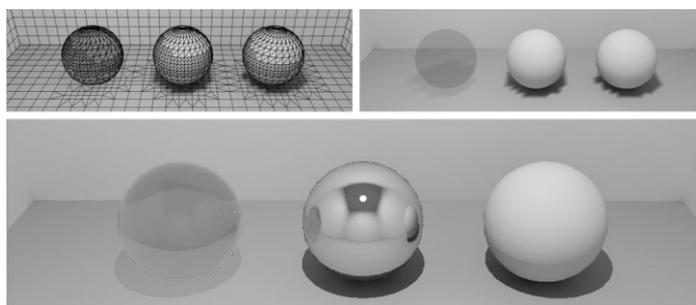


Figura 1-8 Soluzione radiosity e (in basso) ibridata con raytrace

⁷⁶ Lightscape 3.2, programma prodotto nel 1999 da AutodeskTM, è corredato da una procedura in grado di definire le condizioni meteorologiche del cielo; attualmente il software non è più in produzione in quanto gli algoritmi di calcolo sono stati inseriti in altri prodotti (nelle versioni Max e VIZ di 3D Studio), dove, purtroppo, non è stato trasferito questo metodo semplificato di implementazione.

⁷⁷ La possibilità di esportare i dati in file di testo è una caratteristica tipica dei programmi di calcolo illuminotecnico, che di solito non hanno sistemi di valutazione della luce solare o non dispongono del motore Radiosity per la valutazione della luce diffusa; fa eccezione il software DIALux, distribuito gratuitamente dalla DIAL.

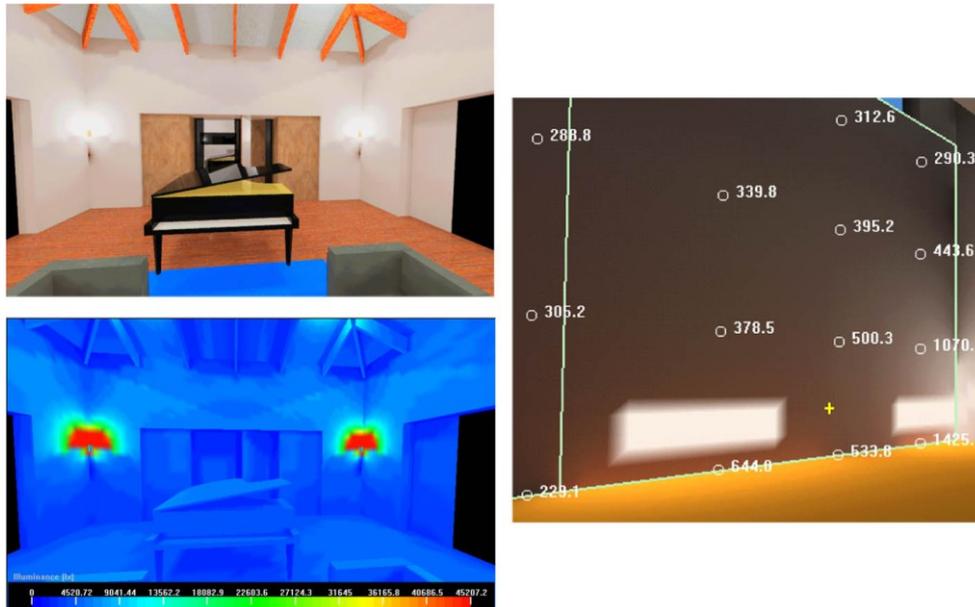


Figura 1-9 Pseudo colorazione di una scena e (a destra) griglia di valori che riportano l'illuminamento delle superfici

1.3.1.3 Modelli agli elementi di contorno (BEM) e ai vettori di trasferimento acustico (ATV)

I software di calcolo acustico si basano principalmente su approcci Raytrace e ad elementi finiti, anche se si stanno affermando altre tipologie di soluzione che consentono di ottenere soluzioni con modelli più agili: il *Boundary Element Method*, o BEM, ed *Acoustic Transfer Vectors*, o ATV.

Il metodo agli elementi di contorno riduce notevolmente il numero di equazioni da risolvere, in quanto discretizza esclusivamente il contorno del dominio di calcolo, su cui effettua la convergenza; dalla soluzione sul bordo si ricavano poi le condizioni all'interno del dominio. Questa tipologia di programma trova maggiore applicazione nella soluzione di problemi legati alla diffusione delle vibrazioni, ma possono essere utilmente impiegati anche per il calcolo della trasmissione acustica in campo architettonico (Figura 1-10). La snellezza della matrice delle equazioni risolutive consente non solo la diminuzione dei tempi di elaborazione ma anche una migliore precisione nella ricerca della convergenza. Proprio la minore diffusione di questa metodologia di calcolo ha spinto le Software House a realizzare prodotti i cui preprocessori si interfacciano con altri modellatori FEM e CFD, aumentando le capacità di network tra le differenti applicazioni⁷⁸. Anche se semplifica il problema rispetto ad un approccio agli elementi finiti, il BEM restituisce un sistema di equazioni estremamente complesso in quanto la matrice che si ottiene non è simmetrica, e le equazioni dipendono dalla frequenza di emissione, il che comporta la necessità di ripetere il calcolo per l'intero spettro del suono. Il metodo dei vettori di trasferimento acustico, al contrario, costruendo una relazione tra velocità e superficie emettente per ogni punto del campo, consente di legare la soluzione esclusivamente alla geometria del contorno, alle sue caratteristiche acustiche ed alla velocità di propagazione del suono; questo consente di ottenere fattori di riduzione del problema superiori a 100, se paragonati al classico approc-

⁷⁸ Ad esempio, VNoise™ di STS si interfaccia con Nastran™, Ansys™, Femap™, Patran™, Fieldview™.

cio BEM⁷⁹. Per tale motivo, Sysnoise™ 5.5 di LMS International incorpora tale metodo in ibridazione con gli elementi di contorno per ottenere uno strumento più performante in termini di velocità di calcolo. Resta inteso che tutti i motori di calcolo, sia BEM che ATV, necessitano di una competenza estremamente avanzata sia nel campo della modellazione che in quello della fisica della trasmissione del suono.

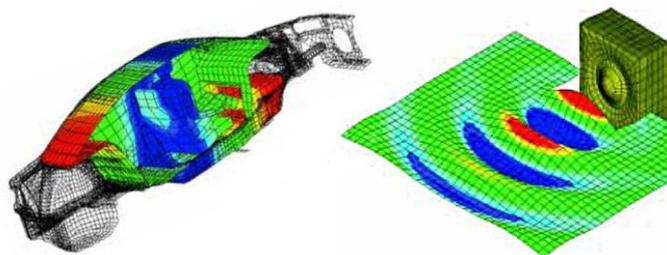


Figura 1-10 Trasmissione delle vibrazioni e, a destra, del suono con BEM

1.3.2 I metodi di analisi a multi criteri

Per numerosi anni l'ottimizzazione lineare a singolo criterio è stato l'unico modello di approccio per la soluzione dei problemi gestionali e decisionali. Questa tecnica si basa sul principio che la realtà sia perfettamente modellabile, che il modello che ne consegue è perfettamente razionale, e che, dati certi vincoli al contorno, tra le infinite soluzioni la migliore è quella che massimizza/minimizza un particolare valore espresso da una funzione matematica che descrive il comportamento della realtà analizzata.

L'analisi a multi criteri, o metodo multicriteria, invece, è un sistema di valutazione basato sull'osservazione del fatto che un problema complesso sia sufficientemente articolato da non consentire l'individuazione di un unico obiettivo, oppure la sua perfetta quantificazione, o la definizione dei vincoli, o la perfetta modellazione della realtà. Questo approccio scompone il problema in fattori più semplici, detti *criteri*, che lo descrivono esaustivamente, e che possono essere analizzati singolarmente. I criteri, quindi, «sono l'aspetto misurabile del giudizio al quale le alternative sono sottoposte»⁸⁰; più precisamente, un criterio è una funzione reale tale che rende significativo comparare diverse alternative, rispetto ad un particolare punto di vista, sulla sola base dei valori che detta funzione assume rispetto ad esse. Criteri, attributi ed indicatori sono tra loro sinonimi, e misurano quantitativamente/qualitativamente le prestazioni o gli impatti delle diverse soluzioni. L'analisi multicriteria si distingue da quella *multi obiettivi*, in quanto nella prima esiste un numero finito di alternative, mentre nella seconda questo numero è illimitato. La limitatezza delle alternative consente la costruzione della *matrice di valutazione* $a_{n,m}$ in base alla quale, formalmente, il problema decisionale può essere rappresentato dalla relazione:

$$\begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \\ \dots \\ A_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{1,1} & a_{1,2} & \dots & a_{1,m} \\ a_{2,1} & a_{2,2} & \dots & a_{2,m} \\ a_{3,1} & a_{3,2} & \dots & a_{3,m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n,1} & a_{n,2} & \dots & a_{n,m} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ \dots \\ C_m \end{bmatrix},$$

⁷⁹ Cfr. C. McCulloch, M. Tournour, P. Guisset, *Modal Acoustic Transfer Vectors make Acoustic Radiation Models Practical for Engines and Rotating Machinery*.

⁸⁰ Come definite in H. Voogd, *Multicriteria Evaluation for Urban and Regional Planning*, Pion, Londra 1983.

dove $A_1, A_2, A_3, \dots, A_n$, rappresentano le valutazioni delle diverse soluzioni, mentre C_1, C_2, \dots, C_m sono i differenti indicatori adottati. Per ricavare la matrice \tilde{a} occorre:

- determinare le funzioni (qualitative o quantitative) che esprimono i criteri stabiliti, individuare il valore che assumono per ogni coppia criterio/alternativa e raccogliere i risultati in una matrice detta *score matrix*;
- eseguire la *normalizzazione* della matrice, e cioè rendere omogenei i valori delle diverse funzioni che esprimono i criteri, attraverso relazioni matematiche che operano sui diversi elementi della *score matrix*, ovvero assegnando un *punteggio di merito* compreso in un intervallo prefissato (di solito tra 0 e 1);
- assegnare i *pesi* ai differenti criteri o direttamente con una scala di punteggio percentuale, o attraverso una *matrice dei confronti a coppie*, nella quale ogni elemento ij rappresenta il *tasso marginale di sostituzione* del criterio i nei confronti del criterio j , grazie alla quale i pesi finali vengono determinati con metodi matematici di aggregazione.

A questo punto, il generico elemento a_{ij} è calcolato come prodotto dell'omologo normalizzato per il peso stabilito; la somma di tutti i termini di una riga i rappresentano la valutazione dell'alternativa A_i , ottenuto utilizzando il metodo della *somma pesata*; in alternativa, è possibile anche adoperare altri sistemi di aggregazione, come la *concordanza* e la *discordanza*, che rappresentano modi più inconsueti di misura.

1.3.2.1 GB Tool e Protocollo Itaca

Il GB Tool, elaborato dal *Green Building Council*, ed il Protocollo ITACA, sviluppato dalla regione Emilia Romagna, sono due metodi multicriteriali realizzati per stimare il livello di qualità ambientale di un edificio⁸¹. Entrambi impiegano la somma pesata in base ad un sistema ponderale che viene suddiviso in macro aree, ognuna delle quali controlla un aspetto rilevante nella valutazione; in particolare la *Indoor Environmental Quality (Qualità dell'ambiente interno)* raggruppa i criteri che misurano il benessere ambientale, articolati in sottocriteri, illustrati nella Tabella 1-2⁸².

È interessante notare che il protocollo di GB Tool prevede la partecipazione di diversi team ai quali è assegnata l'implementazione di uno dei diversi fogli di lavoro; tra questi, la cartella *Vote* raccoglie i pesi dei sottocriteri, espressi in termini percentuali, che i gruppi di valutazione stabiliscono di volta in volta. Ne deriva che il sistema è flessibile, perché è possibile modificare i valori inseriti ottenendo immediatamente la nuova valutazione; ma di contro il metodo non esegue una valutazione ponderale dell'intero intervento, perché non fissa i rapporti tra i sette differenti criteri⁸³.

⁸¹ Per informazioni di dettaglio, *cfr.* D. Francese, *Architettura e vivibilità*, *op. cit.*.

⁸² GB Tool utilizza per tali sottocriteri il termine *clusters*; ITACA indica i criteri come *Aree di valutazione* ed i sotto criteri come *Categorie di requisito*. Rispetto alle indicazioni di UNI, anche se espressamente riferiti a condizioni *indoor*, i due criteri - italiano ed internazionale - corrispondono alla classe di esigenza "Benessere", ed i sotto criteri alle diverse esigenze (Tabella 1-1), ad eccezione della "Salubrità" e del "Benessere tattile" che qui non vengono considerate. Si noti, inoltre, che "Qualità dell'aria" in ITACA comprende anche l'inquinamento elettromagnetico.

⁸³ Oltre al già citato *Indoor Environmental Quality* gli altri criteri sono: *Resource consumption, Loadings, Service Quality, Economics, Managment, Commuting Transport*. Nel Protocollo ITACA si distinguono: *Qualità ambientale esterna, Consumo delle risorse, Cari-*

<i>GB Tool</i>	<i>Protocollo Itaca</i>
<u>Indoor Environmental Quality</u>	<u>Qualità dell'ambiente interno</u>
<u>Air Quality and Ventilation</u>	<u>Qualità dell'aria</u>
<u>Electro-Magnetic Pollution</u>	
<u>Thermal comfort</u>	<u>Comfort termico</u>
<u>Daylighting and Illumination</u>	<u>Comfort visivo</u>
<u>Noise and Acoustics</u>	<u>Comfort acustico</u>

Tabella 1-2 Sotto criteri in cui si articolano le categorie relative al benessere nei metodi GB Tool e Protocollo Itaca

Sub clusters e sub-sub clusters hanno invece pesi predeterminati, riportati all'interno del foglio *Weight*; ne consegue che, nel metodo GBTool, questi rapporti interni ai clusters sono indipendenti dal caso da valutare.

Nel Protocollo ITACA i gruppi di lavoro determinano il peso sia dei criteri che dei sotto-sotto criteri: ne consegue che questo metodo consente di effettuare un controllo tra tutte le diverse aree di valutazione, fornendo nel contempo anche un parametro globale dell'intero progetto. Scelti dei parametri considerati rappresentativi del fenomeno, la valutazione avviene confrontandone i valori - ottenuti usando tecniche esterne al metodo - con dei riferimenti normativi, ed assegnando un punteggio che è funzione della distanza relativa che si riscontra. Questa strategia, comune a tutti i metodi multicriteria, è efficace nella misura in cui le variabili scelte siano sufficientemente indicative della realtà che descrivono, ma anche per la semplicità di uso da parte degli utilizzatori. GBTool richiede di inserire otto parametri, alcuni dei quali sono qualitativi e scelti in base al giudizio del progettista; ITACA ne richiede quattro - tutti quantitativi - preferendo un approccio sicuramente più informato alla semplicità che alla precisione. È possibile considerare che questi due metodi hanno il vantaggio di essere flessibili nella valutazione, perché consentono di modificare direttamente i pesi, e di rapida implementazione, in quanto richiedono di definire un numero ridotto di variabili ed attributi; al contrario, proprio la semplicità dei sistemi non consente di ottenere valutazioni precise del comfort degli ambienti, che necessita di algoritmi più complessi e di un numero di indicatori sicuramente maggiore.

1.3.2.2 HQE

Il metodo francese di *Haute Qualité Environnementale* ha lo scopo di «massimizzare la qualità ambientale nelle opere di costruzione»⁸⁴ attraverso un procedimento integrato nel processo edilizio durante fase di *programma tecnico dettagliato*, equivalente al nostro progetto esecutivo. A tale scopo, il quadro ambientale viene approcciato seguendo quattro diversi aspetti, che sono:

- il criterio dei *flussi del sistema naturale ed economico*, che considera il prodotto edilizio come un insieme in contatto con l'ambiente esterno con il quale scambia materia ed energia; ciò consente di mettere in evidenza le dinamiche di prelievo delle risorse, immissione dei rifiuti, riciclo e riutilizzo, circolarità dei fenomeni naturali;
- il criterio dei *comparti ambientali*, che suddivide l'habitat in differenti sistemi, quali il suolo, l'acqua, l'aria, il clima, la flora, la fauna, il paesaggio, le condizioni igrotermiche, acustiche e visive, la qualità dell'aria, la radioattività ed i campi elettromagnetici; questo permette di utilizzare

chi ambientali, Qualità dell'ambiente interno, Qualità del servizio, Qualità della gestione, Trasporti. Si noti che la prima classe di requisito si riferisce ai livelli di inquinamento presenti all'esterno dell'edificio, per cui non riguarda il comfort ma la salute degli utenti.

⁸⁴ Cfr. D. Francese, *Architettura e vivibilità*, op. cit., pag. 33.

un approccio per agenti in grado di studiare i fenomeni di interazione tra ambiente ed uomo;

- il criterio dei *punti di vista*, ecocentrico ed antropocentrico; in tal modo si introduce il concetto di *bersaglio*, che consente di separare le azioni che hanno effetto sull'ambiente rispetto a quelle che colpiscono l'uomo;
- il criterio della *scala dell'impatto*, globale e locale, che suddivide gli effetti in funzione della loro ricaduta in termini spaziali.

Domaine d'exigences: produzione di un ambiente interno soddisfacente

Famille: confort

<i>Cibles</i>	<i>Exigences</i>	<i>Indicateurs opérationnels</i>	
Comfort igro-termico	Inverno e media stagione	Temperatura media	
		Percentuale di locali che hanno una temperatura media ottimale	
		Impiego di dispositivi di termoregolazione	
		Asimmetria radiante	
		Gradiente verticale di temperatura	
		Pavimento freddo	
		Velocità dell'aria	
		Umidità dell'aria	
		Estate in edifici non climatizzati	Percentuale di superficie vetrata
			Fattore solare delle aperture e protezioni
	Utilizzo di elementi ombreggianti		
	Ottimizzazione della ventilazione		
	Isolamento termico delle pareti		
	Inerzia termica		
	Impiego di impianti a bassa emissione di calore		
	Soluzioni adottate per assicurare il comfort termico dei locali esposti al rumore (con infissi chiusi)		
	Temperatura massima durante le giornate calde		
	Percentuale di locali che hanno una temperatura massima ottimale		
	Estate in edifici climatizzati	Velocità dell'aria	
		Temperatura effettiva, valutata considerando l'umidità	
Soluzioni adottate per favorire temperature notturne più fresche			
Scarto massimo tra temperatura esterna ed interna			
Velocità dell'aria			
Soluzioni adottate per regolare l'umidità relativa			
Temperatura effettiva, valutata considerando l'umidità			
Impiego di dispositivi di termoregolazione			
Comfort visivo		Esposizione ottimale per la luce naturale	Percentuale dei locali che dispongono di luce naturale
			Fattore di luce diurna
	Percentuale di locali con fattore di luce diurna sufficiente		
	Soluzioni adottate per assicurare un buon equilibrio luminoso		
	Sistema di illuminazione artificiale	Soluzioni adottate per evitare l'abbagliamento	
		Determinazione dell'illuminamento ottimale, secondo l'uso	
		Coefficiente di uniformità	
		Soluzioni adottate per evitare l'abbagliamento	
		Soluzioni adottate per assicurare un buon equilibrio luminoso	
		Temperatura di colore	
Relazione con l'esterno	Indice di resa dei colori IRC		
	Soluzioni adottate per la regolazione luminosa		
	Qualità della vista esterna		
	Percentuale dei locali che dispongono di una buona visuale		
Comfort acustico	Soluzioni spaziali	Qualità dell'illuminamento esterno	
		Distribuzione della massa in funzione delle fonti esterne	
		Disposizione attigua di locali simili sullo stesso piano	
	Isolamento acustico	Disposizione relativa dei diversi locali	
		Rispetto dei limiti di rumore previsti per legge	
		Isolamento acustico della facciata	
		Soluzioni adottate contro le fonti di rumore esterne	
		Indice di riduzione sonora delle finestre	
		Isolamento acustico standardizzato ponderato globale	

continua

	Determinazione dei limiti di rumore residuo da urti
	Determinazione dei limiti di rumore degli impianti
Correzione acustica dei locali	Percentuale dell'area di assorbimento equivalente rispetto alla superficie del locale (locali comuni degli alloggi)
	Studio acustico specifico (auditori, sale riunioni)
	Tempo di riverberazione
	Tempo di decadimento
	Decadimento spaziale
	Determinazione dei limiti di rumore di fondo per gli uffici
	Soluzioni adottate per ottenere il comfort acustico negli uffici
	Determinazione dei limiti di legge (edifici non residenziali)
Protezione edifici vicini	Rumore residuo dell'ambiente esterno
	Piano di esigenza in funzione del tipo di locale

Tabella 1-3 Articolazione del metodo HQE per *cibles, exigences e indicateurs opérationels*

In base a questi, il metodo HQE utilizza un approccio che individua due *domaines d'exigences*: impatto sull'ambiente esterno e produzione di un ambiente interno soddisfacente, i quali a loro volta si articolano in *familles* (eco costruzione ed eco gestione per il primo dominio, comfort e salute per il secondo) e questi in *cibles*. Appare quindi immediato correlare i domini con le classi di esigenza, ed i *cibles* con le esigenze, mentre le famiglie possono assimilarsi agli effetti, così come proposto nella Tabella 1-1, anche se con il termine di *exigences* la procedura francese indica le categorie con le quali si scompongono i *cibles*, che sono poi suddivise in *indicateurs opérationels*. Limitando alla famiglia "Comfort", ed escludendo quello olfattivo, i *cibles*, le *exigences* e gli *indicateurs* sono raccolti nella Tabella 1-3⁸⁵.

Il quadro teorico è quindi molto articolato, e si delineano diversi aspetti estremamente interessanti nella classificazione dei criteri; in particolar modo quello dei punti di vista e della scala dell'impatto consente di specificare in modo dettagliato gli effetti sul bersaglio e la dimensione spaziale dei fenomeni, che riveste una grande importanza nella valutazione del comfort. Anche gli indicatori impiegati sono numerosi (per il comfort se ne contano 61), ma purtroppo molti di essi hanno scale di valutazione qualitative in quanto, anche impiegando sinergicamente la legislazione francese, la normativa e le indicazioni della Comunità europea, non si riesce ad avere un corpo tecnico esaustivo che consenta di eseguire operativamente la misura di tutti i parametri in gioco; per questo motivo sono ancora in corso di sviluppo procedure in grado di consentire la corretta misura di tutte le variabili considerate.

1.3.2.3 Metodo VAde

Il metodo di *Valutazione Ambientale degli Edifici*, o VAde, si pone lo scopo di fornire una procedura, applicabile in qualsiasi fase del processo edilizio⁸⁶, in grado di stimare la qualità di una costruzione dal punto di vista dell'eco-sostenibilità e della bio-compatibilità. Nato da un precedente studio sul benessere negli interventi di recupero⁸⁷, rielaborato in modo da fornire uno schema teorico completo sul quale sviluppare le metodologie di dettaglio per eseguire la stima, si articola in livelli, il primo dei quali (*bersa-*

⁸⁵ La traduzione dal francese è dell'A.. Si è preferito qui non utilizzare una traduzione letteraria degli indicatori operazionali.

⁸⁶ L'obiettivo è fornire un metodo applicabile alla progettazione, esecuzione, manutenzione, riuso e restauro degli edifici; per maggiori dettagli, cfr. D. Francese, *Architettura e vivibilità*, op. cit., cap.3.

⁸⁷ Cfr. Francese D., *Il benessere negli interventi di recupero edilizio*, Diade, Padova 2002.

glio) distingue gli effetti, alle diverse scale⁸⁸, diretti verso l'uomo e verso l'ambiente; i bersagli si dividono quindi in *classi di vivibilità* e queste in *esigenze*, ognuna delle quali ha un proprio peso, necessario ad eseguire la somma ponderale. I pesi indicati sono modificabili allo scopo di adattare la matrice di calcolo alle diverse esigenze.

<i>Bersaglio</i>		<i>Classe di vivibilità</i>		<i>Esigenza</i>			
Bio-compatibilità	55%	Salute	55%	Salubrità	36%		
				Qualità ergonomica	34%		
				Qualità psico-sociale	30%		
		Benessere	45%			Benessere sonoro	24%
						Benessere visivo	25%
						Benessere igrotermico	28%
						Benessere tattile	23%
Eco-sostenibilità	45%	Mitigazione	55%	Protezione ecosistemi	24%		
				Assetto del territorio	25%		
				Limitazione effetto serra	25%		
				Riduzione dell'ozono	26%		
		Risparmio	45%			Risorse minerali	35%
						Risorse energetiche	31%
						Deforestazione	34%

Tabella 1-4 Articolazione del metodo VAdE per bersagli, classi di vivibilità ed esigenze

Confrontando la struttura del VAdE con la Tabella 1-1, si può verificare che il bersaglio *Bio-compatibilità* coincide con la classe di esigenza "Benessere"; le *classi di vivibilità* corrispondono agli effetti, ed in particolare "Comfort" equivale a *Benessere*. Le *Esigenze* coincidono anche terminologicamente con quelle qui proposte anche se occorre notare che in questo metodo trova posto la *Qualità psico-sociale* che viene valutata in modo esplicito. Le *Esigenze* si suddividono in *parametri* ed *indicatori*, che, limitatamente al Benessere, sono riportati nella Tabella 1-5.

Il VAdE è un metodo che tiene conto di numerosissimi parametri (se ne richiedono novantanove per il solo Benessere) perché approccia il problema della valutazione in modo completo, fornendo nel contempo uno schema teorico coerente all'interno del quale collocare i diversi aspetti che sono coinvolti, riconoscendo tra l'altro in modo esplicito l'esigenza della *Qualità psico-sociale*. È anche vero però che molti parametri devono a loro volta essere reperiti o con il monitoraggio diretto o attraverso adeguati programmi di calcolo, la qual cosa ne accresce la complessità e la necessità di rivolgersi a gruppi di lavoro nei quali siano presenti esperti nelle diverse discipline.

<i>Bersaglio: Bio-compatibilità Classe di vivibilità: Benessere</i>			
<i>Esigenza</i>	<i>Parametro</i>	<i>Indicatore</i>	
Benessere igrotermico	Temperatura	Temperatura esterne invernali	
		Temperatura esterne estive	
		Temperatura interne invernali	
		Temperatura interne estive	
	Umidità	Umidità esterna	Umidità esterna invernale
			Umidità esterna estiva
		Umidità interna	Umidità interna invernale
			Umidità interna estiva
	Ventilazione	Differenza tra le velocità dell'aria interna ed esterna	Differenza tra le velocità medie interna ed esterna
			Zone dell'edificio colpite dai venti in estate
			Zone dell'edificio colpite dai venti in inverno
	Soleggiamento	Rapporto tra la temperatura interna e media radiante	

continua

⁸⁸ Le scale di analisi sono: *Globale, Territoriale, Regionale, Urbana, Edificio, Unità tecnica, Prodotto, Materiale*.

		Rapporto tra la temperatura radiante e l'accesso solare	
		Rapporto sole/ombra	
		Percentuale facciate soleggiate in inverno	
		Percentuale facciate soleggiate in estate	
		Esposizione superfici vetrate	
Piovosità		Giorni piovosi e mm di pioggia mensili	
		Umidità interna nei giorni piovosi	
		Influenza della pioggia sul comfort invernale	
		Influenza della pioggia sul comfort estivo	
Altitudine		Zone dell'edificio interessate dall'umidità	
		Rapporto tra umidità relativa e temperatura	
		Sensazioni soggettive del rapporto tra umidità e temperatura	
Latitudine		Condizione soggettiva di comfort invernale	
		Condizione soggettiva di comfort estivo	
		Influenza della latitudine sulle temperature di benessere	
Unità tecniche		Fenomeni di accumulo termico	
		Resistenza termica del sistema	
		Ombre proprie e portate in inverno	
		Ombre proprie e portate in estate	
		Confronto tra guadagno solare e temperatura media interna	
		Rapporto tra aree opache ed aree vetrate dell'involucro	
		Flusso solare assorbito	
		Traspirabilità	
Materiali		Conducibilità	
		Calore specifico	
		Emissività	
		Permeabilità	
Unità ambientali		Rapporto superficie/volume	
		Rapporto superficie pavimento/superficie involucro	
		Rapporto superficie pavimento/superficie apribile	
Benessere visivo	Fonti di luce naturale	Provenienza	
		Illuminamento	
		Latitudine locale	
			Nuvolosità locale
		Unità tecniche	Dimensione aperture
			Posizione delle aperture
			Orientamento finestre
			Altezza
		Schermi	Dimensione ostacoli esterni
			Dimensione ostacoli interni
			Colore ostacoli esterni
		Utenza	Età dell'utenza
			Salute psicofisica
			Sesso
			Durata intrattenimento
		Attività	Periodo intrattenimento
			Riposo, attesa, circolazione
			Lavoro, studio, ricevimento, sport
			Concentrazione normale
		Materiali	Concentrazione elevata
	Colore pareti e soffitto		
	Colore pavimento		
	Proprietà assorbenti o riflettenti		
		Consistenza superficiale liscia o ruvida	
	Unità ambientali	Configurazione	
		Volume	
		Daylight factor	
Benessere sonoro	Fonti di rumore	Provenienza	
		Qualità	
		Livello di intensità sonora	
		Utenza	Durata
			Età dell'utenza
		Salute psicofisica	
		Sesso	

continua

	Durata intrattenimento
	Periodo intrattenimento
Schermi	Dimensione ostacoli esterni
	Localizzazione ostacoli esterni
	Potere fono isolante degli ostacoli esterni
Attività	Tempo di riverberazione (riposo)
	Tempo di riverberazione (svago)
	Tempo di riverberazione (concentrazione)
	Tempo di riverberazione (ascolto parola)
	Tempo di riverberazione (musica)
Unità tecniche	Qualità dei materiali componenti
	Spessori degli strati
	Spessore camere d'aria
	Posizione camere d'aria
	Localizzazione all'interno degli spazi
Materiali	Fonoassorbimento
	Fonoisolamento
	Spessori
	Resistenza superficiale
	Localizzazione
Unità ambientali	Volumi degli spazi
	Rapporto geometria/volume

Tabella 1-5 Parametri ed indicatori del benessere nel metodo VAdE

1.4 Ipotesi di un approccio integrale

Le complicate interazioni che avvengono tra un utente e lo spazio fisico che lo circonda, e tra quest'ultimo ed i vari elementi che lo delimitano e lo caratterizzano fisicamente e psicologicamente, sono estremamente difficili da analizzare e comprendere. Per questo motivo si preferisce molto spesso adottare un sistema di valutazione *deterministico*, e cioè basato sullo studio dei singoli fattori che compongono il comfort. In altre parole, si opera un'artificiosa scomposizione del problema, ritenendo che la somma delle singole soluzioni consenta di ottenere quella generale. Questo però è vero soltanto in parte: un *sistema complesso* (e la percezione del benessere è sicuramente uno di questi) è infatti composto da elementi tra loro variamente connessi, e non semplicemente giustapposti, e sono proprio le connessioni a caratterizzare il sistema⁸⁹. Nella scomposizione deterministica, almeno una parte di queste relazioni si perde definitivamente; al contrario il metodo *olistico* osserva il fenomeno ad un livello più alto proprio per cogliere le interrelazioni tra i diversi aspetti, anche se perde di precisione nella valutazione accurata delle singole parti. Un approccio *integrale* vuole quindi cogliere l'occasione di stabilire la giusta scala di osservazione, che sappia restituire una valutazione sufficientemente *olistica* del comfort, attraverso sia l'analisi dei singoli fenomeni che dei rapporti di interdipendenza tra questi.

L'opportunità di realizzare metodi in grado di eseguire contemporaneamente valutazioni relative alle diverse esigenze di *benessere* è testimoniata dalla crescente diffusione in ambito simulativo/numerico di software capaci di condividere ampi segmenti di implementazione, sia impiegando comuni formati di importazione ed esportazione che utilizzando il

⁸⁹ Nella *teoria della complessità* si studiano i modi per semplificare i sistemi complessi, e cioè, mantenendo inalterato il livello prestazionale finale, come diminuire il numero degli elementi attraverso l'incremento dell'efficienza delle connessioni. Cfr. N. Pippinger, *La teoria della complessità*, in *Le Scienze. Quaderni n.14. Matematica e calcolatore*, Le Scienze, Milano 1984.

medesimo preprocessore⁹⁰. Non è un caso che Autodesk™ abbia recentemente acquistato Ecotect™, programma in grado di modellare geometricamente gli ambienti, eseguire analisi solari e meteorologiche, e restituire parametri fisici e diagrammi relativi all'illuminamento, ai tempi di riverberazione, alla distribuzione delle temperature interne ed esterne. Ma, alla luce di quanto verificato precedentemente, un metodo integrale propriamente detto deve tener conto di tutti gli aspetti che sono coinvolti nel benessere, fisici, fisiologici e psicologici, ivi comprese le iterazioni che avvengono tra gli utilizzatori e l'ambiente. Una procedura siffatta corre però il rischio di essere notevolmente complessa, e di conseguenza difficilmente applicabile nella pratica professionale: soprattutto nelle prime fasi di progettazione - durante le quali difficilmente è possibile dedicare lungo tempo alla implementazione necessaria per valutare le diverse soluzioni - occorre disporre di strumenti estremamente agili ed affidabili in grado di restituire in tempi brevi una valutazione probabilistica del livello di comfort raggiunto. Per fare questo, è fondamentale stabilire una gerarchia di obiettivi allo scopo di ottenere uno strumento semplice, di facile e breve compilazione, ma che sia capace di tener conto di quei meccanismi complessi che si instaurano tra l'ambiente e l'utilizzatore.

Alla luce di quanto analizzato finora, sembra ragionevole affermare che:

- la norma mette a disposizione, anche se in modo non proprio organico, diverse procedure in grado di calcolare i parametri che concorrono a configurare lo spazio fisico, all'interno del quale gli utenti dell'ambiente costruito oggetto della stima vengono a contatto;
- alcuni segmenti di calcolo troppo complessi o che necessitano dell'impiego di softwares molto specifici possono essere meccanizzati attraverso l'impiego di fogli di calcolo o di database;
- l'interazione tra le diverse esigenze e le procedure di simulazione dell'adattività delle persone possono essere ottenuti attraverso l'impiego di metodi di valutazione multicriteria, anch'essi implementabili in fogli di calcolo o database.

È possibile quindi pensare alla possibilità di far convergere sinergicamente i differenti pregi che ognuno degli approcci qui analizzati ha mostrato di possedere in modo da costruire un metodo integrale che abbia l'obiettivo di valutare il comfort termo-igrometrico, visivo ed uditivo, tenendo presente sia i meccanismi di adattività che gli elementi di stress sociali ed economici attraverso un protocollo che sia scientificamente condivisibile. Dato che il target principale consiste nella valutazione del comfort, è rispetto a tale esigenza che deve essere misurata la reale efficacia del metodo; tutti gli indicatori dovranno essere scelti allo scopo di poter eseguire nel modo più attendibile la misura delle variabili, ivi comprese le distribuzioni probabilistiche legate alla composizione demografica della popolazione e gli agenti stressori che influenzano la percezione del benessere.

La semplificazione, necessaria per assicurare l'efficacia del metodo, dovrà essere perseguita attraverso diversi strumenti, quali:

- impiego di banche dati di facile accesso e consultazione, redatte ed aggiornate da enti scientificamente accreditati;
- utilizzo di metodi e softwares di elevata diffusione o accessibilità;
- riduzione del numero e tipo di dati in ingresso;

⁹⁰ È il caso di Ansys™ che ha elaborato un preprocessore comune a differenti kernel di calcolo fisico.

- creazione di profili demografici e tipologie costruttive standard, allo scopo di consentire una valutazione anche in assenza di dati specifici.

Nel Capitolo 2 si svilupperanno quindi i metodi necessari a soddisfare tali obiettivi; il Capitolo 3 invece verificherà il livello di attendibilità del metodo di valutazione attraverso l'analisi sui casi studio.

2 *Sviluppo di un nuovo metodo di valutazione*

2.1 **Definizione dei dati**

Come già visto, i metodi di valutazione richiedono l'inserimento dei dati in ingresso, sia prelevati da tabelle sia determinati con campagne di misurazione; altre volte sono richieste variabili e attributi individuabili solo per via indiretta, attraverso l'elaborazione da parte dell'utente: in questo caso è implicitamente necessaria una competenza specifica del problema, che non sempre fa parte del bagaglio culturale generalmente posseduto dai tecnici. La possibilità di *meccanizzare* le operazioni attraverso l'impiego di softwares consente però di cogliere l'opportunità di rendere più semplice il prelievo dei dati perché dà modo di trasferire alla *macchina*, grazie ad un protocollo informatizzato (*sistema esperto*), l'onere di eseguire le trasformazioni necessarie alla definizione degli elementi richiesti. In tal modo la competenza di cui si necessita non è più relativa alla valutazione in sé, bensì limitata all'uso dei programmi adoperati nel sistema ed alla capacità di reperimento delle condizioni al contorno. Occorre quindi stabilire le attitudini minime che caratterizzano l'utente *standard* a cui il metodo si rivolge, allo scopo di individuare le caratteristiche dei dati, il numero ed il tipo di algoritmi necessari e le modalità di organizzazione dei risultati al fine di facilitarne la lettura e la comprensione. La procedura che si vuole qui proporre si rivolge quindi a tecnici in grado di:

- accedere a dati disponibili direttamente su Internet attraverso i siti ufficiali di Enti pubblici e privati;
- leggere e prelevare informazioni da cartografie e piani di organizzazione o tutela del territorio;
- impiegare strumenti computerizzati di georeferenziazione;
- utilizzare strumenti computerizzati di disegno CAD;
- inserire notizie all'interno di database o fogli di calcolo.

Per rendere più agevole il reperimento e l'organizzazione dei dati, essi vanno suddivisi a seconda del *tipo* e della *distribuzione*, quest'ultima scomponibile in *spaziale* e *temporale*.

La divisione per *tipo* consente di inquadrare il problema in funzione dei *requisiti* che gli elementi del sistema edilizio devono soddisfare, e cioè:

funzionale-spaziale, ambientale, tecnologico, tecnico, operativo, di durabilità, di manutenibilità¹. Raggruppandoli e rielaborandoli per semplicità in tre categorie, è possibile distinguere:

- i dati ambientali, tra i quali si annoverano il clima meteorologico ed acustico, la distribuzione demografica, le condizioni psicosociali ed economiche;
- i dati funzionali-spaziali, all'interno dei quali si distinguono le diverse attività svolte, la loro distribuzione nello spazio e nel tempo, e le caratteristiche morfologiche;
- i dati tecnologici, che raggruppano le prestazioni tecniche, operative e di decadimento prestazionale dei diversi elementi tecnici e dei sistemi edilizi coinvolti, ivi comprese le caratteristiche dei materiali impiegati.

Ordinare le informazioni secondo tale logica permette di esprimere più facilmente il livello prestazionale ottenibile, e di conseguenza il tipo di *qualità*, sia dei singoli elementi che dell'intero sistema costruito.

Tutti i dati possono essere distribuiti sia spazialmente che temporalmente, e rispetto a tali dimensioni possono variare di posizione e di intensità²; per questo motivo occorre classificarli introducendo delle *scale di osservazione* che consentono di semplificarne il reperimento e l'ordinamento. Vista la possibilità di impiegare i piani di regolamentazione e tutela come fonte di informazione, può essere opportuno usare le suddivisioni tipiche delle scale territoriali di riferimento, anche se queste seguono un criterio di frammentazione di carattere geografico-amministrativo: nazionale, regionale, provinciale, urbano, circoscrizionale. A ciò si deve aggiungere che, quando si valuta il benessere, occorre introdurre livelli di osservazione più raffinati rispetto a quelli impiegati negli strumenti di pianificazione: edilizio e di unità ambientale, l'ultima delle quali viene a volte ulteriormente suddivisa in clusters. È quindi necessario fare uso delle seguenti scale³:

- la scala globale, dove si raggruppano i dati a livello mondiale o nazionale, come la georeferenziazione del sito, la tipologia di clima meteorologico, la posizione apparente del sole (per la scala nazionale si può considerare un raggio medio di circa 300 km);
- la scala territoriale, dove si annoverano i dati che sono distribuiti sulla porzione di territorio che interagisce direttamente con gli utenti, e che raccoglie la scala regionale e quella provinciale (con un'estensione media compresa tra 3.000 e 15.000 km² ed un raggio di 30÷70 km);
- la scala urbana, che considera quelle condizioni peculiari dell'ambiente antropizzato tali da modificare le caratteristiche generali, e che comprende la dimensione urbana e circoscrizionale (di area media pari a circa 40 km² ed un raggio di 3,5 km);
- la scala edilizia, dove sono contemplati i dati relativi al sistema edilizio ed

¹ Cfr. UNI 10838, *op. cit.*.

² Naturalmente ciò non esclude l'esistenza di dati che sono indifferenti ad una o entrambe le dimensioni di classificazione.

³ Anche se non è possibile dare un'estensione precisa ad ognuna delle scale elencate, è opportuno comunque dare un'indicazione di riferimento. Queste possono essere ottenute calcolando le superfici medie di regioni, province e comuni dividendo l'area dell'intera nazione (301.302 km²) per il loro numero (venti, centodieci e ottomilacento rispettivamente); da queste si può determinare il raggio medio utilizzando la formula $r_{med} = \sqrt{A_{med}/\pi}$; la stessa relazione è stata impiegata per la determinazione del raggio medio a scala nazionale.

ai fenomeni di dettaglio che possono verificarsi per particolari costruzioni e/o per la presenza di elementi limitrofi con i quali si correla (con una superficie massima di riferimento di circa 30.000 m² ed un raggio di 100 m);

- la scala di unità ambientale, nella quale si raggruppano i dati relativi alla porzione di spazio a diretto contatto con gli utenti (che si relaziona con una zona di circa 300 m² ed un raggio di 10 m).

<i>Dati</i>	<i>Scala</i>	<i>Tipo</i>	<i>Utilizzo</i>	<i>Procedura</i>
Individuazione della regione	T	F/S	Determinazione della composizione demografica e socioculturale dell'utenza	N
Posizione geografica	G	F/S	Stima del clima meteorologico	N/O
Orizzonte geografico	T	F/S	Stima del clima meteorologico	N
			Stima del microclima luminoso	N/O
Fascia di antropizzazione	T	F/S	Stima del clima meteorologico	O
			Stima del microclima acustico	O
Posizione delle infrastrutture	T, U	F/S	Stima del clima acustico	N/O
Sky line	U	F/S	Stima del microclima termo igrometrico	N/O
			Stima del microclima luminoso	N/O
Invasi e fronti	E	F/S	Stima del microclima termo igrometrico	O
			Stima del microclima luminoso	O
			Stima del microclima acustico	O
Emergenze funzionali	E	F/S	Stima del microclima acustico	O
Prospetti	E	F/S	Stima del microclima termo igrometrico	N/O
			Stima del microclima luminoso	N/O
Abaco degli elementi tecnici	E	T	Stima del microclima termo igrometrico	N
			Stima del microclima luminoso	N
			Stima del microclima acustico	N
Abaco delle unità ambientali	UA	A	Stima del microclima termo igrometrico	N
			Stima del microclima luminoso	N
			Stima del microclima acustico	N
Modelli di comportamento	UA	F/S, A	Stima del comfort termo igrometrico	N/O
			Stima del comfort luminoso	N/O
			Stima del comfort acustico	N/O

Scala: G = globale; T = territoriale; U = urbana; E = edilizia; UA = di unità ambientale

Tipo: A = ambientale; F/S = funzionale / spaziale; T = tecnologico

Procedura: N = già nota in letteratura; N/O = nota, con modifiche innovative; O = originale

Tabella 2-1 Dati utilizzati nel metodo

La classificazione temporale si rende necessaria quando le condizioni da analizzare tendono a trasformarsi nel tempo, sia in senso ciclico che non: il clima meteorologico, per esempio varia sia in un senso, con il susseguirsi delle stagioni per la durata totale di un anno, che nell'altro, con il naturale evolversi nell'arco di ere geologiche. Si rende così necessario definire dei periodi di riferimento, che siano coerenti sia con quelli comunemente impiegati nelle banche dati, che con i tempi fisiologici di risposta alle sollecitazioni esterne da parte degli utenti; è possibile quindi distinguere:

- il lunghissimo periodo della durata di 20 o 30 anni, sul quale si calcolano le medie delle variabili che esprimono fenomeni con un'elevata oscillazione statistica e/o che tendono a modificarsi nel corso degli anni;
- il lungo periodo della durata di un anno⁴, che rappresenta il periodo del ciclo di alternanza delle stagioni sul quale viene effettuata la valutazione;
- il medio periodo della durata di un mese, sulla base del quale vengono espressi i dati medi per effettuare la valutazione annuale;

⁴ Convenzionalmente 31.556.926 secondi. *Cfr.* UNI EN ISO 13786, *op. cit.*

- il breve periodo della durata di un giorno⁵, che rappresenta il periodo del ciclo di alternanza del dì e della notte, sul quale viene effettuata la valutazione mensile;
- il brevissimo periodo della durata di un'ora, sulla base del quale vengono espressi i dati medi per eseguire la valutazione giornaliera.

Quando possibile, i dati variabili devono essere espressi attraverso una coppia di valori, di cui il primo è la media pesata sul periodo e/o sulla scala di riferimento, ed il secondo è la sua deviazione standard⁶.

La Tabella 2-1 mostra i parametri in ingresso utilizzati nel metodo, per ognuno dei quali è specificato il tipo e la scala spaziale di osservazione. La maggior parte di essi appartiene al gruppo di dati funzionali/spaziali, in quanto quelli ambientali (climi meteorologico e acustico, microclimi termigrometrico, acustico e luminoso), così come le stime del comfort, vengono invece determinati in modo meccanico grazie alle procedure interne al protocollo⁷. Queste a loro volta possono dividersi in quelle già note in letteratura, che vengono utilizzate *tout court*, da quelle per le quali è stato necessario eseguire delle modifiche innovative allo scopo di semplificare l'implementazione, alle quali si aggiungono gli algoritmi completamente originali.

2.2 Il prelievo e l'elaborazione dei dati

2.2.1 Clima meteorologico, microclima termo-igrometrico e luminoso

Si definisce *tempo meteorologico* lo stato fisico dell'atmosfera nello spazio-tempo, mentre il *clima meteorologico* è la sua funzione di distribuzione delle probabilità nello spazio-tempo⁸: l'Organizzazione Meteorologica Mondiale (*WMO - World Meteorological Organization*) stabilisce quante e quali variabili sono rappresentative del tempo meteorologico e i periodi di osservazione in base ai quali calcolare le medie e le deviazioni, che sono:

- la temperatura di bulbo asciutto dell'aria;
- la pressione atmosferica standard;
- la pressione parziale del vapore d'acqua, ovvero l'umidità relativa;
- le precipitazioni, espresse in termini di giorni piovosi e millimetri di pioggia caduta nel periodo di misurazione;
- la velocità dell'aria, espressa in termini di direzione e velocità del vento.

Per essere attendibili, i dati devono essere prelevati per un arco di tempo di trenta anni consecutivi, in base ai quali si individuano cinque zone climatiche in funzione delle caratteristiche riscontrate⁹.

⁵ Di 86.400 secondi. *Ibidem*.

⁶ Anche il dato costante può essere espresso come coppia di valori: in questo caso la sua deviazione standard si annulla.

⁷ Cfr. cap. 4, Procedure utilizzate nel metodo, in Appendice.

⁸ Come definiti dal prof. Costante De Simone sul portale di Meteorologia dell'Aeronautica Militare Italiana (www.meteoam.it).

⁹ Si disistinguono:

Zona	Clima	Caratteristiche
Zona equatoriale. Latitudini intorno a 0°	Climi caldo-umidi	Le temperature medie annuali superano 25°C e le piogge sono abbondanti in tutte le stagioni, clima tipico delle zone a cavallo dell'Equatore
Zona subtropicale latitudini fra 0° e 23°	Climi caldo-umidi	Temperatura media compresa tra 10 e 20 °C, piogge stagionali
	Climi aridi	Le precipitazioni sono scarsissime. Forti le escursioni termiche fra il giorno e la notte

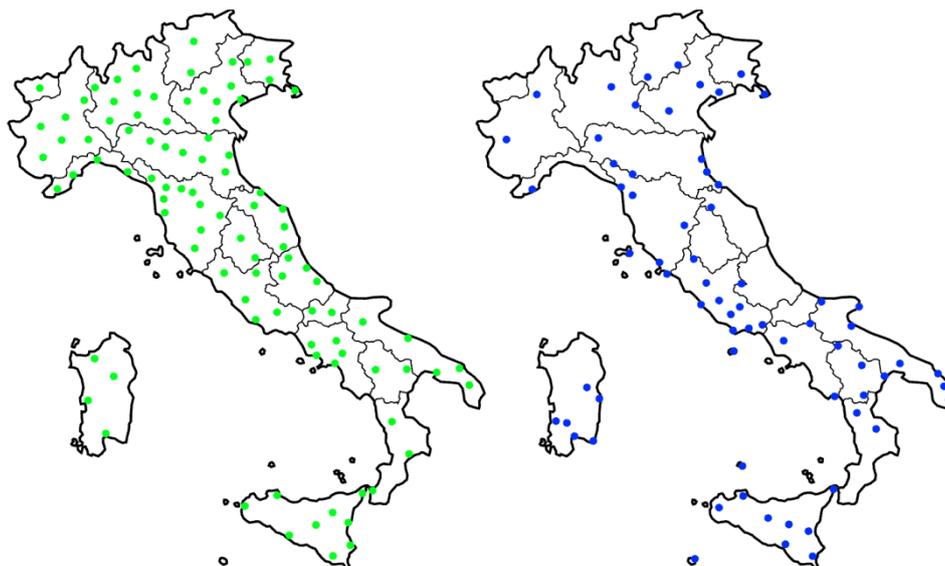


Figura 2-1 Stazioni meteorologiche riportate nella norma UNI e, a destra, nell'Atlante Meteorologico d'Italia

In Italia le fonti principali sono due: la normativa UNI¹⁰ e l'Atlante Climatico d'Italia dell'Aeronautica Militare. Esse però non sono perfettamente equipollenti: innanzitutto, i dati della norma si riferiscono alle medie calcolate sul ventennio 1971/1990, mentre l'Atlante è basato sul periodo 1971/2000; i punti di registrazione sono spesso differenti, in quanto la norma riporta dati per ogni capoluogo di provincia esistente alla data della pubblicazione (1994), mentre l'Atlante annovera stazioni dislocate in punti di interesse strategico e militare (Figura 2-1), con una conseguente maggiore diffusione sul territorio della prima rispetto al secondo. La Tabella 2-2 riporta un quadro sinottico dei dati presenti in entrambe le liste; si verifica facilmente che le informazioni sono parzialmente sovrapponibili ma, il più delle volte, esse sono tra loro complementari. Sarebbe quindi auspicabile la possibilità di adoperarle entrambe, disponendo così sia di più numerosi punti di rilevamento che di una quantità e maggiore qualità di indicazioni. Per fare ciò bisogna però verificare che i dati comuni non siano in contrasto tra loro; il confronto può essere operato tra temperature medie giornaliere,

Zona temperata latitudini comprese fra 23° e 66°	Climi temperati freddi	Temperature tra 10 e 20°C per 4-12 mesi e più fredde nel resto dell'anno in generale. Caratteristici delle alte latitudini e dominano nelle zone settentrionali e centrali dei grandi continenti, come Russia, Canada, Cile. Le temperature medie invernali si mantengono sotto 10°C, ma ci sono forti escursioni termiche da una stagione all'altra con inverni molto rigidi e le estati calde, abbondanti precipitazioni
	Climi temperati caldi	Caratteristici delle medie latitudini: bacino Mediterraneo, California e alcune regioni della Cina. Inverni miti, estati calde. Nel Mediterraneo le precipitazioni si concentrano nei mesi invernali, mentre in Cina in quelli estivi
Zona fredda latitudini attorno ai circoli polari	Climi freddi	Temperature comprese tra 10 e 20°C per 1-4 mesi e nel resto dell'anno clima freddo continentale, proprio della Siberia e del Canada settentrionale, con inverni rigidi e secchi ed estati tiepide e piovose
Zona polare latitudini vicine a 90°	Climi freddi	Temperature attorno a 0°C in tutti i mesi dell'anno con inverni lunghi e rigidi ed estati tiepide e brevi. Le precipitazioni assumono spesso carattere nevoso. Si distinguono un clima polare artico e antartico, in cui le temperature invernali possono scendere fino a -50°C

¹⁰ Cfr. UNI 10349, *op.cit.*.

temperatura massima nel mese di luglio e umidità relativa nelle località capoluogo di provincia nelle quali esiste una stazione meteorologica dell'Aeronautica Militare Italiana¹¹. Gli scarti medi che si riscontrano sono veramente molto ridotti: -0,43°C per il valore di temperatura media giornaliera e 1,56°C per le massime registrate in luglio, e solo 0,8% per quanto riguarda l'umidità relativa. Gli andamenti delle singole stazioni sono illustrate dalle curve in grigio della Figura 2-2; il tratto continuo in nero rappresenta il valore medio, mentre le linee tratteggiate rappresentano l'ampiezza di una deviazione standard.

	UNI 10349	Atlante Meteorologico d'Italia
θ_e	Temperatura media giornaliera media mensile; temperatura massima media giornaliera del mese di luglio e sua ampiezza massima media giornaliera	Temperatura media giornaliera media mensile, e della prima, seconda e terza decade; temperatura massima media giornaliera media mensile; temperatura minima giornaliera media mensile, e della prima, seconda e terza decade; differenza tra l'85° ed il 15° percentile delle temperature massime e minime; diagrammi percentili;
p_{va} RH	Pressione parziale del vapore d'acqua media giornaliera media mensile	Diagramma dell'umidità relativa minima e massima media giornaliera media mensile; numero medio di giorni al mese con nebbia
\overline{H} , \overline{I}	Irradiazione solare giornaliera media mensile diretta e diffusa sul piano orizzontale; irradianza solare media oraria estiva ed angolo di incidenza del sole su superfici verticali	Numero medio di giorni al mese con copertura nuvolosa inferiore e superiore a 4 octa, rilevato alle ore 6:00 e 18:00
RN	Non rilevata	Precipitazione totale media mensile e distribuzione in quintili; numero medio di giorni con precipitazioni superiori a 1, 5, 10 e 50 mm
v	Velocità media giornaliera media annuale del vento, e direzione media giornaliera media annuale prevalente	Distribuzione della velocità e direzione istantanea dei venti media mensile rilevata alle ore 0:00, 6:00, 12:00 e 18:00 e classificata secondo le classi di velocità: calma, 1-10 nodi; 11-20 nodi e > 20 nodi

Tabella 2-2 Quadro sinottico tra i dati meteorologici riportati nella norma UNI e, a destra, nell'Atlante Meteorologico d'Italia

Il metodo di calcolo proposto dalla norma¹² per la determinazione della temperatura media e massima estiva considera che lo scarto tra due località sia direttamente proporzionale alla differenza delle relative altitudini geografiche; altrove¹³ si ritiene opportuno inserire dei valori correttivi che tengano conto dell'effetto *isola di calore* che si riscontra negli ambiti fortemente antropizzati¹⁴.

¹¹ Le città sono: Arezzo, Brescia, Brindisi, Cagliari, Campobasso, Catania, Enna, Foggia, Frosinone, Grosseto, Latina, Lecce, Messina, Novara, Palermo, Piacenza, Pisa, Potenza, Roma, Trapani, Trieste, Udine, Verona, Vicenza, Viterbo.

¹² Cfr. UNI 10349, *op. cit.*.

¹³ Cfr. UNI 10339:1995, *Impianti aeraulici ai fini di benessere. Generalità, classificazione e requisiti. Regole per la richiesta d'offerta, l'offerta, l'ordine e la fornitura*, Appendice D. Qui si prescrive di aumentare il valore ottenuto di 0,5÷1,0 °C per piccoli agglomerati urbani e di 1,0÷2,0 °C in grandi città.

¹⁴ Nei siti dove è preponderante la presenza di costruzioni si riscontrano tre fenomeni principali: assenza di superfici a verde che, tramite i processi di fotosintesi clorofilliana, assorbono gran parte della radiazione solare; abbondanza di materiali a bassa capacità termica e ridotto albedo, che si riscaldano velocemente e ce-

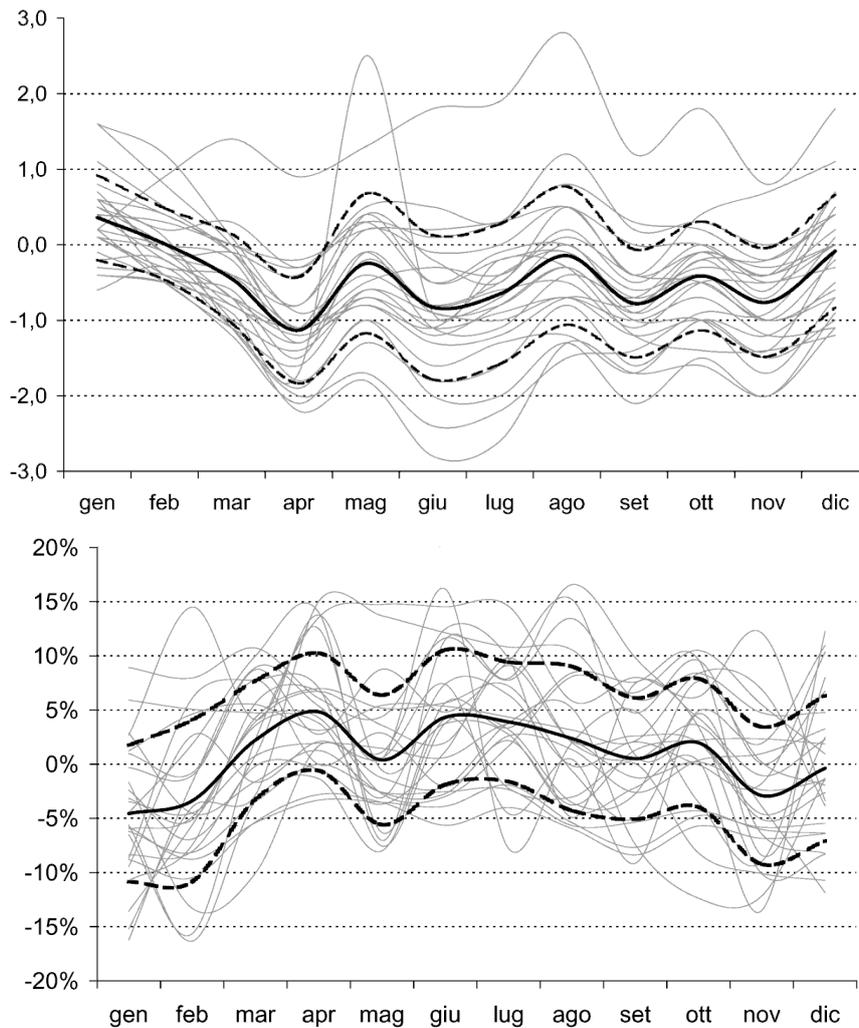


Figura 2-2 Scarto tra i valori medi giornalieri medi mensili di temperatura ed umidità relativa forniti dall'Atlante Meteorologico e dalla normativa UNI

Per questo motivo, si propone di classificare sia la località di calcolo che quella di riferimento in funzione del *livello di antropizzazione* del territorio che, per semplicità di catalogazione, viene diviso in cinque fasce, secondo quanto riportato nella Tabella 2-3. Qui per area costruita si intende quella parte di territorio coperta da costruzioni, siano esse edifici o infrastrutture (strade comprese), mentre l'altezza degli edifici si riferisce alla media riscontrabile a scala urbana o circoscrizionale¹⁵. Assegnando quindi dei coefficienti correttivi in funzione della fascia di appartenenza è possibile tener conto degli effetti secondari sul microclima senza dover ricorrere a calcoli complessi¹⁶.

Utilizzando i dati messi a disposizione nell'Atlante, si può proporre una procedura per la determinazione della deviazione standard della temperatura media: per ogni stazione meteo, l'Aeronautica Militare registra le differenze, in percentuale, tra l'85° ed il 15° relativi alle temperature massima e minima media mensile; la metà della media aritmetica di questi due valori

dono rapidamente calore all'aria; presenza di costruzioni alte, che accentuano l'effetto *labirinto* tramite il quale i raggi solari subiscono un elevato numero di riflessioni, con il conseguente aumento dell'assorbimento.

¹⁵ Per la determinazione del livello di antropizzazione, *cfr.* § 4.1.1.1.

¹⁶ La metodologia di calcolo è riportata in § 4.1.1.2.

può essere, con buona approssimazione, assimilabile a $SD_{\theta,med}$ della località¹⁷. Determinate le due stazioni meteo più vicine alla località di calcolo, è possibile calcolare per quest'ultima il valore della sua deviazione standard come media ponderata sulla distanza dalle altre due¹⁸.

<i>Descrizione</i>	<i>Area costruita</i>	<i>Altezza media edifici</i>
I Il territorio ha un'edificazione quasi nulla; rare case sono immerse in aree non costruite	Minore del 20%	a - Inferiore a 9 metri (inferiore ai tre piani)
II Il territorio è scarsamente costruito; gli edifici sono isolati e distanti tra loro; le strade principali sono poche, e servono strade laterali che accedono ad i singoli edifici	Tra il 20 ed il 40%	b - Al massimo di 9 metri (al massimo di tre piani)
III Il territorio è mediamente costruito; gli edifici tendono ad essere isolati con aree di pertinenza non costruite; le strade servono i singoli edifici	Tra il 40 e il 60%	c - In media di 9 metri (tre piani)
IV La gran parte del territorio è costruito; gli edifici sono molto vicini o raggruppati in isolati; lo spazio per le aree non edificate è ridotto; le strade sono organizzate in maglie per servire i diversi lotti	Tra il 60 e l'80%	c - In media di 9 metri (tre piani) d - Superiore a 9 metri ed inferiore a 21 metri (tra i tre ed i sette piani)
V Quasi la totalità del territorio è costruito; gli edifici sono raggruppati in isolati; lo spazio non edificato è quasi assente; le strade circondano gli isolati	Superiore all'80%	e - La metà degli edifici ha altezza superiore a 21 metri (la metà degli edifici supera i sette piani)

Tabella 2-3 Fasce di antropizzazione del territorio ed altezza degli edifici

La norma UNI indica di calcolare la temperatura massima estiva con lo stesso procedimento con il quale si calcolano le medie mensili, mettendo a disposizione una tabella contenente i valori di riferimento per i mesi di luglio o agosto¹⁹; sulla scorta di queste indicazioni, si propone qui di utilizzare i dati relativi alle temperature massime e minime, riportati nell'Atlante, allo scopo di determinare l'escursione termica giornaliera media mensile. Questo calcolo deve tener conto anche dei vari fattori che ne influenzano il valore, ed in particolar modo della presenza di elementi sul territorio che fungono da accumulatori termici - i quali ritardano la cessione del calore riducendo l'escursione - e della copertura nuvolosa media - che, quando è più consistente, diminuisce la dispersione verso la volta celeste -, per valutare i quali si propone di impiegare dei fattori di correzione, funzione del livello di antropizzazione, già classificato nella Tabella 2-3, della distanza dal mare, ripartita nelle tre fasce riportati nella Tabella 2-4, e dell'altitudine, suddivisa negli otto gruppi elencati nella Tabella 2-5²⁰.

Avendo a disposizione sia la temperatura media che l'escursione termica, è possibile calcolare l'andamento della variabile nell'intero arco della giornata. A tal proposito, la norma fornisce una formula di calcolo

¹⁷ L'ipotesi si basa sulla considerazione che la variazione della temperatura sia una variabile casuale normale continua e che quindi la sua funzione di ripartizione $f(\theta)$, sulla quale si leggerebbero tra l'altro le differenze percentili, sia del tipo

$$F_D(\theta) = \frac{1}{2} \left(1 + \operatorname{erf} \frac{x - \theta_{med}}{\sqrt{2SD_{\theta,med}}} \right); \text{ dato che, com'è noto, } F_D(\theta_{med} + SD_{\theta,med}) - F_D(\theta_{med} -$$

$SD_{\theta,med}) = 68.3\%$, l'errore che si compie è solo di 0.85%.

¹⁸ Cfr. 4.1.1.2.

¹⁹ Cfr. UNI 10349, *op. cit.*.

²⁰ Per l'algoritmo adottato, cfr. § 4.1.1.2.

applicabile al periodo estivo²¹; qui si propone di utilizzare la stessa per l'intero anno in quanto, alle nostre latitudini, la differenza tra la durata delle ore diurne in estate ed in inverno è comunque contenuta, e di conseguenza l'errore che si compie è senz'altro accettabile.

	<i>Fascia</i>	<i>Distanza dal mare</i>
A	Costiera	Minore di 20 km
B	Semicostiera	Tra 20 e 40 km
C	Entroterra	Superiore a 40 km

Tabella 2-4 Fasce di territorio in funzione della distanza dalla linea di costa

<i>Altitudine in metri sul livello del mare</i>							
<i>Marino</i>	<i>Collinare</i>		<i>Montano</i>			<i>Alpino</i>	
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
100	300	500	800	1200	1500	2000	> 2000

Tabella 2-5 Gruppi di suddivisione dell'altitudine del territorio

Per valutare l'umidità dell'aria bisogna determinare il valore medio mensile e l'escursione relativa. La norma UNI fornisce un criterio di valutazione per il primo dei due; dato che esso lo assimila direttamente a quello di riferimento²², senza tener conto di altri elementi che possono influenzarlo, si propone qui di aggiungere una costante in funzione del livello di antropizzazione, stabilito impiegando la Tabella 2-3, ed un'altra in relazione alla fascia di territorio, ottenuta grazie alla Tabella 2-4²³. Nessun algoritmo è invece disponibile per l'escursione; si avanza quindi l'ipotesi di impiegare direttamente il valore desumibile dalla stazione dell'Atlante Meteorologico d'Italia più prossima al luogo di calcolo; se però l'umidità minima e quella massima superano i limiti realistici, fissati in 40% e 100%, allora occorrerà di conseguenza ridurre l'escursione²⁴. Anche per la distribuzione oraria non ci sono indicazioni di sorta, per cui si ritiene opportuno di impiegare la stessa relazione di calcolo della temperatura – ma di segno opposto –, in modo da ottenere il valore minimo di giorno ed il massimo di notte.

L'irradiazione solare, così come calcolata dalla norma²⁵, può in alcuni casi restituire dei valori non realistici in quanto si determinano delle situazioni per le quali l'estrapolazione del dato è molto sovrastimato o sottostimato, ed alcune volte anche negativo²⁶. Per ovviare a tale errore, si avanza qui l'ipotesi di utilizzare, dove possibile, l'interpolazione in luogo dell'estrapolazione, scegliendo le località di riferimento in modo opportuno²⁷. Per deter-

²¹ Cfr. UNI 10349, *op. cit.*. Per il calcolo, *cf.* § 4.1.1.2.

²² Cfr. UNI 10339, *op. cit.*, Appendice D. In UNI 10349 non vi sono accenni per calcolare il valore di umidità in altre località non comprese nell'elenco.

²³ Per il calcolo, *cf.* § 4.1.1.2.

²⁴ Per il calcolo, *ibidem*.

²⁵ Cfr. UNI 10349, *op. cit.*.

²⁶ L'algoritmo indica infatti di individuare le due località più vicine, per le quali richiede di eseguire la media ponderata sulle latitudini; quando il luogo di calcolo si trova a nord o a sud di entrambe le stazioni meteorologiche, allora detta media esegue l'estrapolazione, e non l'interpolazione, dei dati. Se le località scelte hanno tra loro una latitudine molto prossima ed i loro valori di irradianza sono molto diversi, il coefficiente angolare della retta sulla quale si esegue l'estrapolazione risulta, in valore assoluto, estremamente elevato; ne consegue che per piccoli scarti di latitudine (ascissa) si riscontrano grandi differenze di irradiazione (ordinata), con un conseguente errore di calcolo estremamente alto.

²⁷ Ciò non è possibile solo per la fascia di territorio nazionale più a nord della località di riferimento avente latitudine massima, e più a sud della località di riferimento

minare l'irradianza oraria, in assenza di specifiche indicazioni normative, si propone di considerare mediamente costante la quantità di nuvole, e di far variare il dato soltanto in funzione della posizione del sole nella volta celeste. Utilizzando le note formule di calcolo dell'irradianza astronomica, che restituiscono quindi il valore massimo che si otterrebbe in assenza di copertura nuvolosa, si può valutare un coefficiente di riduzione pari al rapporto tra irradiazione solare effettiva e teorica: moltiplicando detto fattore per le irradiazioni astronomiche precedentemente trovate, si ottiene la variazione oraria reale dell'apporto solare - diretto e diffuso - per la località di riferimento²⁸.

Il clima meteorologico si completa individuando i fenomeni atmosferici, e cioè le precipitazioni ed i venti. Come già accennato, la pioggia viene classificata in base a due parametri: la percentuale mensile di giorni piovosi - o il suo complementare che indica quelli con assenza di precipitazioni - ed i millimetri medi caduti nel medesimo periodo. Questi dati sono resi disponibili dall'Atlante Meteorologico, che li indica entrambi; anche qui, in mancanza di metodi di valutazione per la località di calcolo, si avanza l'ipotesi di eseguire una media ponderata sulle distanze, impiegando come di consueto le due stazioni meteorologiche più vicine²⁹.

La valutazione della ventilazione naturale è senza dubbio molto complessa a causa della instabilità e turbolenza del fenomeno; per tale motivo occorre chiarire che:

- la velocità dell'aria a cui si riferiscono tutti gli algoritmi di calcolo si deve intendere come *media* in quanto, per la presenza di ostacoli naturali ed artificiali, il flusso subisce accelerazioni e decelerazioni localizzate³⁰;
- la direzione del vento varia sensibilmente a causa del moto turbolento, per cui è possibile darne solo una variazione statistica, dalla quale può ricavarsi la moda;
- da una verifica su un set di quasi 22.000 dati³¹, si è riscontrato che la velocità media del vento è pressoché indipendente dalla sua direzione, per cui i due parametri possono essere trattati separatamente.

La velocità dell'aria è un valore che può essere ricavato mensilmente grazie ai dati presenti nell'Atlante Meteorologico d'Italia, il quale però riporta, per ogni stazione di rilevamento, non il valore medio bensì l'incidenza percentuale del fenomeno in funzione delle otto direzioni del vento - N, NE, E, SE, S, SW, W e NW - e di quattro gruppi di velocità - minore di 1 nodo, tra 1 e 10 nodi, tra 11 e 20 nodi, superiore a 20 nodi - suddivise per ora di rilievo (0.00, 6.00, 12.00 e 18.00). Si rende quindi necessario introdurre un sistema di calcolo per ricavare il valore medio cercato attraverso dei procedimenti statistici: visto che, come precedentemente accennato, il dato è indifferente alla direzione, è possibile determinare le incidenze percentuali in funzione soltanto dei gruppi di velocità; in particolare, questi rappresentano punti appartenenti alla funzione di ripartizione che sottende la distribuzione statistica, e quindi come tali saranno utilizzati. Come è possibile verificare in lette-

avente latitudine minima. Per il sistema di scelta ed il criterio di calcolo, *cfr.* § 4.1.1.2.

²⁸ *Ibidem.*

²⁹ *Cfr.* § 4.1.1.2.

³⁰ *Cfr.* ASHRAE, *Handbook - Fundamentals, op. cit.*, cap. 16.

³¹ Si tratta dei dati messi a disposizione dal Servizio Meteorologico della Regione Campania, relativo al periodo 1999 - 2008, riguardante le stazioni di Battipaglia, Buccino, Buonabitacolo, Castel San Lorenzo, Policastro Bussentino e Vitulazio, utilizzate anche nel Cap.3 per testare gli algoritmi sviluppati in questo lavoro.

ratura³², le diverse velocità tendono ad assumere una forma a campana priva del ramo negativo (Figura 2-3). Si avanza quindi l'ipotesi di trattare la distribuzione come una variabile normale la cui media è ad una distanza pari a tre distribuzioni standard dal valore nullo, allo scopo di limitare a 0.15% l'errore dovuto alla mancanza della parte minore di zero.

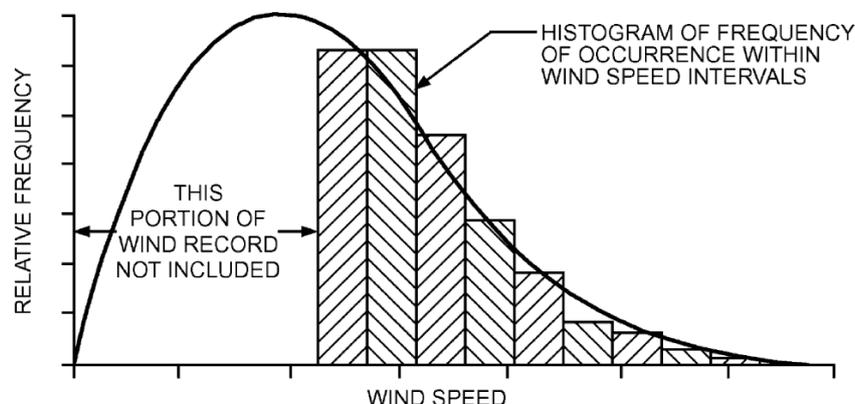


Figura 2-3 Distribuzione statistica delle velocità del vento

È possibile individuare, per ogni gruppo di velocità, la deviazione standard corrispondente ad una funzione di ripartizione che ha media pari a tre deviazioni standard, e passa per il punto rappresentativo del gruppo; la deviazione media quindi determina la funzione di ripartizione che minimizza l'errore, e consente di calcolare la velocità cercata (Figura 2-3)³³. Ottenuto il valore di riferimento, è possibile utilizzare questo in luogo della velocità annuale disponibile nella norma UNI ma continuando ad applicare il medesimo algoritmo³⁴; per tener conto della presenza degli edifici, che rallentano il flusso d'aria, si propone di impiegare in combinazione anche il sistema indicato dalla norma americana³⁵, grazie al quale è possibile ottenere un sistema di calcolo in grado di considerare anche questo fenomeno³⁶. Per determinare la direzione prevalente del vento, è sufficiente calcolare la media, ponderata sulla distanza, delle distribuzioni percentuali delle due stazioni meteo più vicine disponibili sull'Atlante Meteorologico d'Italia³⁷.

³² Cfr. ASHRAE, *Handbook - Fundamentals*, op. cit., cap. 16.

³³ Per l'algoritmo di calcolo, cfr. § 4.1.1.2.

³⁴ Cfr. UNI 10349, op. cit..

³⁵ Cfr. ASHRAE, *Handbook - Fundamentals*, op. cit., cap. 16.

³⁶ Per il calcolo, cfr. § 4.1.1.2. In particolare, la formula impiegata per ottenere

i valori riportati nella Tabella 4-11 è $v_a[z] = v_{a,ref} \left(\frac{\mu_{ref}}{z_{ref}} \right)^{\eta_{ref}} \left(\frac{z}{\mu} \right)^{\eta}$, dove i parametri η

e μ sono in funzione delle caratteristiche del territorio riportate nella tabella:

Tipo di territorio	Esponente η	Profondità μ
1 Centri urbani, con almeno la metà degli edifici più alti di 20 metri	0.33	460 m
2 Aree urbane o suburbane, aree alberate o terreni con costruzioni numerose e vicine, mono o plurifamiliari	0.22	370 m
3 Terreni aperti con poche e rade costruzioni, di altezza non superiore a 9 metri	0.14	270 m
4 Aree pianeggianti prive di costruzioni	0.10	210 m

La profondità rappresenta l'altezza massima oltre la quale la formula perde significato, e la velocità si stabilizza sul valore massimo.

³⁷ *Ibidem*.

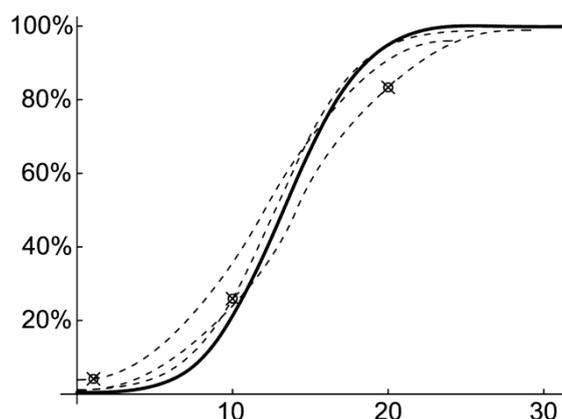


Figura 2-4 Funzione di ripartizione media per il calcolo della velocità

La Tabella 2-6 è un quadro sinottico nel quale sono riportate tutte le variabili calcolate precedentemente, in base alle quali si propone di costruire il profilo meteorologico da utilizzare per la località di riferimento.

temperatura		umidità		irradiazione		piovosità		ventilazione	
θ_{med}	media	RH_{med}	media	$\overline{H}_{b,ho}$	diretta	RN_0	assente	v_{med}	media
$\frac{SD_{\theta}}{\Delta\theta}$	deviaz.	ΔRH	escurs.	$\overline{H}_{d,ho}$	diffusa	RN_{med}	media	\vec{v}_{mod}	preval.
$\Delta\theta$	escurs.								

Tabella 2-6 Variabili climatiche

Come già riportato³⁸, la temperatura è il principale indicatore di comfort termico igrometrico; per definire le variazioni delle condizioni meteorologiche perciò appare utile organizzare i dati in funzione di questo parametro. Conoscendone la deviazione standard e ritenendo che la sua densità di probabilità rispetti il teorema del limite centrale, si suggerisce di suddividere il periodo di osservazione in tre intervalli equitemporali di circa una decade: nella fase centrale la temperatura è pari al valore medio, mentre negli altri due differisce di ± 0.97 volte la deviazione standard³⁹. La riduzione della temperatura rispetto alla media mensile è dovuto principalmente alla presenza di una maggiore copertura nuvolosa, che riduce l'irradiazione totale, l'escursione termica e l'umidità relativa, mentre aumenta sia la piovosità media (lasciandone inalterata la probabilità di manifestazione del fenomeno) che la velocità del vento (mentre resta invariata la direzione prevalente)⁴⁰.

Temperatura, umidità e piovosità valutati a scala urbana possono essere direttamente impiegati anche a scala edilizia perché le procedure di stima che sono state qui adottate tengono conto anche di quei parametri che possono modificarne il valore, come il livello di antropizzazione del territorio. Irradiazione e ventilazione sono invece notevolmente influenzate dalla morfologia degli spazi esterni immediatamente finitimi alle chiusure dell'unità immobiliare oggetto della valutazione, e devono quindi essere opportunamente elaborati.

Le irradianze orarie diretta e diffusa sul piano orizzontale consentono di stimare la quantità di potenza che incide sulle chiusure dell'edificio impiegando uno dei modelli di cielo disponibili in letteratura; in particolare, qui

³⁸ Cfr. § 1.2.3. Le considerazioni che vengono qui formulate sono surrogate dalle osservazioni dei dati di cui alla nota 33.

³⁹ Nella funzione di ripartizione, i valori $\theta_{med} - 0.97 SD_{\theta}$, θ_{med} e $\theta_{med} + 0.97 SD_{\theta}$ corrispondono infatti ai valori 16,7%, 50,0% e 83,3%.

⁴⁰ Per il calcolo, cfr. § 4.1.1.2.

sarà utilizzato quello anisotropo di Hay e Davies⁴¹, che verrà modificato per tener conto di alcune caratteristiche peculiari del territorio circostante. Infatti, tutti i modelli di cielo considerano che l'orizzonte sia piatto, e che di conseguenza non ci siano altri ostacoli che possono frapporsi tra il sole e la superficie irradiata, ed inoltre che superfici riflettenti siano completamente assenti. Questo errore è ancor più evidente quando, oltre a voler determinare l'irraggiamento di una superficie, se ne vuole stimare l'illuminamento; si propone quindi di introdurre un cambiamento all'algoritmo originario, operando nel seguente modo.

Oltre alle classiche sorgenti direzionale (sole e componente anisotropa del cielo), ed isotropa (cielo e riflessione proveniente dal terreno), si avanza l'ipotesi di considerare un'ulteriore componente isotropa proveniente da una fascia verticale che rappresenta gli edifici che sorgono intorno alla superficie su cui si effettua la stima (Figura 2-5). Naturalmente l'irraggiamento finale è dato dalla somma delle diverse aliquote⁴²: in particolare quella direzionale è nulla quando il sole è alle spalle di un ostacolo, condizione determinabile grazie alla conoscenza dello *sky line* così come definito nel § 2.2.4.

Quando è nota l'irradianza è anche possibile determinare il livello di illuminamento naturale: ottenuta la percentuali delle tre componenti rossa, verde e blu della luce grazie alla nota legge di Plank, avendo preventivamente fissato le temperature di colore della volta celeste e del sole, è possibile valutarne la potenza impiegando le funzioni tristimolo definite dal CIE Observer 2°⁴³. I valori di temperatura di colore del sole variano nel corso della giornata a causa di due motivi: la massa di aria ottica che i raggi devono attraversare ed il livello di copertura nuvolosa, mentre la luce del cielo è funzione sia della direzione che della nuvolosità⁴⁴. Allo scopo di consentire una valutazione delle temperature di colore, si propone di introdurre un opportuno algoritmo in grado di eseguirne la stima in funzione delle reali condizioni di irradiazione e dell'ora di osservazione del fenomeno⁴⁵. Grande rilievo riveste la morfologia delle ostruzioni che si aprono intorno all'edificio in quanto modificano la pressione che il vento esercita sulle facciate, responsabile dei fenomeni di ventilazione incrociata così importanti nella valutazione del comfort igrotermico⁴⁶. La norma americana⁴⁷ valuta questi coefficienti in funzione della forma dell'edificio, distinguendo diversi casi in relazione alla direzione di impatto del flusso d'aria ed al rapporto tra larghezza ed altezza

⁴¹ Cfr. Hay J. E., Davies J. A., *Calculation of Solar Radiation Incident on an Inclined Surface*, in *Proc. First Canadian Solar Radiation Data Workshop*, Ministry of Supply and Services, Canada 1980. In particolare il modello tiene conto della aliquota circumsolare, mentre trascura l'incremento di luce intorno all'orizzonte.

⁴² Cfr. § 4.1.2.1.

⁴³ Cfr. § 4.1.2.2.

⁴⁴ Secondo lo standard CIE, la luce a mezzogiorno in assenza di nuvole ha una distribuzione non plankiana di tipo B con una temperatura di colore di 4870 K; la luce diurna è di tipo D65 con temperatura di 6500 K mentre la luce del cielo nuvoloso a nord è di tipo C con temperatura di 6770 K. In letteratura si possono reperire altri valori, quali la temperatura di colore del cielo limpido - che varia da 10000 a 18000 K in funzione della direzione (il valore maggiore è a nord) - e quella del sole all'alba ed al tramonto in una giornata serena, che si attesta intorno ai 2500 K.

⁴⁵ Cfr. § 4.1.2.2.

⁴⁶ Cfr. Grosso M., *La simulazione del movimento dell'aria negli edifici*, op. cit..

⁴⁷ Cfr. Cap. 16, ASHRAE, *Handbook - Fundamentals*, op. cit.. Cfr. anche ASHRAE, *Handbook - HVAC Applications*, cap. 44.

della costruzione⁴⁸; purtroppo questo metodo non tiene conto della presenza di ostacoli si frappongono tra il flusso ed il prospetto, né tantomeno considera la possibilità che l'edificio abbia una pianta irregolare.

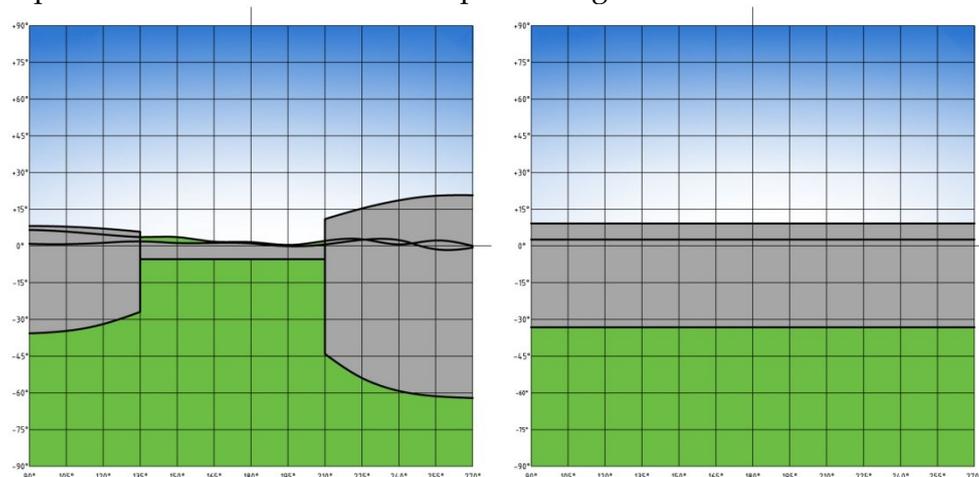


Figura 2-5 Semplificazione delle superfici riflettenti nel modello di cielo proposto

Partendo quindi dal medesimo principio, e modellando sinteticamente la forma dello spazio aperto su cui una chiusura può essere prospiciente⁴⁹, si propone di impiegare dei coefficienti di pressione da determinarsi eseguendo un'interpolazione lineare tra nove diversi casi tipici⁵⁰. Questi sono stati a loro volta valutati impiegando un software CFD (la Figura 2-6 riportata ad esempio le pressioni esercitate su prospetti di diversa forma in assenza di ostacoli) ed eseguendo oltre duecento simulazioni allo scopo di ottenere una casistica sufficientemente ampia per redigere le tabelle impiegate negli algoritmi di stima⁵¹.

A scala di unità ambientale le condizioni igrotermiche e di illuminamento prendono più comunemente il nome di *microclima*: esse dipendono in parte dalle variabili fisiche esterne, in parte dalle prestazioni tecniche degli elementi, dalla morfologia degli ambienti, dalle funzioni in essa presenti – in una parola, dall'Architettura – ed in parte dal comportamento degli utenti, e quindi dall'utilizzo dell'Architettura stessa. Se alle scale maggiori (territoriale, urbana, di edificio) l'ambiente costruito riveste una discreta importanza nella determinazione delle diverse variabili che descrivono il clima meteorologico, a scala di unità ambientale sarà fondamentale prendere in considerazione i numerosi aspetti che contraddistinguono la costruzione, organizzati secondo i principi della scomposizione ambientale (§ 2.2.4) e tecnologica (§ 2.2.5), grazie ai quali è possibile organizzare i dati in modo organico, codificato ed intellegibile.

La valutazione delle variabili termo-igrometriche può essere condotta impiegando le note relazioni contenute nella norma italiana⁵² che, applicate

⁴⁸ Cfr. Davenport A., Huy H., *External and internal wind pressures on cladding of buildings*. Cfr. anche Holmes J., *Wind loads on low-rise buildings: The structural and environmental effect of wind on buildings and structures*, cap.12; Akins R. et al., *Average pressure coefficient for rectangular buildings*. In *Wind engineering: Proceedings of the Fifth International Conference*, pp.369 – 380.

⁴⁹ Cfr. § 2.2.4.

⁵⁰ Questi distinguono la forma dell'edificio (alto o basso) e la presenza di eventuali ostacoli a destra, a sinistra e frontalmente al prospetto.

⁵¹ Cfr. 4.1.2.1.

⁵² Cfr. UNI 10375, *op. cit.*.

per l'intero periodo dell'anno, consentono di eseguire la stima delle caratteristiche fisiche che occorrono nella determinazione del discomfort⁵³.

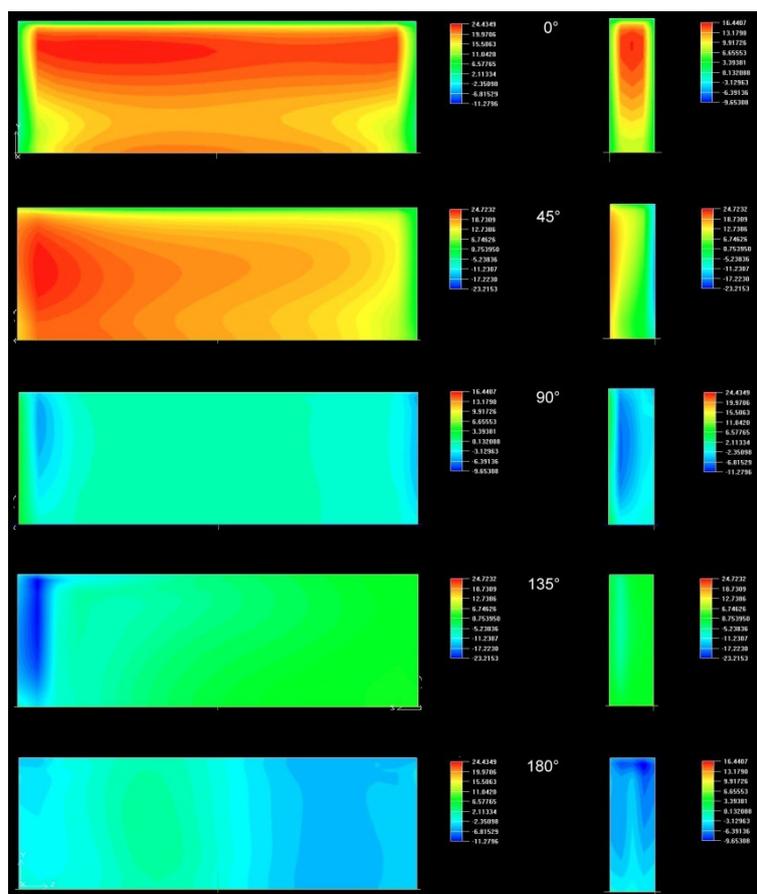


Figura 2-6 Pressioni esercitate sulle superfici di un edificio

L'illuminamento naturale all'interno degli ambienti viene di solito valutato impiegando il *daylight factor*, e cioè un numero adimensionale che rappresenta il rapporto tra la luce esterna e quella interna; le modalità di stima di questo fattore impiegano però modelli semplici di cielo, e non considerano le componenti di luce riflessa dalle pareti degli ambienti⁵⁴; d'altro canto una valutazione accurata necessita di algoritmi estremamente raffinati e di tempi di implementazione che vanno al di là degli obiettivi di questo lavoro. Si propone quindi di adottare un sistema che consenta di eseguire una previsione abbastanza precisa del dato fisico, che sia di facile implementazione in un foglio di calcolo e quindi di veloce impiego. Si suppone di valutare l'illuminamento incidente su di una superficie orizzontale posta al *centro geometrico* dell'ambiente⁵⁵ ad un'altezza di 1.0 m dal pavimento, pari alla somma di tre componenti:

- la luce proveniente dal disco solare che, eventualmente, colpisce direttamente la superficie;
- la luce proveniente dalle superfici riflettenti poste esternamente all'edificio (volta celeste, terreno, altre costruzioni);
- la luce riflessa dalle pareti dell'ambiente.

⁵³ Cfr. § 4.1.2.1.

⁵⁴ Cfr. UNI 10840, *op. cit.*.

⁵⁵ Per questa ed altre caratteristiche geometriche e morfologiche delle unità ambientali, cfr. § 2.2.4.

La prima delle tre aliquote è facilmente determinabile per via geometrica se si conoscono posizione del sole, orientamento della chiusura trasparente ed ostacoli esterni che si frappongono tra il sole e l'infisso. La seconda è funzione dell'angolo solido avente vertice nel centro dell'ambiente e direzioni passanti per gli spigoli dell'apertura presente (Figura 2-7); in tal caso si considera per semplicità che la volta celeste abbia una luminanza costante, pari alla media delle luminanze precedentemente stimate.

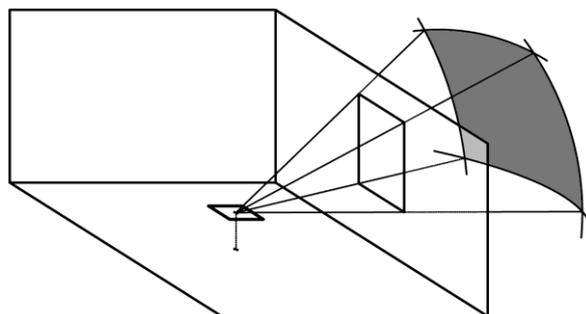


Figura 2-7 Angolo solido, osservato da una superficie posta all'interno dell'ambiente, passante attraverso un'apertura

La terza dipende da diversi e complessi fattori, quali l'illuminamento incidente e riflesso dalle pareti, la posizione relativa e la dimensione delle superfici, la forma dell'ambiente. Dato però che le caratteristiche di adattabilità della vista sono estremamente sofisticate⁵⁶, non è necessario stimare con estrema precisione le condizioni di illuminamento, anche perché questa particolare componente ha un peso meno rilevante rispetto alle altre due. Si sceglie quindi di valutare questa aliquota considerando le seguenti semplificazioni:

- l'unità ambientale è a base quadrata, di lato pari alla radice della sua superficie effettiva, circondato da tre pareti cieche ed una quarta sulla quale si apre l'elemento vetrato; le pareti hanno altezza uguale, pari a quella dell'ambiente stesso;
- sul pavimento, se esternamente non ci sono ostacoli, cade l'illuminamento diretto proveniente dal disco solare; questo viene riflesso (con un albedo standard di 0.2) verso le pareti ed il soffitto considerando che tutta la potenza luminosa sia concentrata nel baricentro della superficie, e che questa abbia il comportamento di un diffusore uniforme;
- sulle quattro pareti e sul soffitto ricade l'illuminamento eventualmente riflesso dalla pavimentazione;
- su ognuna delle pareti cieche e sul soffitto incide un illuminamento costante proveniente dalla volta celeste, determinabile con la stessa procedura applicata per la valutazione seconda aliquota; in questo caso il vertice dell'angolo solido è posto nel baricentro della superficie incidente;
- l'albedo standard delle pareti e del soffitto è pari a 0.6; il loro comportamento è assimilabile a quello del diffusore uniforme;
- l'illuminamento sulla superficie orizzontale posta nel centro geometrico è pari alla somma degli illuminamenti riflessi dalle pareti e dal soffitto.

È così possibile ottenere una stima del livello di luce naturale presente all'interno degli ambienti, grazie ai quali possono essere realizzate le stime relative al benessere in funzione del particolare compito visivo che deve essere assolto dagli utenti.

⁵⁶ Cfr. §2.3.2.

2.2.2 Clima e microclima acustico

Definito come l'andamento spaziale e temporale del rumore presente in un determinato sito⁵⁷, il clima acustico è funzione principalmente della tipologia ed intensità delle attività umane sul territorio di riferimento perché i fenomeni naturali non riescono a competere per durata e potenza sonora rispetto a quanto prodotto dall'uomo. Non a caso la legislazione vigente sulla zonizzazione acustica⁵⁸ suddivide il territorio in sei classi in funzione della destinazione d'uso, e ad esse associa dei valori limite di immissione, di qualità, differenziali e di attenzione, diurni e notturni⁵⁹. Tali valori rappresentano, naturalmente, gli obiettivi di legge, ma possono essere impiegati come riferimento per determinare le condizioni di pressione sonora presenti in una data porzione di ambiente antropizzato.

Cl.	Limite		Qualità		Differenziale		Di attenzione	
	diurno	notturno	diurno	notturno	diurno	notturno	diurno	notturno
I	50	40	47	37	+5	+3	60	50
II	55	45	52	42	+5	+3	65	55
III	60	50	57	47	+5	+3	70	60
IV	65	55	62	52	+5	+3	75	65
V	70	60	67	57	+5	+3	80	70
VI	70	70	70	70	+5	+3	80	80

Tabella 2-7 Valori di riferimento per la determinazione dell'inquinamento acustico

Al contrario di quanto avviene per le condizioni meteorologiche, infatti, non sono disponibili rilievi o mappe di riferimento per poter determinare per via indiretta il livello di pressione sonora esistente; anche i piani di zonizzazione acustica, quando disponibili, rappresentano – come tutti gli strumenti di governo del territorio – la direzione verso la quale indirizzare

⁵⁷ Cfr. UNI 11143-1:2005, *Acustica. Metodo per la stima dell'impatto e del clima acustico per tipologia di sorgenti. Generalità*, 2005.

⁵⁸ Cfr. Tabella A dell'Allegato al D.P.C.M. 14 novembre 1997, *Determinazione dei requisiti acustici passivi degli edifici*. In particolare si riscontrano:

- Classe I – aree particolarmente protette: rientrano in questa classe le aree nelle quali la quiete rappresenta un elemento di base per la loro utilizzazione: aree ospedaliere, scolastiche, aree destinate al riposo ed allo svago, aree residenziali rurali, aree di particolare interesse urbanistico, parchi pubblici, ecc.;
- Classe II: aree destinate ad uso prevalentemente residenziale: rientrano in questa classe le aree urbane interessate prevalentemente da traffico veicolare locale, con bassa densità di popolazione, con limitata presenza di attività commerciali ed assenza di attività industriali e artigianali;
- Classe III – aree di tipo misto: rientrano in questa classe le aree urbane interessate da traffico veicolare locale o di attraversamento, con media densità di popolazione, con presenza di attività commerciali, uffici, con limitata presenza di attività artigianali e con assenza di attività industriali; aree rurali interessate da attività che impiegano macchine operatrici;
- Classe IV – aree di intensa attività umana: rientrano in questa classe le aree urbane interessate da intenso traffico veicolare, con alta densità di popolazione, con elevata presenza di attività commerciali e uffici, con presenza di attività artigianali; le aree in prossimità di strade di grande comunicazione e di linee ferroviarie; le aree portuali, le aree con limitata presenza di piccole industrie;
- Classe V – aree prevalentemente industriali: rientrano in questa classe le aree interessate da insediamenti industriali e con scarsità di abitazioni;
- Classe VI – aree esclusivamente industriali: rientrano in questa classe le aree esclusivamente interessate da attività industriali e prive di insediamenti abitativi.

⁵⁹ Cfr. Legge 26 ottobre 1995 n.447, *Legge quadro sull'inquinamento acustico*, art.2.

l'attività di sviluppo e tutela, e non la condizione attualmente riscontrata. Si propone quindi di valutare l'inquinamento sonoro stimando le seguenti quantità⁶⁰:

- un rumore di fondo, funzione dell'ora, della classificazione acustica e della tipologia di giorno (feriale o festivo);
- un rumore discontinuo determinato dalla presenza di aeroporti entro un raggio di 15 km dal punto di ascolto;
- un rumore continuo determinato dalla presenza di infrastrutture stradali di tipo A (autostrade), B (strade extraurbane principali) e C (extraurbane secondarie) – presenti a scala territoriale entro un raggio di 10 km dal punto di ascolto – funzione del flusso di traffico orario;
- un rumore continuo determinato dalla presenza di infrastrutture stradali di tipo D (strade urbane di scorrimento) – presenti a scala urbana entro un raggio di 1 km – funzione del flusso di traffico orario;
- un rumore continuo determinato dalla presenza di strade di tipo E (strade urbane di quartiere) ed F (strade locali) – presenti a scala di edificio e direttamente a contatto con i prospetti dello stesso – funzione del flusso di traffico orario;
- un rumore discontinuo determinato dalla presenza di ferrovie ed altri sistemi di trasporto collettivo su rotaia (ad esclusione di sistemi tramviari su percorsi misti stradali/ferroviari) – presenti a scala territoriale entro un raggio di 10 km – funzione del flusso di traffico orario⁶¹.

Come già accennato, è possibile ipotizzare che il rumore di fondo sia valutabile intersecando la classificazione acustica di legge con le fasce di antropizzazione del territorio (Tabella 2-3), giungendo a definire 36 combinazioni in funzione delle quali si avanza l'ipotesi di definire i livelli limite diurni e notturni, come riportati nella Tabella 2-8.

Classe acustica	Fasce di antropizzazione											
	I-a		II-b		III-c		IV-c		IV-d		V-e	
I	50	40	50	40	50	40	55	45	55	45	60	50
II	50	40	55	40	55	45	55	45	55	45	60	50
III	55	45	55	45	55	45	60	50	60	50	60	50
IV	55	45	60	50	60	50	60	50	65	55	65	55
V	60	50	60	50	65	55	65	55	70	60	70	60
VI	60	50	65	55	70	60	70	60	70	60	70	70

Tabella 2-8 Limiti di rumore diurno e notturno in funzione della classe acustica e della fascia di antropizzazione del territorio

Per tenere poi conto della variabilità, nel corso del giorno, delle attività umane, e quindi dell'inquinamento acustico che esse generano, si ritiene opportuno proporre una legge di variazione del livello di pressione sonora in funzione dei valori limite, facendoli oscillare entro i livelli di attenzione e di qualità, ottenendo così due profili da utilizzarsi per i giorni feriali e festivi, per i quali si osservano diverse distribuzioni del rumore (Figura 2-8).

Il rumore prodotto da un aereo, la cui intensità è riportata in letteratura⁶², è paragonabile ad una sorgente puntiforme in movimento, la cui al-

⁶⁰ Ivi, art.8.

⁶¹ Per discoteche, circoli privati, pubblici esercizi e impianti sportivi, di cui al citato art.8 della L.447/1995, vigendo l'obbligo di rispettare i valori limite di emissione contenuti nel D.P.C.M. 14 novembre 1997, si ritiene che il relativo inquinamento acustico sia già computato nei valori di immissione, e che quindi sia qui valutato come rumore di fondo.

⁶² Cfr. ASHRAE, *Handbook – Fundamentals*, op. cit., table 1.

tezza dal suolo – in condizioni di crociera – è di circa 10 km; per tale motivo, a meno che il luogo di calcolo non sia in corrispondenza della traiettoria di volo, il rumore massimo prodotto non è praticamente udibile⁶³.

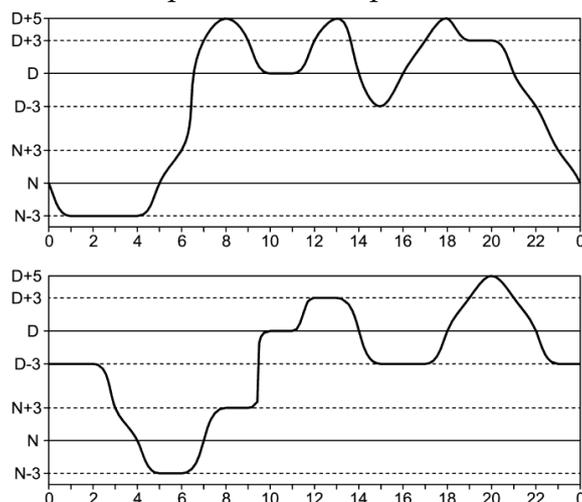


Figura 2-8 Andamento orario del rumore di fondo nei giorni feriali e, sotto, in quelli festivi, in funzione dei livelli limite diurno (D) e notturno (N)

Diversa la condizione se il punto di ascolto si trova in prossimità di un aeroporto, dove la quota di volo si riduce sensibilmente e l'inquinamento acustico aumenta di conseguenza: in questo caso, conoscendo la posizione dell'infrastruttura e l'inclinazione della pista⁶⁴, sono noti tutti i parametri per determinare il rumore prodotto, che dipende esclusivamente dalla distanza e dal fono-assorbimento del suolo⁶⁵. Si possono distinguere:

- un rumore massimo che si percepisce quando l'aereo è alla minima distanza dal punto di ascolto;
- un rumore equivalente orario dovuto al passaggio dei diversi aeroplani nel corso del tempo.

Il calcolo del primo fenomeno è pressoché immediato, in quanto le uniche incognite sono la distanza minima dell'aereo e la sua altitudine. La determinazione del rumore equivalente è più complessa: occorre conoscere il tempo durante il quale il passaggio dell'aereo è percepibile⁶⁶, e da qui ricavare il livello di pressione sonora equivalente. Noto il traffico aereo⁶⁷, è possibile sommare i singoli contributi dei diversi velivoli per ottenere l'inquinamento sonoro totale.

Anche il passaggio di un treno provoca un duplice fenomeno, mas-

⁶³ Un aereo produce un rumore di circa 120 dB ad una distanza di 15 metri (cfr. cap.7, ASHRAE, *Foundamentals*, op. cit.); ad un'altezza di 10.000 metri, il livello di pressione sonora massimo è di circa 63 dB, quindi di poco superiore al rumore di fondo diurno che si osserva per una classe acustica III.

⁶⁴ In prossimità dell'aeroporto, gli aeroplani si allineano alla pista di atterraggio; nota la traiettoria, la distanza può essere determinata per via geometrica in quanto la velocità di decollo e/o atterraggio è di circa 80 m/s, mentre l'inclinazione oscilla tra i 5 ed i 3 gradi rispettivamente.

⁶⁵ Cfr. § 4.1.1.3.

⁶⁶ In particolare, occorre che il rumore dell'aereo sia almeno pari a quello di sottofondo, altrimenti la sua udibilità è pressoché nulla.

⁶⁷ Il traffico aereo annuale è un dato disponibile su internet all'indirizzo www.trail.unionecamere.it. Considerando un'attività dalle ore 6.00 alle 0.00 del giorno dopo, il traffico medio giornaliero si ottiene dividendo quello annuale per 6.570, valore che indica il numero di ore annue di esercizio.

simo ed equivalente, che occorre valutare in funzione di diversi parametri, individuati nei vari modelli di simulazione presenti in letteratura⁶⁸, quali la lunghezza del convoglio, altezza e velocità dello stesso, qualità del materiale rotabile, che consentono di individuare la pressione sonora in campo libero. Nella impossibilità di recuperare questi dati, si suggerisce di valutarli in via indiretta in funzione della classificazione della linea ferroviaria⁶⁹, ed in particolare distinguendo:

- le *linee ad alta velocità*, e cioè le fondamentali a doppio binario su cui circolano i treni con velocità di punta superiori ai 240 km/h (Freccia d'argento, Freccia rossa), caratterizzate da un flusso ferroviario veloce ed un'elevata qualità dell'infrastruttura;
- le *linee nazionali*, e cioè le fondamentali non facenti parte della precedente classificazione, sulle quali viaggiano i treni di collegamento nazionali sia merci che passeggeri, distinte da un intenso flusso ferroviario e da una qualità media del materiale rotabile;
- le *linee locali*, e cioè le reti complementari sulle quali viaggiano i treni pendolari a carattere regionale, sub regionale e provinciale, con convogli a bassa velocità e qualità dell'infrastruttura ridotta;
- le *linee metropolitane di superficie*, caratterizzate da un elevato flusso ferroviario, una velocità ridotta ed una discreta qualità dell'infrastruttura; in questa classificazione non si annoverano le linee tramviarie e tutte le linee ferroviarie che condividono la sede stradale con il traffico veicolare cittadino.

Ricavate le informazioni necessarie, il decadimento del suono - causato dalla distanza e dalla presenza di ostacoli che si interpongono tra l'ascoltatore e la fonte - può essere stimato impiegando gli algoritmi che mette a disposizione la norma internazionale⁷⁰.

Il traffico di tipo autostradale (categorie di strade A, B e C) è stato determinato, con riferimento specifico al parco veicolare italiano, con il metodo M.I.R.A (Modello Inquinamento Rumore Autostradale) dalla Società Autostrade⁷¹, ed è funzione del flusso orario, della tipologia di veicolo e della distanza di ascolto, che convenzionalmente è posta al bordo strada. Il TGM - *traffico giornaliero medio* - è disponibile per diversi tratti stradali sul portale nazionale delle Infrastrutture⁷². A volte, soprattutto per strade di secondaria importanza, questi dati non sono rilevati, per cui si è qui provveduto a redigere un'analisi statistica di tutti i dati disponibili a marzo 2010, ottenendo quanto segue. La distribuzione dei valori relativi alle autostrade fanno emergere una duplice tendenza, che rispecchia l'esistenza di un ridotto numero di

⁶⁸ Cfr. Commissione Inteaziendale ANAS, Ente Ferrovie dello Stato, Società Autostrade, AISCAT, Ministero dell'ambiente, *Istruzioni per l'inserimento ambientale delle infrastrutture stradali e ferroviarie con riferimento al controllo dell'inquinamento acustico*, Roma 1992.

⁶⁹ La classificazione della rete ferroviaria italiana è disponibile sul sito RFI all'indirizzo <http://www.rfi.it/cms/v/index.jsp?vnextoid=25bc8c3e13e0a110VgnVCM10000080a3e90aRCRD>.

⁷⁰ Cfr. UNI ISO 9613-2:2006, *Acustica. Attenuazione sonora nella propagazione all'aperto. Parte 2: Metodo generale di calcolo*.

⁷¹ Cfr. Appendice 2, Commissione Interaziendale ANAS, Ente Ferrovie dello Stato, Società Autostrade, AISCAT, Ministero dell'ambiente, *Istruzioni per l'inserimento ambientale delle infrastrutture stradali e ferroviarie con riferimento al controllo dell'inquinamento acustico, op. cit.*

⁷² L'indirizzo è <http://www.trail.unionecamere.it>.

assi di primaria importanza, con un traffico giornaliero medio di circa 260.000 veicoli leggeri, ed una seconda famiglia di autostrade di collegamento che si attesta intorno ad un valore di 70.000 automobili. Considerando che le arterie principali sono tutte costantemente monitorate, se ne ricava che è possibile adottare il secondo valore come riferimento quando non sono disponibili altri dati; avendo inoltre calcolato che per questa tipologia di strade il traffico pesante è pari a circa il 20% di quello leggero, potrà adottarsi come valore di default per questa categoria il TGM di 14.000 veicoli.

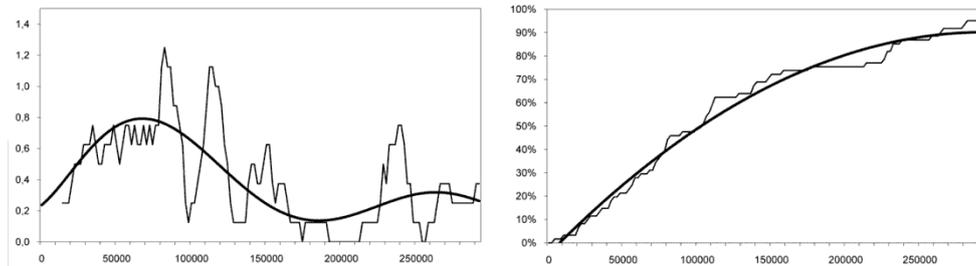


Figura 2-9 Tendenza della distribuzione e, a destra, della ripartizione del traffico autostradale leggero italiano

Le strade statali e provinciali dimostrano una tendenza analoga, anche se meno pronunciata, a distribuirsi intorno a due valori, il primo rappresentativo del traffico giornaliero totale delle strade a scorrimento veloce, pari a circa 27.500 veicoli, tra leggeri (25.000) e pesanti (2.500), e il secondo, di 10.500 mezzi, di cui 10.000 automobili e 500 camion, tipico delle strade extraurbane di collegamento principale.

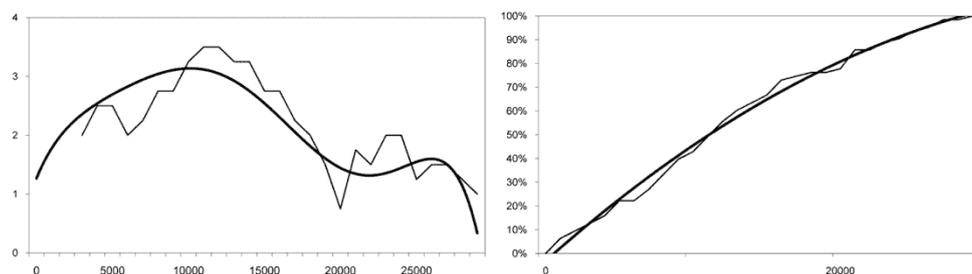


Figura 2-10 Tendenza della distribuzione e, a destra, ripartizione del traffico stradale totale

Anche per il traffico stradale, si ritiene necessario introdurre un algoritmo che tenga conto della variabilità del flusso in funzione della tipologia del giorno - feriale o festivo - e dell'ora di ascolto. Si propone quindi di introdurre dei coefficienti correttivi che siano in grado di simulare il cambiamento delle condizioni di traffico, la cui somma finale restituisca però il valore di TGM della strada in oggetto (Figura 2-11)⁷³. Determinato l'inquinamento sonoro a bordo strada, è possibile tener conto di ulteriori incrementi dovuti alla qualità del manto stradale, alla pendenza della strada ed all'angolo di vista⁷⁴, e dei decrementi dovuti alla divergenza geometrica ed alla presenza di costruzioni che si interpongono tra la sorgente e l'ascoltatore⁷⁵.

⁷³ In particolare, si suppone che in una settimana ci siano cinque giorni feriali e due festivi.

⁷⁴ Cfr. metodo C.E.E. in Appendice 2, Commissione Inteaziendale ANAS, Ente Ferrovie dello Stato, Società Autostrade, AISCAT, Ministero dell'ambiente, Istruzioni per l'inserimento ambientale delle infrastrutture stradali e ferroviarie con riferimento al controllo dell'inquinamento acustico, op. cit..

⁷⁵ Cfr. UNI ISO 9613-2:2006, op. cit..

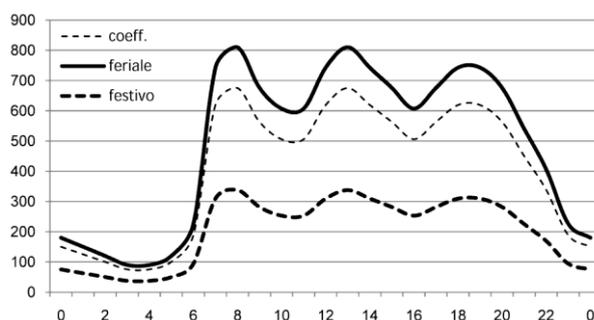


Figura 2-11 Andamento orario del fattore per il calcolo flusso su strade a scorrimento veloce nei giorni feriali e festivi, e del coefficiente orario impiegato negli algoritmi

Anche per le principali arterie di collegamento urbano (tipo D, presenti nel raggio di 1 km dal punto di ascolto) sono disponibili diverse metodologie di calcolo, che si basano naturalmente sul traffico orario. Questo dato purtroppo non è mai disponibile, per cui si propone di valutarlo per via indiretta in funzione di diversi indicatori, e cioè:

- la fascia di antropizzazione del territorio su cui insiste la strada – che può essere diversa da quella del punto di ascolto;
- la relativa classe acustica;
- la larghezza della carreggiata, in funzione della quale può essere calcolato il numero di corsie;
- la tipologia di strada, distinta in principale (e cioè di grande afflusso di traffico e quindi strategica ai fini della mobilità urbana) e secondaria (di collegamento urbano che non ha le caratteristiche del primo tipo).

Si avanza quindi l'ipotesi di considerare, in funzione della velocità media osservabile sulle strade urbane e della distanza tra i diversi veicoli, i valori medi di frequenza per ogni corsia secondo quanto riportato nella Tabella 2-9, suddivisi per tipo di strada e fascia di antropizzazione.

Tipo di strada	Veicoli pesanti	Fasce di antropizzazione					
		I-a	II-b	III-c	IV-c	IV-d	V-e
		veicoli / ora corsia					
principale	10	180	240	360	450	720	1200
secondaria	3	60	90	120	180	240	360

Tabella 2-9 Flusso veicolare orario medio urbano

Il numero di corsie può essere determinato in funzione della larghezza della strada; la classe acustica – che a sua volta è in relazione con la destinazione d'uso del territorio – può invece essere impiegata per valutare per via indiretta la distribuzione oraria del flusso attraverso l'impiego di opportuni coefficienti di moltiplicazione⁷⁶.

Per organizzare ed ottimizzare l'elaborazione dei dati, è possibile raccogliere le informazioni relative alle infrastrutture in apposite schede (Figura 2-12): attribuendo ad ogni elemento un apposito codice univoco, sarà possibile richiamare successivamente i dati per eseguire le necessarie stime alle diverse scale di valutazione.

A scala di edificio occorre individuare determinare la presenza delle infrastrutture secondarie e delle attività umane che possono incrementare il livello di inquinamento acustico. Considerando soltanto la regione di spazio delimitata dall'invaso su cui si affacciano i diversi fronti dell'organismo edilizio, è possibile indicare se è presente una strada secondaria – o un'area

⁷⁶ Per i particolari, cfr. § 4.1.1.3.

a parcheggio – per la quale si è provveduto ad indicare un profilo acustico in funzione dell’ora⁷⁷. Allo stesso modo, l’invaso può essere considerato come un *contenitore* di attività umane che possono generare rumore; anche qui, per le principali tipologie, si propone di utilizzare dei modelli che simulano l’emissione nell’arco della giornata⁷⁸.

Aeroporti												
Cod	Descrizione	voli / anno		latit.	lon	inclinazione						
		<i>adim.</i>		deg	deg	deg						

Ferrovie						
Cod	Descrizione	n.bin	dist	fascia	alt.	% fac.
		<i>adim</i>	m	<i>adim.</i>	m	<i>adim.</i>

Strade a scorrimento veloce												
Cod	Descr.	Tipo	man	pen	dist	l.sx	l.dx	fascia	alt.	%f	TGM ₁	TGM ₂
			<i>adim</i>	<i>ad.</i>	m	m	m	<i>adim</i>	m	<i>ad.</i>	<i>adim</i>	<i>adim</i>

Strade urbane principali											
Cod	Descrizione	Tipo	man	uso	dist	fascia	lar	%f	alt.	pen	
			<i>ad.</i>	<i>adim</i>	m	<i>adim</i>	m	<i>ad.</i>	m	%	

Figura 2-12 Esempio di schede per la raccolta dei dati relativi alle infrastrutture

A scala di unità ambientale è importante stabilire non solo il livello di pressione sonora che, attraverso le chiusure, si trasmette dall’esterno all’interno, ma anche quello che si propaga tramite le partizioni e che proviene dalle stanze limitrofe. Per tale motivo, si propone di distinguere il disturbo prodotto dall’impiego di macchinari rispetto a quello generato dalle voci delle persone, distinto – quest’ultimo – per classe di densità⁷⁹.

2.2.3 I dati relativi all’utenza

Conoscere il destinatario di un’opera di Architettura è di fondamentale importanza per un progettista in quanto consente di scegliere le soluzioni che meglio si adattano alle esigenze specifiche dell’utente finale. Naturalmente una costruzione è destinata, con ogni probabilità, a succedere col passare del tempo dall’originario fruitore ad un diverso destinatario e quindi dovrà – quando è possibile – avere dei margini di adattabilità che spesso sono difficili da mettere in atto: ma questo decadimento prestazionale, dovuto alla evoluzione del quadro esigenziale, è un meccanismo intrinsecamente connesso all’obsolescenza tecnologica, alla quale nessun elemento tecnico è in grado di sottrarsi.

Aver chiaro l’insieme dei requisiti da *erogare* in funzione delle esigenze è quindi una fase progettuale di fondamentale importanza per orientare strategie e criteri di scelta, ma questo implica necessariamente che il progettista conosca direttamente l’utente. Questa eventualità non sempre si verifica: in edifici ad uso pubblico, ad esempio, o in costruzioni che ancora devono essere vendute o affittate ai singoli privati, non è possibile eseguire delle *customizzazioni* dell’Architettura *ad personam* per cui si rende necessario organizzare un metodo di raccolta dei dati che definisca, con criteri

⁷⁷ Cfr. § 4.1.1.3.

⁷⁸ *Ivi.*

⁷⁹ Cfr. § 4.1.2.3.

probabilistici, il profilo medio dei diversi gruppi di utenti. Diversi, infatti, possono essere i fruitori finali di un ambiente: si prenda a titolo esemplificativo lo spazio comune di un ospedale, dove convivono ed operano a differente titolo medici, paramedici, personale amministrativo, addetti alle pulizie ed alle manutenzioni, fornitori, guardie giurate, ammalati e visitatori, solo per citarne alcuni.

Diventa quindi di fondamentale importanza stabilire quali sono i dati che occorrono per eseguire la stima del comfort, e in qual modo procurare le informazioni; per prima cosa però è opportuno distinguerli in *diretti* ed *indiretti*, in funzione delle modalità con le quali entrano in gioco nei meccanismi di valutazione proposti.

Nei dati diretti si annoverano le caratteristiche fisiche dell'utente, come l'età, il peso, il sesso, la statura; questi influenzano la percezione dei fenomeni fisici, e quindi concorrono alla definizione della *sensazione* da parte dei fruitori. In particolare:

- l'età⁸⁰ ed il sesso determinano una variazione della soglia audiometrica⁸¹ in funzione della frequenza del suono; qui si considereranno soltanto segnali con frequenze di 125 e 1000 Hz, rappresentative le prime dell'inquinamento acustico proveniente dall'esterno, e le seconde dei rumori tipici nel campo del parlato e dell'ascolto di musica;
- altezza e peso consentono di determinare la superficie corporea degli individui⁸², che è un parametro fondamentale per stabilire la potenza termica che gli utenti immettono per dispersione nell'ambiente; questa concorre a determinare la temperatura all'interno dei locali, fondamentale nella stima del comfort termo igrometrico.

I dati indiretti a loro volta possono suddividersi in due sottocategorie: la prima comprende quelli che consentono di determinare le abitudini, gli impegni e le attività alle quali gli utenti sono soggetti; queste a loro volta consentono di stabilire quali unità ambientali essi frequentano, a quale ora del giorno e in quale *attività elementare* essi sono dediti⁸³. Nella seconda invece andranno considerate quelle caratteristiche che sono rappresentative (anche se soltanto parzialmente) della percezione della qualità della vita: purtroppo ad oggi non sono disponibili studi che consentano di mettere in relazione diretta lo *stress sociale*, inteso come il carico di difficoltà che le persone appartenenti ad una particolare *classe* devono affrontare nel condurre la propria esistenza, e la percezione del benessere, né tantomeno esistono indicatori largamente condivisi per misurare questo tipo di carico. D'altro canto in questo lavoro non si vuole tralasciare la possibilità di inserire delle valutazioni, anche se estremamente sintetiche, che tengano conto di questo

⁸⁰ L'età è rappresentativa di un decremento dell'acuità visiva alle distanze brevi (presbiopia) che si manifesta di solito a partire dai 40 anni, progredendo nel tempo; il difetto viene corretto, com'è noto, con l'uso di occhiali, per cui si considera che l'utente - fornito di lenti - torni visivamente normodotato. Per tale motivo si ritiene che non è necessario introdurre alcun algoritmo di modifica nella stima del comfort visivo.

⁸¹ Cfr. UNI EN ISO 7029:2002, *Acustica. Distribuzione statistica della soglia audiometrica in funzione all'età*.

⁸² Cfr 4.1.3.1.

⁸³ Cfr. M. Zaffagnini, *Per una progettazione esigenziale*, in M. Zaffagnini (a cura di), *Architettura a misura d'uomo*, Pitagora Editrice, Bologna 1994. Il concetto di attività elementare viene ripreso e sviluppato dall'Autore per l'edilizia residenziale ma, naturalmente, nulla vieta di estenderlo ad altre tipologie edilizie.

particolare ed importante aspetto. Si preleveranno quindi quei dati che verranno ritenuti rappresentativi della qualità della vita e che, attraverso il sistema di pesi caratteristico delle stime multicriteria, interverranno nella valutazione finale del livello di comfort. La natura delle informazioni da raccogliere sarà quindi di tipo⁸⁴:

- demografico, per descrivere la struttura della popolazione dal punto di vista dell'età e del sesso; in particolare è necessario conoscere la composizione, lo stato civile e il numero di componenti della famiglia (quest'ultimo solo nel caso di tipologie abitative);
- economico, per determinare il profilo lavorativo e la capacità di spesa; quindi occorre sapere i tassi di occupazione, i settori di attività e l'indice di povertà;
- culturale, per stabilire probabilisticamente, nella fascia d'età successiva a quella della scuola dell'obbligo, l'attività della popolazione;
- sanitario, allo scopo di definire la corporatura e lo stato di salute dichiarato degli utenti.

Tutti questi dati hanno l'obiettivo di orientare il progettista durante la scelta del *modello di comportamento*⁸⁵ degli utenti dell'organismo edilizio: non è infatti possibile presentare un metodo in grado di prevedere in modo certo l'evoluzione spaziale e temporale delle abitudini dei singoli fruitori, bensì se ne può proporre uno in grado di tracciare delle linee guida seguendo le quali il valutatore è in grado di giungere ad una definizione *plausibile* del profilo comportamentale sul quale effettuare la stima del comfort. Si tratta cioè di individuare, tra le infinite combinazioni, una probabile sequenza di azioni, ognuna delle quali viene svolta in una distinta unità ambientale appartenente all'immobile oggetto dell'analisi, o all'esterno di esso.

<i>Età</i>	<i>Anagrafico</i>	<i>Di studio</i>	<i>Lavorativo</i>
0	Neonati	Pre	
1÷4	Bambini	scolari	Non
5÷9	Fanciulli	Scolari	lavoratori
10÷14	Adolescenti		
15÷18			
19÷24	Ragazzi	Studenti	
25÷34			
35÷44	Adulti		Lavoratori
45÷54			
55÷64	Maturi	Post studenti	
65+	Anziani		Pensionati

Tabella 2-10 Suddivisione della popolazione in base a criteri anagrafici, di studio e lavorativi

Nell'ottica di semplificare il prelievo e l'organizzazione dei dati, è utile raggruppare gli utenti in fasce omogenee; naturalmente le ragioni in funzione delle quali effettuare la suddivisione variano di volta in volta, ma qui si vuole proporre un principio basato sull'età, in funzione della quale – molto spesso – è possibile individuare valori antropometrici comuni (altezza, peso) e modelli comportamentali simili. La Tabella 2-10 raccoglie undici fasce, a loro volta raggruppate utilizzando criteri anagrafici, di studio e lavorativi. Individuata la fascia d'età per ogni tipologia di utente, è possibile stabilire l'altezza media e la corporatura utilizzando le tabelle diffuse in ambito medico grazie alle quali si ricostruiscono tutti i dati di tipo diretto preceden-

⁸⁴ Tutti i dati sono disponibili a scala regionale sul sito istituzionale dell'Istat all'indirizzo www.istat.it.

⁸⁵ Cfr. M. Zaffagnini, *Per una progettazione esigenziale, op. cit.*

temente descritti⁸⁶. La definizione del modello di comportamento dovrà invece essere condotta ipotizzando, sulla scorta dell'età e dell'occupazione del tipo di fruitore, la successione di azioni elementari svolte; tale operazione sarà ripetuta nei diversi periodi della settimana o dell'anno durante i quali è probabile prevedere una variazione significativa nel modo di agire dei diversi utilizzatori⁸⁷. La Figura 2-13 mostra come raccogliere ed organizzare i dati che consentono di implementare il modello di comportamento, dove oltre ad indicare la collocazione temporale nel brevissimo periodo - e cioè ora per ora - si specifica anche la durata dell'azione⁸⁸.

ORARIO		ATTIVITÀ		AMBIENTE	
Ora	Minuti	Cod.	Descrizione	Cod.	Descrizione

Figura 2-13 Esempio di scheda per la raccolta dei dati relativi al modello di comportamento

Oltre a costituire gli elementi minimi nella descrizione del profilo comportamentale, occorre notare che le azioni elementari permettono di delineare in modo dettagliato le funzioni metaboliche, visive ed uditive ad esse connesse⁸⁹, consentendo di ricostruire, attraverso un'unica azione, il quadro esigenziale dell'utente sotto il profilo delle tre tipologie di comfort oggetto dello studio. È infatti possibile specificare per ogni azione una serie di indicatori in funzione dei quali far variare le differenti specificazioni di prestazione del benessere: in tal modo, il metodo restituirà una stima *dinamica* che varierà al variare dell'ora, del giorno, dell'unità ambientale e del modello di comportamento.

2.2.4 I dati spaziali, morfologici e funzionali

La possibilità di disporre di una cartografia in base alla quale sia possibile prelevare i dati spaziali, morfologici e funzionali è spesso limitata alla zona su cui insiste la località oggetto dell'analisi; molte volte occorre invece estendere la conoscenza del territorio ad una scala notevolmente ampia, con il conseguente aumento della difficoltà di reperimento delle informazioni. È anche vero, però, che all'aumentare della distanza diminuisce il margine di precisione; può quindi essere utile impiegare anche altri strumenti meno utilizzati in ambito architettonico: tra questi, il modello geo-potenziale della superficie terrestre EGM96, col suo sistema geodetico WGS84, costituisce una fonte estremamente precisa della forma della terra⁹⁰; oltre ad avere la possibilità di scaricare tutti i dati direttamente dal sito Internet del National Geospatial-Intelligence Agency⁹¹, è possibile accedere per la stessa via ad un'applicazione *on line* in grado di restituire l'altitudine in funzione delle coordina-

⁸⁶ Cfr. 4.1.3.1.

⁸⁷ Ad esempio, è molto probabile che il comportamento sia diverso nei giorni lavorativi rispetto a quelli festivi.

⁸⁸ È chiaro che nello spazio di un'ora - che rappresenta il tempo minimo nella scala temporale utilizzata dal metodo per eseguire le valutazioni - possono essere compiute diverse azioni elementari in ambienti differenti: nella stima del livello di benessere queste saranno valutate utilizzando appunto una media ponderata sul tempo.

⁸⁹ Per una descrizione dettagliata, cfr. § 2.3.

⁹⁰ L'accuratezza del modello non è costante su tutta la superficie terrestre ma la sua deviazione standard totale è di soli 40 cm. Nelle aree in cui mancano dati relativi al campo gravitazionale (3% circa) l'errore può essere anche di alcuni metri.

⁹¹ Sono infatti disponibili i dati nel linguaggio FORTRAN all'indirizzo http://earth-info.nga.mil/GandG/wgs84/gravitymod/wgs84_180/wgs84_180.html.

te geografiche⁹². Dovendo però raccogliere informazioni anche sul livello di antropizzazione del territorio, è più utile e rapido scegliere di utilizzare softwares di mappatura che combinano al modello WGS84 il rilievo fotografico della superficie – in base al quale è anche più semplice ricavare l'appartenenza della porzione osservata alle fasce riportate nella Tabella 2-3 in funzione dell'area costruita. Questi programmi possono essere utilmente impiegati anche per determinare la distanza tra due punti; qualora però fossero note le loro coordinate geografiche, è possibile utilizzare una delle formule disponibili per calcolare la distanza ortodromica, grazie alla quale si può automatizzare il processo usando direttamente un foglio di calcolo o un database⁹³. Un altro motivo per adoperare questi strumenti consiste nella possibilità di importare direttamente in programmi di disegno CAD la superficie di una porzione della geode, grazie alla quale si può individuare forma e dimensione degli ostacoli naturali: esiste pure l'eventualità di implementare l'intero modello WGS84 all'interno di un database, in modo da determinare questi dati in via automatizzata, ma richiederebbe specifiche competenze di programmazione e risorse umane che esorbitano i limiti di questa ricerca. Per evitare di estendere l'osservazione ad aree del territorio che di fatto non influenzano la valutazione delle caratteristiche fisiche, occorre stabilire un criterio per determinare la distanza massima oltre la quale è inutile raccogliere i dati. Per individuare la linea di orizzonte, necessaria a valutare il soleggiamento – e quindi l'irraggiamento e l'illuminamento –, occorre conoscere l'altitudine del punto di osservazione e quella del massimo rilievo presente nella zona; noti questi dati, è possibile operare una costruzione trigonometrica in base alla quale si può determinare la distanza limite; la Tabella 2-11 elaborata per questo studio ne fornisce alcuni valori in funzione delle due altitudini (queste sono espresse in metri, mentre le distanze sono in chilometri). Si evince quindi che le scale spaziali di osservazione sono quella globale e quella territoriale. Adottando il brevissimo periodo di un'ora come riferimento temporale minimo, le direzioni di osservazione diventano 24, poste ad intervalli regolari di 15°; la Figura 2-14 mostra il profilo dell'orizzonte geografico che si ricava utilizzando questo metodo⁹⁴. A causa della distanza che intercorre tra il punto di osservazione e l'ostacolo, l'errore di parallasse che si ottiene spostandosi in un'altra posizione dell'edificio è trascurabile, per cui questa linea di contorno può essere a tutti gli effetti considerata invariante. Ostacoli più vicini di un chilometro dal luogo di calcolo hanno invece angoli di osservazione paragonabili a quelli dei rilievi naturali più lontani: a scala urbana e di edificio quindi diventa necessario individuarne posizione e altezza, perché possono rappresentare degli ostacoli che contribuiscono a modificare la linea di orizzonte. È così necessario disporre di cartografie o aerofotogrammetrie a scala adeguata (1:2000 o 1:1000) che consentano di definire l'altitudine del terreno, la posizione dei singoli edifici, e l'altezza degli stessi⁹⁵. Posizionando un opportuno sistema di riferimento nel

⁹² Cfr. http://earth-info.nga.mil/GandG/wgs84/gravitymod/wgs84_180/intptW.html.

⁹³ Cfr. § 4.1.1.1.

⁹⁴ Il profilo è privo degli ostacoli artificiali costituiti dalle costruzioni. Il punto di osservazione è posto a 40°51'12" N e 14°14'54" E ad una quota di 80 metri s.l.m..

⁹⁵ Può essere utile consultare siti che permettono di vedere alcune immagini del territorio secondo diverse angolazioni dall'alto (Bing maps™) o dalla strada (Google Maps™ in modalità *street view*), in modo da poter avere un riferimento per una stima approssimata delle altezze (ad esempio, contando il numero dei piani). Di solito, quando non sono disponibili questo tipo di mappature fotografiche, il

baricentro dell'area di sedime dell'unità immobiliare oggetto della stima, è possibile tracciare le 24 direzioni – a partire dal Nord – per rilevare la distanza dei fabbricati esistenti e le relative dimensioni.

		Altitudine del punto di osservazione										
		0	100	200	400	800	1000	1500	2000	2500	3000	4000
Altitudine del maggior rilievo topografico	0	0	36	50	71	101	113	138	160	178	195	226
	100	36	71	86	107	137	149	174	195	214	231	261
	200	50	86	101	122	151	163	189	210	229	246	276
	400	71	107	122	143	172	184	210	231	250	267	297
	800	101	137	151	172	202	214	239	261	279	296	327
	1000	113	149	163	184	214	226	251	272	291	308	339
	1500	138	174	189	210	239	251	276	298	317	334	364
	2000	160	195	210	231	261	272	298	319	338	355	385
	2500	178	214	229	250	279	291	317	338	357	374	404
	3000	195	231	246	267	296	308	334	355	374	391	421
	4000	226	261	276	297	327	339	364	385	404	421	451

Tabella 2-11 Distanze massime di osservazione in funzione delle altitudini

Vista la vicinanza degli ostacoli (al di sotto di un kilometro), l'orizzonte si modifica notevolmente in funzione del punto di osservazione; scegliendo però l'origine nel baricentro, anche se il punto di vista varia (ad esempio da un'unità ambientale all'altra), l'errore di declinazione resta sempre contenuto entro valori accettabili, mentre dovrà essere rivalutata l'altezza angolare di osservazione in quanto la distanza dagli altri edifici può variare sensibilmente⁹⁶.

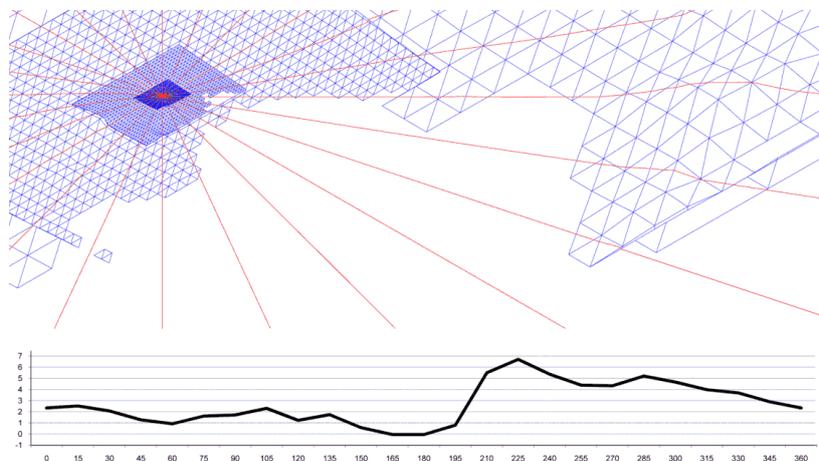


Figura 2-14 Determinazione della linea geografica di orizzonte

La definizione dello *sky line* intorno all'edificio consente di avere le informazioni necessarie per stimare numerose variabili, quali ad esempio l'irraggiamento e l'illuminamento delle facciate; altri fenomeni, come la ventilazione o la pressione sonora, sono invece influenzati dalla morfologia degli spazi che si aprono immediatamente intorno alla costruzione in oggetto. Data l'enorme varietà di situazioni che possono verificarsi, e considerando che l'obiettivo non è quello di eseguire una accurata classificazione delle forme che gli spazi esterni possono assumere, ma piuttosto di raccogliere i dati ne-

luogo non è fortemente urbanizzato, per cui possono ipotizzarsi costruzioni non particolarmente alte (2÷3 piani).

⁹⁶ Cfr. §4.1.1.1.

cessari a formulare una previsione delle condizioni al contorno che possono influenzare la percezione del benessere da parte degli utenti, si propone di ridurre tutti i possibili casi ad un unico modello teorico, dove i prospetti dell'edificio sono prospicienti ad un'area di forma rettangolare, più o meno regolarmente contornata da altri edifici (Figura 2-15). Distanza e area delle diverse superfici che determinano l'invaso sono determinate eseguendo delle semplici medie aritmetiche: si ottiene così una rappresentazione della realtà sufficientemente significativa per gli scopi che questo lavoro si prefigge.

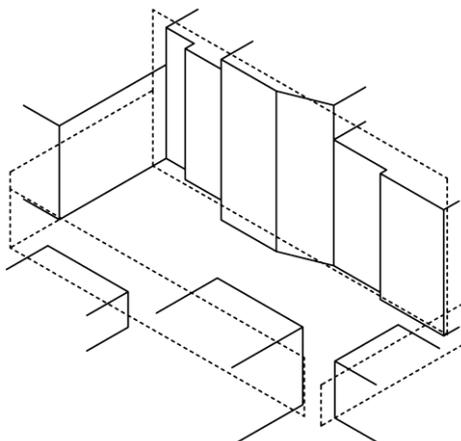


Figura 2-15 Invaso determinato in funzione delle aree e delle distanze medie

Dal punto di vista funzionale, le aree esterne possono essere considerate come dei "contenitori" all'interno dei quali vengono svolte diverse attività; queste a loro volta influiscono sul livello di inquinamento acustico presente, e quindi sul benessere finale. Avendo già considerato a scala urbana le principali e più comuni fonti di rumore, sarà necessario individuare soltanto quelle particolari *emergenze funzionali*, caratterizzate cioè da grande afflusso di persone o merci e/o da orari notturni o festivi. Fortunatamente la dislocazione sul territorio di questi particolari esercizi è facilmente ricavabile perché l'informazione è disponibile su numerosi portali, che tra l'altro vengono costantemente aggiornati⁹⁷. In particolare occorrerà individuare a scala di edificio la presenza di locali adibiti ad attività:

1. Produttive, commerciali, per l'amministrazione, giudiziarie;
2. Fieristiche;
3. Sanitarie;
4. Scolastiche, universitarie e culturali;
5. Per lo spettacolo;
6. Per la ristorazione.

L'elenco è stato redatto cercando di raggruppare funzioni che possano considerarsi omogenee dal punto di vista dell'inquinamento acustico. Per ognuna è stato ipotizzato un profilo di emissioni sonore che potrà impiegarsi nella stima della pressione esercitata sui prospetti che si affacciano sull'area in esame⁹⁸. Codicizzando poi tali aree esterne, delle quali dovranno specificarsi le caratteristiche dimensionali dell'invaso⁹⁹, sarà più semplice la stima delle condizioni al contorno dei singoli locali oggetto della valutazione.

⁹⁷ Ad esempio, è possibile consultare i siti Google Maps™, Bing maps™, www.paginegialle.it, www.tuttocitta.it.

⁹⁸ Cfr. § 4.1.1.3.

⁹⁹ Cfr. § 4.1.2.1.

Cod.	Descrizione	Altitud.	Altezza	Largh.	Inclinaz.
		m	m	m	deg
Fronti intorno all'edificio		Altitud.	Altezza	Largh.	Distanza
		m	m	m	m
Antistante					
A destra					
A sinistra					
Infrastrutture verso le quali è orientato il fronte		Cod.	Cod.	Cod.	Cod.
A scala urbana					
A scala di edificio					

Figura 2-16 Esempio di scheda per la raccolta dei dati relativi ai fronti

Grande importanza poi riveste l'individuazione delle funzioni svolte all'interno degli ambienti a diretto contatto con l'unità immobiliare in quanto anche queste, come le aree esterne, condizionano il livello di benessere percepito. Tali ambienti possono appartenere allo stesso edificio o essere all'interno di costruzioni adiacenti ad esso: in entrambi i casi è possibile considerare le funzioni che vi si svolgono come indicatori sintetici degli andamenti delle temperature e delle pressioni sonore. Purtroppo non è quasi mai possibile conoscere l'esatta destinazione di un locale non appartenente al progetto in analisi, per cui si propone qui di sviluppare profili termici ed acustici che siano dipendenti dalle tipologie edilizie descritte nella Tabella 2-12, ricavate rielaborando la suddivisione adottata nel Manuale Hoepli di Progettazione Edilizia¹⁰⁰.

Tipologia edilizia	Sotto Tipologia	Tipologia edilizia	Sotto Tipologia
1. Residenziale	1.1 Abitazione	8. Per lo sport	8.1 All'aperto
	1.2 Resid. universitaria		8.2 Al chiuso
	1.3 Resid. provvisoria		8.3 A cavallo
2. Produttiva	2.1 Agricola	9. Per l'amministrazione	8.4 A motore
	2.2 Industriale		9.1 Regioni
	2.3 Artigianale		9.2 Province
	2.4 Terziaria (uffici)		9.3 Comuni
	2.5 Finanziaria (banche)		10.1 Preture, tribunali
	2.6 Postale		10.2 Carceri
3. Commerciale	3.1 Al dettaglio (negozi)	10. Giudiziaria	10.1 Preture, tribunali
	3.2 Supermercati	11. Sanitaria	10.2 Carceri
	3.3 Centri commerciali		11.1 Poliambulatori e day hospital
	3.4 Ingrossi		11.2 Osped., cliniche
4. Fieristica	11.3 Resid. di cura		
4. Fieristica	4.1 Mercati	12. Per la ristorazione	12.1 Ristoranti
	4.2 Fiere	13. Ricettiva	12.2 Bar
5. Scolastica	5.1 Scuole primarie		13. Ricettiva
	5.2 Scuole secondarie	13.2 Ostelli	
	6. Universitaria e culturale	6.1 Amministrazioni	
6. Universitaria e culturale	6.2 Dipartimenti	14. Per il trasporto	13.4 Villaggi
	6.3 Aule e laboratori		14.1 Autorimesse
	6.4 Biblioteche		14.2 Stazioni
	6.5 Musei		14.3 Aeroporti
	7. Per lo spettacolo		7.1 Teatri, sale da conc.
7. Per lo spettacolo	7.2 Cinema e auditorium	16. Cimiteriale	16.1 Cappelle

Tabella 2-12 Tipologie e sotto tipologie edilizie

Per ognuna di esse, quando possibile, devono distinguersi i seguenti locali:

- depositi, cioè adibiti allo stoccaggio di materiale, scarsamente frequentati;
- connettivi, cioè destinati al passaggio di cose e persone, molto frequentati;

¹⁰⁰ Cfr. F. Zaffagnini, Indice Analitico Vol.1 in *Manuale di Progettazione Edilizia*, Hoepli, Milano 1992.

- di servizio, e quindi di supporto alle attività principali, poco frequentati (dal personale o dalle persone che saltuariamente se ne servono);
- principali, e cioè all'interno dei quali si svolgono le funzioni più importanti e rappresentative, intensamente frequentati, ovvero frequentati dalla maggior parte degli utenti di quella particolare tipologia edilizia.

Naturalmente anche qui potranno utilizzarsi codici per l'individuazione univoca dei diversi locali, ai quali andranno associate le tipologie edilizie ed il tipo di locale. Terminata la definizione degli ambienti e delle funzioni che si trovano intorno ed a contatto con l'area di interesse, occorre ora stabilire i criteri per suddividere gli spazi interni ad essa; questi costituiranno le *unità ambientali*, intese come gli spazi minimi all'interno dei quali le caratteristiche fisiche possono considerarsi costanti. Per tale motivo, una stanza può essere suddivisa in ulteriori *clusters* che costituiscono delle unità ambientali a sé, anche se a livello funzionale esse appartengono allo stesso spazio fisico¹⁰¹. Per poter distinguere le diverse unità, si propone comunque di adottare criteri di omogeneità e regolarità geometrica; dopo aver individuato i diversi locali in funzione delle chiusure e partizioni che li delimitano, questi dovranno essere suddivisi ulteriormente in modo da ottenere unità caratterizzate da uguale quota di calpestio, stessa altezza media e pianta regolare, e cioè di forma rettangolare, romboidale, poligonale regolare o circolare. È però consigliabile di *clusterizzare* in modo attento gli ambienti evitando frammentazioni inutili che portano soltanto ad un appesantimento del modello¹⁰². Ogni unità ambientale sarà quindi caratterizzata da:

- un codice che la individui univocamente;
- la sua estensione superficiale (area calpestabile);
- la sua altezza media;
- le chiusure, gli infissi presenti su di esse ed il codice degli spazi esterni dai quali è separata;
- le partizioni che la delimitano dai diversi ambienti interni, i relativi infissi ed i codici degli spazi interni ad essa adiacenti.

Nel corso delle diverse valutazioni, sarà spesso necessario fare riferimento alle dimensioni ed alla forma dei diversi ambienti; per evitare di dover inserire un numero di dati considerevole (perimetro, fattori di forma, geometria della pianta, coordinate dei vertici che la delimitano, etc.), si propone di considerare tutti gli ambienti a pianta quadrata: in tal modo, *la lunghezza rappresentativa* degli stessi sarà pari alla radice quadrata dell'area, ed il *centro geometrico* cadrà nel punto medio di tale lunghezza. Questa approssimazione, che può apparire a prima vista molto grossolana, consente però di snellire notevolmente le procedure di valutazione; a ciò si aggiunge che i criteri di individuazione delle unità ambientali tendono comunque a suddividere lo spazio in elementi geometrici regolari, riducendo così l'errore di valutazione che si compie nella semplificazione adottata.

2.2.5 I dati tecnici e tecnologici

Le caratteristiche tecniche, al pari di quelle geometriche e funzionali, giocano un ruolo fondamentale nella determinazione delle proprietà fisiche

¹⁰¹ La qualità ambientale contraddistingue quelle caratteristiche fisico-ambientali dell'ambiente costruito, mentre quella funzionale è espressione di fattori geometrico-funzionali e di organizzazione degli spazi. Cfr. UNI 10838, *op. cit.*

¹⁰² Ad esempio, se in un ambiente si aprono alcuni piccoli vani, come vecchi passaggi murati, non sarà certo necessario scomporre l'ambiente in due unità.

delle unità ambientali. Occorrerà quindi mettere in atto una strategia di raccolta, sistematizzazione, prelievo ed elaborazione dei dati tecnici che qualificano i diversi elementi utilizzati nella costruzione allo scopo di valutare rapidamente le specifiche di prestazione tecnologiche e, in ultima battuta, quelle di prestazione ambientale che influenzano la percezione del benessere da parte degli utilizzatori.

Per fare ciò ci si avvarrà dei criteri adottati dal Sistema Tecnologico, che si prestano naturalmente ad assolvere problemi di classificazione e scomposizione degli organismi edilizi: si farà quindi riferimento ai tre livelli previsti nella norma¹⁰³, ai quali si aggiungono gli ultimi due, e cioè:

1. classi di unità tecnologiche;
2. unità tecnologiche;
3. classi di elementi tecnici;
4. elementi tecnici;
5. sub elementi, componenti e materiali.

Ai fini della valutazione del benessere dovranno essere catalogate soltanto le classi tecnologiche *Chiusure* e *Partizioni interne* che, nel meccanismo sorgente - schermo - bersaglio, rappresentano l'ostacolo fisico che separa l'utente dallo spazio esterno o dagli altri ambienti; per poterne definire quindi le principali caratteristiche che ne determinano il comportamento, sarà opportuno costruire appositi *abachi* di elementi tecnici (livello 4) e di sub elementi (livello 5) da impiegare nel metodo. In particolare, è possibile notare che, mentre l'abaco degli elementi deve essere redatto ad ogni valutazione, quello dei sub elementi, una volta compilato utilizzando le note caratteristiche dei materiali reperibili in letteratura tecnica, costituisce un elenco che può essere utilizzato sempre; quando si introduce, per effetto dell'innovazione o del trasferimento tecnologico, un nuovo componente in edilizia, questo potrà essere aggiunto al database, e reimpiegato nelle successive stime. In particolare, l'abaco dei sub elementi dovrà elencare densità, conduttività e capacità termica (o in alternativa massa areale e trasmittanza), e coefficiente di trasmissione ottica - quest'ultimo impiegato soltanto nei componenti finestrati.

Gli abachi degli elementi saranno invece diversificati secondo i principi della scomposizione tecnologica; verranno cioè redatti elenchi diversificati per pareti verticali, solai ed infissi, distinti per chiusure e partizioni interne, in quanto il comportamento termico differisce in funzione della tipologia di direzione del flusso (orizzontale o verticale) e del tipo di spazio che separa l'elemento (chiuso o aperto).

Cod.	Descrizione	Densità ρ kg m ⁻³	Condut. λ Wm ⁻¹ K ⁻¹	Cap.term. c Jkg ⁻¹ K ⁻¹	Trasm.ott. τ <i>adim.</i>

Figura 2-17 Esempio di tabella per la catalogazione dei diversi materiali

Inoltre, adottando i consueti codici per individuare le diverse parti della costruzione, è più comodo separare gli elementi in classi omogenee invece di disporli in lunghe liste di difficile consultazione. Dal punto di vista della raccolta dei dati, pareti e solai differiscono dagli infissi in quanto questi ultimi sono dotati, a volte, di una parte trasparente; per tale motivo le relative tabelle dovranno essere necessariamente diversificate, come si vede nella Figura 2-18.

¹⁰³ Cfr. UNI 8290-1, *op. cit.*. In particolare, la norma individua esplicitamente i primi tre, e specifica le caratteristiche dei restanti che possono essere introdotti a discrezione.

Pareti e solai			
Cod.	Descrizione		P. term.
Materiali costituenti la sezione			
	Cod	Descrizione	Spess.
			m
Lato A			
C. aria			
Lato B			

Infissi					
Cod.	Descrizione			Tenuta	Chius.
Parte vetrata					
	Cod	Descrizione	Spess.	Largh.	Altezza
			m	m	m
Vetro					
Telaio					
Parte opaca					
	Cod	Descrizione	Spess.	Largh.	Altezza
			m	m	m
Lato A					
Lato B					

Figura 2-18 Esempio di tabelle per la raccolta dei dati relativi a pareti, solai e infissi

Terminata la compilazione degli abachi, il processo di *ricomposizione tecnologica*¹⁰⁴ continua collocando spazialmente i diversi elementi, mettendo così in collegamento le parti che costituiscono l'edificio (o la porzione di esso oggetto della valutazione); ciò può avvenire grazie ad una rete relazionale che interconnette le unità ambientali (UA) con gli ambienti esterni all'aperto (AA) ed al chiuso (AC) grazie proprio agli elementi tecnici (ET), con un diagramma concettuale che somiglia a quanto schematizzato nella Figura 2-19. È importante stabilire che mentre due unità ambientali possono avere diversi elementi tecnici che le separano, un elemento tecnico separa sempre e soltanto due unità ambientali, in un rapporto che lega ambienti ed elementi del tipo *uno-a-molti*.

Per semplificare il passaggio di dati e utilizzare la *ridondanza programmatica* che la codicizzazione consente di sfruttare¹⁰⁵, è opportuno definire i *prospetti* dell'unità immobiliare come elemento intermedio tra il fronte, così come individuato nel § 2.2.4, e la chiusura vera e propria: si immagina cioè di costruire una struttura piramidale al vertice della quale ci sono i fronti, costituiti da diversi prospetti, ognuno dei quali è composto da differenti chiusure; ciò consente di non dover ripetere ogni volta dati comuni

¹⁰⁴ L'implementazione dei dati qui proposta ripercorre al contrario l'articolazione della nota scomposizione tecnologica, che, attraverso un approccio *top-down*, parte dai livelli più generali delle classi per giungere agli elementi tecnici; qui invece, per semplici motivi di praticità, si utilizza una modalità *bottom-up*.

¹⁰⁵ Cfr. S. Mecca, *Il progetto edilizio esecutivo*, NIS, Roma 1991.

ai diversi elementi tecnici, riducendo sia i tempi di implementazione e modifica che i rischi di errore, anche e soprattutto nell'ottica di utilizzare semplici fogli di calcolo in grado di rendere meccanica questa operazione¹⁰⁶.

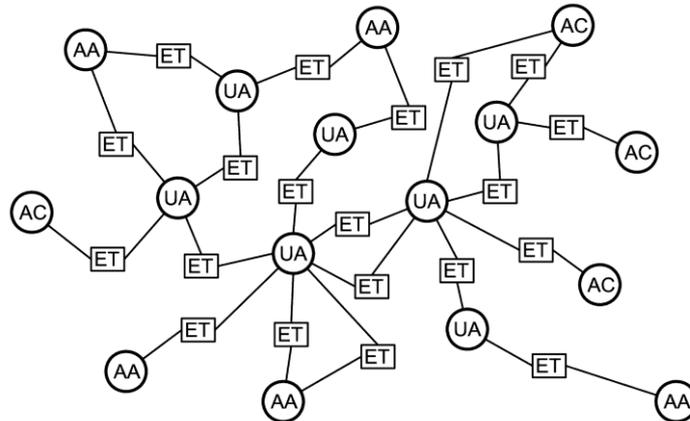


Figura 2-19 Rete di collegamento tra diverse unità ambientali tramite gli elementi tecnici

Mentre i fronti possono essere composti da superfici aventi diversa inclinazione (anche se nell'implementazione se ne indica una media, come mostra la Figura 2-15), un prospetto deve essere almeno quasi complanare, in modo che ogni chiusura giacente su di esso ne erediti la direzione ed i coefficienti di pressione, agevolando le operazioni di stima relative alla ventilazione ed al soleggiamento.

Cod	Descrizione	Cod fronte	Incl.	Quota	Dist.	Lun.	Larg.	Alt.	Ass.	x	y
			deg	m	m	m	m	m	m	ad.	m

Figura 2-20 Esempio di tabella per la raccolta dei dati relativi ai prospetti

Per facilitare la valutazione dell'irraggiamento, è possibile indicare per ognuno di essi eventuali sporgenze e aggetti che possano proiettare delle ombre (Figura 2-21), evitando di ripetere questa informazione per ogni chiusura, riducendo i tempi di inserimento dei dati. La Figura 2-22 mostra lo schema di riferimento per raccogliere le informazioni relative agli ostacoli e la loro posizione nello spazio.

Cod.	Sinistra			Superiore			Destra		
	Dist.	Sporg.	Alt.	Dist.	Sporg.	Lungh.	Dist.	Sporg.	Alt.
	m	m	m	m	m	m	m	m	m

Figura 2-21 Esempio di tabella per la raccolta dei dati relativi alle sporgenze presenti

A questo punto sono disponibili:

- i dati ambientali, costituiti dall'elenco delle unità ambientali (UA) appartenenti all'immobile oggetto della stima, e degli ambienti al chiuso (AC) ed all'aperto (AA) esterni ad esso;
- i dati spaziali, formati dalla lista dei prospetti;
- i dati tecnologici, composti dai differenti elementi tecnici, distinti in chiusure e partizioni, a loro volta separati in pareti, solai ed infissi.

¹⁰⁶ Dal punto di vista qualitativo, i prospetti sono elementi della scomposizione funzionale-spaziale ma la loro utilità è evidente soltanto quando nasce l'esigenza di ridurre al minimo la ripetizione delle informazioni comuni a diverse chiusure, ed è il motivo per cui tale argomento è stato trattato in questo paragrafo.

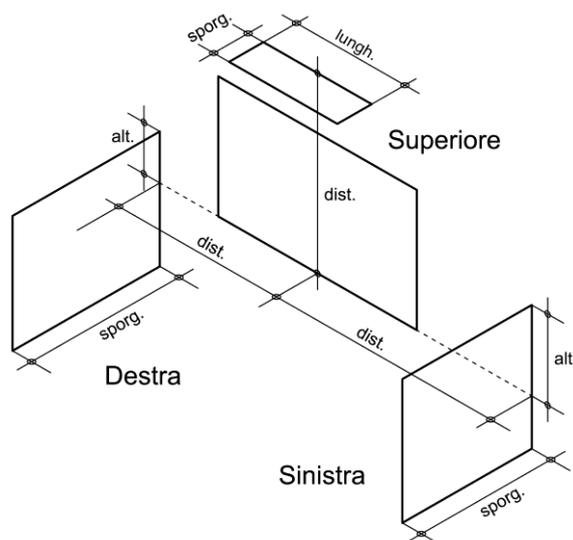


Figura 2-22 Schema di riferimento per implementare aggetti e sporgenze relative ad un prospetto. Sono quindi pronti tutti gli elementi necessari a completare il processo di ricostruzione schematizzato nella Figura 2-19. Le strategie di raccolta ed organizzazione dei dati che vengono proposte sono diverse tra chiusure e partizioni perché differenti sono le sollecitazioni fisiche a cui gli elementi vengono sottoposti. Per quelli a contatto con gli ambienti all'aperto, è più semplice inserire i dati per unità ambientale, come nel diagramma riportato in Figura 2-23: in questo modo è possibile sfruttare le relazioni uno-a-molti esistenti tra unità ambientale e chiusure opache, e tra queste e gli infissi.

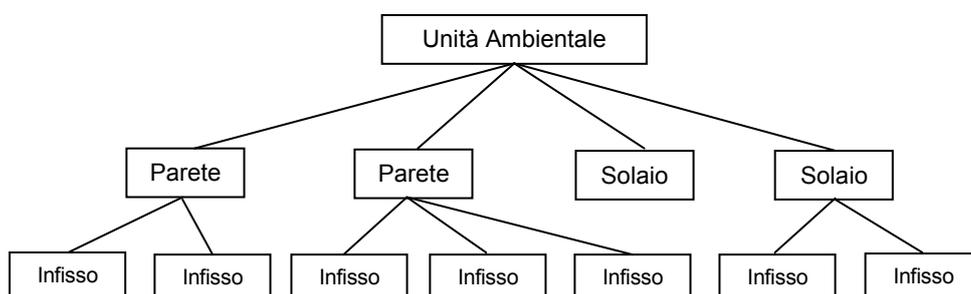


Figura 2-23 Schema di relazioni uno-a-molti tra unità ambientali e chiusure

Unità ambientale		Cod.	Descrizione:									
Chiusure opache	Cod.	Descrizione						Inf.	Vert.	Cod.	Sup.	Area
							adim.	adim.	adim.	adim.	m ²	
	Infissi	Cod.	Sinistra			Superiore			Destra			
Dist.			Sporg.	Alt.	Dist.	Sporg.	Alt.	Dist.	Sporg.	Alt.		
m			m	m	m	m	m	m	m	m	m	

Figura 2-24 Esempio di tabella per la raccolta delle chiusure di ogni unità ambientale

Tutto ciò può essere implementato utilizzando un'apposita scheda (Figura 2-24), nella quale siano riportate l'unità ambientale, l'elemento tecnico opaco (solaio o parete)¹⁰⁷, la tipologia (solaio inferiore o superiore, parete; in

¹⁰⁷ Dato che le sezioni delle pareti e dei solai possono essere asimmetriche, nel caso delle chiusure può essere conveniente intendere per convenzione che negli abachi delle sezioni si intenda, ad esempio, che il lato A sia per le pareti quello interno, mentre per i solai rappresenti la faccia superiore; in questo modo non si è costretti a specificare ulteriori dati relativi

quest'ultimo caso occorrerà anche indicare il codice del prospetto a cui appartiene), la sua superficie, ed il codice degli infissi che eventualmente si aprono su di essi (specificando, quando questi sono verticali, la presenza di possibili aggetti utilizzando la stessa convenzione impiegata per i prospetti, riportata nella Figura 2-22). Diversa è la raccolta dati delle partizioni interne che, separando sempre due ambienti chiusi, non sono soggette a fenomeni di irraggiamento, per cui non occorre specificare l'orientamento o la presenza di sporgenze; inoltre, in questo caso è opportuno inserire le informazioni partendo dall'elemento tecnico opaco, indicandone il codice, le unità ambientali che divide, l'area lorda, eventuali superfici vuote (come, ad esempio, vani di passaggio sprovvisti di porta), e gli infissi che si aprono su di esso (Figura 2-25).

Partizione opaca (pareti, solai)			Cod.	Descr.				
Un. ambientali	Lato A	Cod.	Descrizione	Area m ²	Vuoto m ²	Lato B	Cod.	Descrizione
	Infissi	Cod.		Descrizione		Area m ²		

Figura 2-25 Esempio di tabella per la raccolta delle partizioni interne

I complessi legami relazionali individuati - che connettono strettamente i diversi elementi tecnici tra loro, e che mettono in rapporto questi con le unità ambientali e spaziali - consentono di ottenere una descrizione sufficientemente accurata dell'Architettura, in quanto permettono di rappresentare una parte importante del multiforme organismo edilizio.

2.3 I fattori per la valutazione del comfort

La formulazione di un sistema di valutazione del comfort deve tener conto di diversi parametri, soprattutto in virtù della complessità del fenomeno, frutto di una stretta interazione tra uomo ed ambiente, e tra aspetti fisici e psicologici. Mutuando ed generalizzando la definizione di comfort dalla norma americana¹⁰⁸, questo può essere inteso come *atteggiamento mentale di soddisfazione per l'ambiente*, per cui una misura della sua specifica di prestazione deve necessariamente avere un approccio di tipo fisiologico, che tracci l'evoluzione nello spazio e nel tempo degli indicatori che descrivono il fenomeno. Dovendo cercare un sistema di stima adeguato, sembra opportuno orientare la scelta impiegando alcuni principi contenuti all'interno del corpo di norme che regolano la definizione e valutazione del *carico di lavoro mentale* il quale, in ambiti diversi¹⁰⁹, approccia il problema della relazione intercorrente tra gli stati cerebrali e le prestazioni umane. Si potrebbe quindi proporre di misurare il comfort proporzionalmente al livello di soddisfazione che l'utente percepisce durante lo svolgimento delle diverse azioni elementari; in tal modo, sono da considerarsi elementi di discomfort tutti quegli ostacoli - fisici e psicologici - che si frappongono tra la persona ed il compito da portare a termine. È così possibile inquadrare le diverse tipologie di comfort come aspetti differenti che concorrono a favorire o intralciare la corretta esecuzione di una funzione.

¹⁰⁸ Cfr. ASHRAE Standard 55, *op. cit.*

¹⁰⁹ Cfr. UNI EN ISO 10075-1:2003, *Principi ergonomici relativi al carico di lavoro mentale - Termini generali e definizioni*. La norma si applica sui luoghi di lavoro.

La norma¹¹⁰ definisce poi le nozioni di *stress* e *strain*, dove il primo annovera tutte le influenze esterne esercitate su una persona, mentre il secondo rappresenta la risposta immediata alla sollecitazione; la catena relazionale che viene indicata è quindi del tipo stress → strain → risposta mentale, dove la reazione dell'utente può essere positiva (*eustress*) o negativa (*fatica mentale*)¹¹¹. È molto importante sottolineare come la fatica sia «condizionata da intensità, durata e andamento temporale dello strain mentale precedente»¹¹², affermando il principio secondo il quale il carico di lavoro deriva tanto da sollecitazioni che in quel momento vengono subite dalla persona, quanto dallo stress accumulato prima dello svolgimento dell'azione. Questi concetti possono essere utilmente trasferiti nel modello, anche se ancora una volta è opportuno ribadire che il benessere umano è un fenomeno complesso, per cui tentare di individuare *tutti* gli indicatori che lo descrivono in modo completo è impossibile per due motivi:

- il numero delle variabili è estremamente elevato e mutevole, quindi occorrerebbe uno strumento hardware con una ingente potenza di calcolo, che ridurrebbe notevolmente le probabilità di diffusione ed utilizzo del metodo;
- anche affidandosi a macchine con grandi prestazioni, l'operazione di formattazione dei parametri - e cioè di attribuzione dei valori iniziali dei differenti dati che descrivono il problema - potrebbe essere estremamente difficile o addirittura impossibile, perché molti di essi possono dipendere da condizioni contingenti che in fase di stima sono imponderabili.

Per tali motivi in questo lavoro verranno considerati soltanto quegli indicatori che sono ragionevolmente valutabili: sarà evitata anche la presenza di variabili le quali, pur rappresentando elementi importanti nella previsione del comfort, non sono facilmente inicializzabili; ciò consentirà di ottenere un metodo forse meno preciso, ma certamente più stabile perché non dipende da dati il cui valore in input deve necessariamente derivare da ipotesi e precarie congetture. Si propone quindi di impiegare una struttura concettualmente simile a quella riportata nella norma per la determinazione del carico di lavoro mentale, ma per certi versi più semplice perché - come già detto - non può tener conto di tutti i meccanismi che concorrono alla completa descrizione del fenomeno. Per ogni attività elementare saranno perciò specificate tre diverse sub-attività: metabolica, visiva e uditiva, che descrivono il lavoro fisico e mentale, e le funzioni che coinvolgono i sensi della vista e dell'udito, alle quali l'utente è soggetto. Queste a loro volta consentono di stabilire cinque diverse tipologie di impegno: fisico, mentale¹¹³, termo-igrometrico, visivo ed uditivo, che a loro volta devono essere valutati sincronicamente e diacronicamente utilizzando due diverse famiglie di indicatori. La prima tiene conto delle sollecitazioni che intervengono contemporaneamente sull'uomo nel momento in cui svolge una particolare azione; la seconda raccoglie l'andamento nel tempo del susseguirsi giornaliero delle diverse attività, dove vengono spese o recuperate risorse psicofisiche attraverso l'alternarsi di lavoro e riposo del soggetto.

¹¹⁰ *Ivi.*

¹¹¹ *Ivi.*

¹¹² *Ibidem.*

¹¹³ Per impegno mentale qui si intende un concetto meno esteso rispetto alla fatica o al carico di lavoro, e cioè indica l'aliquota di consumo energetico che viene conteggiata nella stima del metabolismo totale.

Dato che la percezione del benessere dipende da numerosi fattori psicofisici, è importante stabilire delle *condizioni standard* nelle quali si ipotizza che si trovi l'utente durante le operazioni di inizializzazione dei diversi parametri che descrivono gli indicatori adottati, lasciando il compito ad un gruppo di indici psicologici il compito di modificare il valore finale quando dovessero verificarsi situazioni diverse da quelle presupposte. Si ipotizzerà quindi che l'utente sia impegnato in un'attività *neutra*, e cioè che compie abitualmente, per la quale non prova alcuna particolare sensazione di piacevolezza o spiacevolezza, e che esegue senza che sussista alcuna coerenza; queste possono essere applicate ad un gran numero di azioni elementari, ed è per questo motivo che saranno considerate uno standard di riferimento.

2.3.1 L'impegno metabolico e lo stress igrotermico

Per *impegno metabolico* di un utente si intende l'onere causato dal consumo di energie durante lo svolgimento di un'attività elementare. La potenza spesa è funzione dell'azione compiuta, ed è facilmente determinabile grazie alle note tabelle disponibili nel corpo normativo europeo¹¹⁴; comparando i diversi dati, è poi possibile scomporre il dispendio energetico in quattro aliquote differenti, dovute: al metabolismo basale (invariabile), all'attività mentale, all'attività fisica ed alla postura. Suddividendo il tasso nelle diverse quantità è più semplice attribuire i valori relativi alle differenti attività elementari, sfruttando la Tabella 2-13, nella quale il metabolismo basale (del valore stimato di 40 W m^{-2}) non è stato inserito perché è indipendente dal lavoro da svolgere. Come di consueto, i valori sono riferiti alla superficie corporea dell'utente che, come già detto, varia in funzione dell'età e della corporatura¹¹⁵. L'energia spesa viene poi *recuperata* dal corpo durante i pasti, che rappresentano quindi il momento in cui il metabolismo subisce una sollecitazione de-stressoria; ne consegue che gli indicatori che descrivono l'impegno devono essere di due tipi, e specificare:

- quando il tasso metabolico - diviso tra fisico¹¹⁶ e mentale - supera alcuni valori soglia, oltre i quali l'utente può avvertire sensazioni di fatica, o si riduce entro certi limiti, tanto da generare un senso di riposo;
- quando il consumo energetico raggiunge dei limiti prefissati, fino ad indurre stanchezza, o viene integrato attraverso l'assunzione di cibo.

Si suggerisce, per valutare il primo, di adottare una scala a quattro valori da 0 a 3, ai quali (Tabella 2-14) corrispondono diversi stimoli fisiologici, cioè quelle sensazioni che l'utente percepisce in condizioni standard. Il valore da confrontare è la media matematica dei valori di potenza per unità di superficie che si riscontrano a partire dalle due ore precedenti quella della stima¹¹⁷: in tal modo si tiene conto del perdurare o meno delle condizioni di stress sull'individuo.

¹¹⁴ Cfr. UNI EN ISO 8996, *op. cit.*.

¹¹⁵ Un uomo di corporatura media impegnato in un lavoro di concetto (attività mentale media, seduto, attività fisica leggera) consuma giornalmente quasi 5.900 kJ, pari a circa 2.500 kcal, che rappresenta appunto il metabolismo tipico di questa categoria di utente.

¹¹⁶ Nel tasso fisico occorrerà considerare anche la potenza della postura.

¹¹⁷ Nella determinazione del comfort uditivo è d'uso utilizzare un valore medio ponderato sul tempo, denominato *esposizione personale quotidiana al rumore*; qui si è scelto di ricorrere ad un analogo sistema di valutazione limitato a tre ore consecutive, intervallo oltre il quale si ritiene che i fenomeni di fatica fisica e mentale siano sufficientemente lontani da poter influenzare in modo decisivo il livello di comfort.

Attività	$W m^{-2}$	Attività	$W m^{-2}$
<i>Mentale</i>		<i>Fisica</i>	
Incosciente	0	Nessuna	0
Semicosciente	5	Mani, leggero	10
Cosciente	15	Mani, medio	15
Moderata	20	Mani, pesante	25
Media	30	Un braccio, leggero	30
Elevata	40	Un braccio, medio	50
Intensa	50	Un braccio, pesante	70
<i>Postura</i>		Due braccia, leggero	60
Steso	0	Due braccia, medio	80
Seduto	0	Due braccia, pesante	100
Accovacciato	10	Corpo, leggero	125
In piedi	15	Corpo, medio	185
Piegato	20	Corpo, pesante	275

Tabella 2-13 Consumo metabolico in funzione dell'attività svolta

Impegno	Descrizione	Soglia	
		mentale $W m^{-2}$	fisica $W m^{-2}$
0 Nessuno	L'utente è in fase di riposo	≤10	≤15
1 Leggero	L'u. avverte l'impegno ma non sente il desiderio di effettuare pause. La performance resta inalterata	20	50
2 Medio	L'u. comincia ad avvertire la stanchezza e desidera effettuare una pausa. La performance comincia ad avere una flessione.	30	100
3 Elevato	L'u. avverte la stanchezza e necessita di una pausa. La performance cala.	40	200

Tabella 2-14 Impegno fisico e mentale

Nel secondo caso, si propone l'idea di assumere come unità di misura il fabbisogno energetico giornaliero, determinabile attraverso un semplice conteggio, funzione delle azioni elementari, della durata delle stesse e della potenza consumata (quest'ultima precedentemente stabilita utilizzando la Tabella 2-14). L'indicatore, attraverso quattro valori da 0 a 3, restituisce sinteticamente la sensazione di appetito, e la conseguenza sul rendimento, che si ipotizza che incida sull'utente, come descritto nella Tabella 2-15.

Impegno	Descrizione	Soglia adim.
0 Nessuno	L'utente non avverte sensazioni di appetito.	≤15 %
1 Leggero	L'u. avverte appetito. La performance resta inalterata.	30%
2 Medio	L'u. sente il bisogno di mangiare. La performance comincia ad avere una flessione.	70%
3 Elevato	L'u. sente la necessità di interrompere qualsiasi attività per poter mangiare. La performance cala.	100%

Tabella 2-15 Impegno nutrizionale

Come già ampiamente condiviso e recepito nella norma, il consumo metabolico è uno dei sei parametri necessari per stimare lo *stress termico*, che rappresenta la quantità di calore perso o accumulato dall'utente durante il compimento delle proprie azioni in condizioni standard. Quest'ultimo è utilizzato nella nota relazione di Fanger per determinare il PMV che, sulla scala di sensazione termica a sette valori, restituisce la percezione più probabile che, nell'immediato, l'utente ha dell'ambiente termo-igrometrico che lo circonda¹¹⁸. Il PMV rappresenta quindi un indice sincronico dell'impegno termico, espresso attraverso valori da -3 a +3, come riportato nella Tabella 2-16.

¹¹⁸ Cfr. UNI EN ISO 7730, op. cit..

PMV	Descrizione
+3	Estremamente caldo
+2	Caldo
+1	Leggermente caldo
0	Neutro
-1	Leggermente freddo
-2	Freddo
-3	Estremamente freddo

Tabella 2-16 Scala di sensazione termica

Il metodo non tiene però conto della variabilità dovuta all'adattività degli utenti per assuefazione fisiologica¹¹⁹, che in campo igrotermico è stata studiata nel dettaglio, tanto da giungere alla messa a punto di relazioni che legano la temperatura ottimale richiesta alla media mensile esterna. Per tale motivo, si propone di utilizzare il seguente criterio: sommare algebricamente lo stress termico, stimato per la temperatura ottimale, a quello che si otterrebbe normalmente impiegando le relazioni di Fanger, ed usare questo valore netto nella valutazione del PMV; ciò comporta la traslazione di uno dei due bracci della spezzata - che rappresenta il legame tra il carico igrotermico e l'indice - ed in particolare di quello che si trova dal lato dello stress termico positivo in estate e negativo in inverno, come mostra la Figura 2-26.

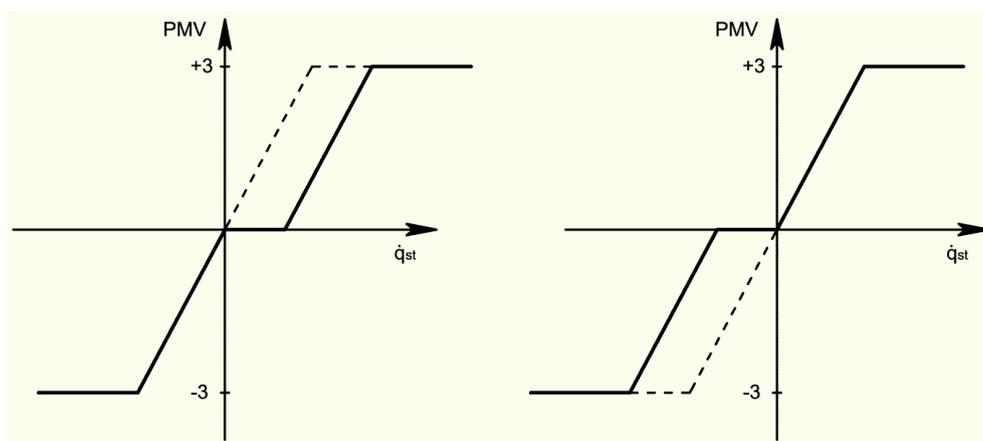


Figura 2-26 Stress termico, PMV e assuefazione fisiologica

Impegno	Descrizione	q_{st} kJ/m ²	HSI adim.
+3	Caldo Severo	L'utente deve interrompere immediatamente le proprie attività e ripararsi in luogo fresco	- 90
+2	Molto caldo	L'u. avverte caldo e stanchezza. La performance cala	- 60
+1	Caldo	L'u. avverte caldo. La performance subisce una flessione	- 30
0	Nessuno	L'u. non avverte alcuna sensazione particolare	0 0
-1	Freddo	L'u. avverte freddo. La performance subisce una flessione	36 -
-2	Molto freddo	L'u. avverte freddo e dolore. La performance cala	72 -
-3	Freddo severo	L'u. deve interrompere immediatamente le proprie attività e ripararsi in luogo caldo	144 -

Tabella 2-17 Indice diacronico per condizioni igrotermiche severe

Sempre reperibili in letteratura sono gli indici di valutazione diacronica, cioè quei particolari indicatori che tengono conto del perdurare nel tempo delle condizioni stressorie; in particolar modo si distinguono il *DLE*

¹¹⁹ Cfr. Figura 1-1.

o *Durata limite di esposizione* che fissa in 144 kJ/m² la quantità massima di energia che può disperdere un utente prima di subire danni irreversibili per ipotermia, quando l'isolamento termico degli abiti è al di sotto di un valore minimo¹²⁰, e l'*HSI*, o *Indice di stress di calore*, che limita a 700 W/ m² la quantità di calore massima erogabile da un utente giovane ed assuefatto al caldo attraverso la pelle per effetto della sudorazione. Per ovvi motivi, gli indici vengono applicati alternativamente, per cui è possibile proporre una sorta di *unificazione* impiegando una scala a sette valori, da -3 a +3, i cui effetti sono descritti in dettaglio nella Tabella 2-17.

2.3.2 *L'impegno visivo*

Per *impegno visivo* si intende lo sforzo che un utente compie durante l'esecuzione della propria sub-attività visiva; la norma tecnica specifica dettagliatamente quali sono i numerosi elementi che entrano in gioco, quali le dimensioni, la luminanza, il contrasto, gli angoli di schermatura, l'uniformità dell'illuminamento¹²¹. I dati necessari ad effettuare un'analisi così precisa sono però noti soltanto quando si conduce uno studio accurato su particolari postazioni di lavoro, e cioè nel momento in cui si assume una scala di studio ridotta rispetto a quella di unità ambientale qui adottata; in questo lavoro si considererà come parametro di stima soltanto l'illuminamento medio dovuto alla luce naturale che entra all'interno dei singoli ambienti, valutato come specificato nel precedente § 2.2.1.

Il corpo normativo fornisce diverse indicazioni utili allo sviluppo di un sistema di valutazione dell'impegno visivo in quanto stabilisce il valore minimo di illuminamento necessario a scorgere oggetti di dimensioni medio-piccole (i lineamenti del volto umano) pari a 20 lx, il fattore di scala di circa 1.5 che rappresenta la più piccola differenza significativa nell'effetto soggettivo dell'illuminamento (utilizzabile per costruire la scala degli illuminamenti), requisiti minimi di illuminamento suddivisi per compiti ed attività¹²². Tutto ciò permette di fare una serie di considerazioni: la prima di queste consiste nello stabilire le diverse soglie di sensazione visiva, dipendenti a loro volta dalla sensibilità dell'occhio umano, che corrispondono allo scarto di illuminamento percepibile da un utente. Il fattore suggerito dalla norma è di circa 1.5, ma qui si adotterà un criterio differente usato in ambito fotografico, dove gli illuminamenti sono espressi in *EV*, acronimo di *Exposition Values*, che impiega una scala esponenziale più vicina alla reale reattività del sistema della vista umana. La differenza può sembrare più formale che sostanziale, in quanto è sempre possibile trovare un valore di *EV* corrispondente ad un particolare illuminamento espresso in lux, ed anche le scale che vengono generate a partire dai due sistemi di misura sono sostanzialmente analoghe (Tabella 2-18), ma la seconda ha il pregio di essere omogenea, cioè viene generata da una relazione fissa, ed è quindi facilmente implementabile in un sistema automatizzato di valutazione, mentre la prima non è una progressione geometrica esatta; inoltre, gli *EV* sono più comodi da utilizzare quando si devono esprimere gli elevati valori di illuminamento dovuti alla radiazione solare, che altrimenti comporterebbero l'impiego di numeri a sei cifre quando vengono riportati in lux.

¹²⁰ Cfr. Appendice B, UNI ENV ISO 11079, *op. cit.*.

¹²¹ Cfr. UNI EN 12464-1, *op. cit.*.

¹²² *Ivi.*

UNI EN 12464-1			UNI EN 12464-1		
Scala in EV			Scala in EV		
<i>lx</i>	<i>EV</i>	<i>lx</i>	<i>lx</i>	<i>EV</i>	<i>lx</i>
(2.0)	0.0	2.5	200	6.5	226
(5.0)	1.0	5.0	300	7.0	320
(10)	2.0	10	500	7.5	453
20	3.0	20	750	8.0	640
30	3.5	28	1000	8.5	905
50	4.0	40	1500	9.0	1300
75	5.0	80	2000	9.5	1810
100	5.5	113	3000	10	2600
150	6.0	160	5000	11	5100

Tabella 2-18 Scala degli illuminamenti riportata nella norma ed in EV

La seconda considerazione riguarda invece l'adattabilità dell'occhio umano alle differenti condizioni di luce, grazie al meccanismo di modifica dell'ampiezza della pupilla: per assolvere quindi ad un particolare compito visivo, esiste un ampio *range* - e non un unico valore - di illuminamento, all'interno del quale sono assicurate le condizioni di comfort. La norma indica il valore *minimo* di questo intervallo; è ovvio che il limite superiore si raggiunge quando la luce è troppo forte ed insorgono fenomeni di abbagliamento diffuso. Questo suggerisce la possibilità di adottare una scala di valutazione dell'illuminamento che, sulla falsa riga di quanto già impiegato per il benessere termo igrometrico, utilizzi sette valori, da -3 a +3, secondo lo schema riportato nella Tabella 2-19. Ciò comporta la necessità di stabilire quali sono le sub-azioni visive alle quali un utente può essere soggetto (e attribuire ad ogni azione elementare la relativa sub-azione) e, per ognuna di esse quali sono le soglie per ogni grado della scala di sensazione visiva. Ancora una volta, l'analisi del corpo normativo consente di raccogliere dati significativi per poter stabilire le sub-azioni visive ed i valori minimi di illuminamento: anche se sono indicati per la funzione generale che viene svolta all'interno degli ambienti, uno studio incrociato sui *requisiti di illuminazione* riportati nella UNI EN 12464-1 ha permesso di individuare dodici diverse categorie generali, ad ognuna delle quali è associato l'intervallo di illuminamento ottimale - corrispondente al valore 0 della scala di sensazione visiva - ed i restanti sei valori di soglia per i rimanenti gradi, come descritto in dettaglio nella Tabella 2-20.

Valore	Descrizione
+3	Eccessivo
+2	Molto elevato
+1	Elevato
0	Ottimale
-1	Scarso
-2	Molto scarso
-3	Insufficiente

Tabella 2-19 Scala di sensazione visiva

Dalla norma è stato possibile ricavare direttamente, come già precedentemente accennato, gli estremi inferiori dell'intervallo di comfort; indirettamente sono stati individuati i valori soglia corrispondenti ai gradi negativi della scala di sensazione (da -3 a -1): è infatti possibile la riduzione di un grado¹²³ della scala degli illuminamenti rispetto a quello raccomandato¹²⁴.

¹²³ Il valore è stato estrapolato dalle tabelle presenti nella UNI 10380:1994, *Illuminotecnica. Illuminazione di interni con luce artificiale*.

¹²⁴ Cfr. UNI EN 12464-1, *op. cit.*

Si propone quindi di usare differenze di 0.5 EV tra i livelli 0, -1 e -2, e di 1 EV tra il livello -2 e -3. Restano ora da stabilire le soglie superiori dell'illuminamento; queste, ad esclusione della prima sub-azione, possono dividersi in due gruppi: il primo (da 2 a 8) che annovera compiti meno gravosi, ed il secondo (da 9 a 12) nel quale si comprendono quelli che necessitano di maggiore acutezza visiva. Il limite massimo per i primi è stabilito il 16 EV, che costituisce l'illuminamento che si osserva - alle nostre latitudini - durante le giornate soleggiate nelle ore centrali del giorno (circa 160.000 lx), mentre per i secondi si propone un valore inferiore di pari a 15 EV (82.000 lx), superati i quali si ritiene impossibile portare a termine l'azione; tutti gli altri valori sono stabiliti decrementando il precedente di 1 EV.

n.	Sub-azione Descrizione	Soglie di sensazione visiva [EV]						
		-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
1	Isolarsi dalla luce	-	-	-	$-\infty \div 0$	2	3	4
2	Scorgere sagome al buio	-1.0	0.0	0.5	$1.0 \div 13$	14	15	16
3	Vedere ostacoli di medie dimens.	1.0	2.0	2.5	$3.0 \div 13$	14	15	16
4	Scorgere i colori	2.0	3.0	3.5	$4.0 \div 13$	14	15	16
5	Vedere ostacoli in movimento	3.0	4.0	4.5	$5.0 \div 13$	14	15	16
6	Scorgere piccoli oggetti	3.5	4.5	5.0	$5.5 \div 13$	14	15	16
7	Vedere piccoli oggetti	4.0	5.0	5.5	$6.0 \div 13$	14	15	16
8	Vedere segni grafici	4.5	5.5	6.0	$6.5 \div 13$	14	15	16
9	Leggere	5.5	6.0	6.5	$7.0 \div 12$	13	14	15
10	Leggere a lungo (per più di un'ora)	6.0	6.5	7.0	$7.5 \div 12$	13	14	15
11	Vedere piccoli dettagli	6.5	7.0	7.5	$8.0 \div 12$	13	14	15
12	Vedere piccoli dettagli a lungo	7.0	7.5	8.0	$8.5 \div 12$	13	14	15

Tabella 2-20 Soglie di sensazione visiva in funzione delle sub-azioni

Come già accennato all'inizio di questo numero, l'indicatore così costruito si applicherà ai valori di illuminamento naturale presenti nell'ambiente; è però difficilmente pensabile che un utente, in condizioni di luce molto scarsa - o addirittura assente, nel caso in cui l'azione si svolta dopo il tramonto o prima dell'alba - possa portare a compimento le proprie azioni senza ricorrere all'uso di un impianto di illuminamento artificiale: in tal caso, anche se sono ristabilite le condizioni ottimali per svolgere la funzione prestabilita, il valore di comfort attribuito sarà convenzionalmente di -0.5, per tenere traccia dell'impiego di un sistema attivo di controllo ambientale.

Valore	Impegno	Descrizione
0	Nessuno	L'utente è in fase di riposo
1	Leggero	L'u. avverte l'impegno ma non sente il desiderio di effettuare pause. La performance resta inalterata
2	Medio	L'u. comincia ad avvertire la stanchezza e desidera effettuare una pausa. La performance comincia ad avere una flessione.
3	Elevato	L'u. avverte la stanchezza e necessita di una pausa. La performance cala.

Tabella 2-21 Indice diacronico dell'impegno visivo

Per una stima diacronica del comfort, si avanza l'ipotesi di eseguire una media dell'impegno sincronico precedentemente descritto: eseguita la valutazione a partire dalle due ore precedenti quella della stima utilizzando la Tabella 2-19, se ne determina la media aritmetica dei valori assoluti¹²⁵; la Tabella 2-21 riporta la scala utilizzata per questo particolare indicatore.

¹²⁵ Cfr. § 4.2.2. Nella stima si utilizza il valore assoluto in quanto esso esprime sinteticamente lo sforzo che il sistema visivo, e quindi l'utilizzatore, avverte durante l'esplicitazione dell'azione.

2.3.3 L'impegno uditivo

Per *impegno uditivo* si intende lo sforzo che un utente compie durante l'esecuzione della propria sub-attività uditiva. In letteratura sono noti i valori *limite* e *di qualità* attraverso i quali leggere l'*inquinamento acustico*¹²⁶ – e che saranno qui utilizzati per orientare alcuni valori di soglia degli indicatori adottati; in realtà, l'interazione tra le persone ed il microclima acustico che le circonda è senz'altro molto più complesso, e l'impegno a cui sono sottoposte è determinato da una numerosa serie di fattori che non possono ridursi alla sola quantificazione della pressione sonora inquinante. Come accennato nel § 2.3, si dovrà necessariamente operare una semplificazione del problema, cercando di cogliere le caratteristiche necessarie per eseguire una stima accurata, ma tralasciando quegli aspetti la cui valutazione necessiterebbe studi troppo lunghi e accurati¹²⁷.

Dal punto di vista acustico, il microclima sarà descritto in termini di:

- *rumore*, intendendo come tale la somma di tutte le fonti sonore la cui presenza non è necessaria all'azione uditiva, ed è quindi da considerarsi inutile o di impedimento per l'utente;
- *segnale*, significando con questo termine le fonti sonore che l'utente vuole o deve ascoltare durante il compimento dell'azione.

Le diverse sub-azioni uditive saranno classificate in funzione delle modalità di ascolto del segnale e della sua decifrazione a livello cosciente: si distingueranno cioè quelle azioni durante le quali l'utente *non vuole*, o *non ha nessuna particolare necessità* di ascoltare un segnale, da quelle in cui l'ascolto del segnale è voluto; queste ultime saranno classificate in funzione del livello di decodificazione del messaggio richiesto all'ascoltatore, e quindi della necessità di percepirlo in modo più o meno chiaro rispetto al rumore di fondo. Si delinea così la necessità di introdurre due indicatori sincronici per la valutazione dell'impegno: il primo deve specificare la differenza di pressione sonora del segnale rispetto al fondo, mentre il secondo deve precisare la quantità totale di carico acustico a cui il soggetto è sottoposto. Si individuano quindi sette diverse sub-azioni uditive, da associare alle azioni elementari, in base alle quali eseguire la stima (Tabella 2-22).

n.	Sub-azione	Liv. diff. segnale/rumore				Liv. diff. inquinam. ac.		
		-3	-2	-1	0	1	2	3
1	Isolarsi dai rumori					5	10	40
2	Nessuno					10	15	30
3	Percepire un segnale	-5	-3	0	3	10	15	20
4	Semplice ascolto: ascoltare un segnale	-3	0	3	5	10	15	20
5	Semplice ascolto: ascoltare un discorso	-3	0	3	5	5	10	15
6	Ascolto complesso: ascoltare parlato e musica	0	3	5	7	5	10	20
7	Ascolto complesso: ascoltare musica	3	5	7	10	5	10	20

Tabella 2-22 Sub-azioni uditive e livelli differenziali da applicare nelle stime

Il primo indicatore sarà riferito ad una scala a quattro valori (da -3 a 0), che corrispondono ad altrettanti livelli di disturbo dell'ascolto, come riportato nella Tabella 2-23; per ogni sub-attività uditiva saranno quindi indicati dei valori soglia che rappresentano la differenza tra i livelli di potenza del segnale e del rumore (Tabella 2-22).

¹²⁶ Cfr. Tabella D D.P.C.M. 14 novembre 1997.

¹²⁷ Tra questi, si è scelto di evitare la stima dei tempi di riverberazione: nonostante sia utilizzabile la formula di Sabine, questa è fortemente dipendente dalla presenza degli arredi, che rappresentano una componente aleatoria in fase di stima.

Valore	Impegno	Descrizione
0	Nessuno	L'utente ascolta il segnale chiaramente
-1	Leggero	L'u. avverte un leggero disturbo. Il segnale viene comunque ascoltato
-2	Medio	L'u. avverte il disturbo. Il segnale viene ascoltato con difficoltà
-3	Elevato	L'u. avverte un elevato disturbo. L'ascolto è compromesso

Tabella 2-23 Indice di disturbo dell'ascolto

Il secondo andrà riferito ad un'altra scala a quattro valori (da 0 a +3) a cui fanno riferimento un ugual numero di condizioni di disagio (Tabella 2-24); la stima delle soglie è però funzione tanto della sub-azione uditiva quanto dell'impegno mentale a cui è soggetto l'utente: ne consegue che le soglie non sono determinabili *a priori* ma devono essere di volta in volta stabilite per ogni azione elementare, quando si individuano impegno mentale e sub-azione uditiva.

Valore	Impegno	Descrizione	Val. max
0	Nessuno	L'utente non è soggetto a pressioni sonore disturbanti	60
1	Leggero	L'u. avverte una leggera pressione di disturbo. La performance resta inalterata	70
2	Medio	L'u. avverte una pressione di disturbo. La performance subisce una flessione	75
3	Elevato	L'u. avverte un'elevata pressione di disturbo. La performance cala	80

Tabella 2-24 Indice di disturbo da inquinamento acustico

All'impegno mentale è associato il livello di pressione corrispondente al valore 0 dell'indice; per definire i restanti tre gradi, alla pressione iniziale si sommano quelli differenziali riportati nella Tabella 2-22, sempre che il risultato non superi il valore massimo della Tabella 2-24. Quando si associa ad un'azione elementare la sua relativa sub-azione uditiva, e se ne specifica anche l'impegno mentale, occorre indicare anche altre informazioni per completare il quadro necessario a definire il microclima acustico. Se l'utente deve ascoltare un segnale, bisogna indicarne il livello medio di potenza (in decibel), la cadenza (continuo o saltuario) e la variabilità (cioè la possibilità o meno di aumentare il livello di pressione sonora in funzione del rumore di fondo).

n.	Descrizione	L_{eq}	n.	Descrizione	L_{eq}
1	Incosciente	35	5	Media	55
2	Semicosciente	45	6	Elevata	50
3	Cosciente	50	7	Intensa	45
4	Moderata	60			

Tabella 2-25 Impegno mentale e soglia di disturbo da inquinamento acustico

Livello e variabilità vengono utilizzate nel primo indicatore: consentono di stabilire se il segnale può essere amplificato durante l'ascolto, migliorandone la qualità; la cadenza serve nella valutazione del secondo perché specifica se il segnale deve essere conteggiato o meno nella determinazione dell'inquinamento acustico totale. Infine si richiede di inserire il livello di pressione del rumore prodotto durante l'azione - ad esempio per l'impiego di macchinari o strumentazioni varie - che va a sommarsi a quello proveniente dall'esterno o dagli altri ambienti.

Azione Elementare	Impegno mentale	Sub-azione uditiva	Livello di pr. del segnale	Cadenza del segnale	Variabilità del segnale	Rumore prodotto

Tabella 2-26 Esempio di scheda per la raccolta dei dati relativi alle sub azioni acustiche

Per la valutazione diacronica, la norma mette già a disposizione un indicatore, e che verrà qui adottato: il *livello di esposizione quotidiana al rumore*¹²⁸. Questo parametro, secondo quanto riportato in letteratura, non deve superare il limite di 80 dB; per tale motivo, si propone di utilizzare ancora una volta la scala a quattro livelli riportata nella Tabella 2-24, ed con riferimento ai valori limite in essa riportati.

2.3.4 Gli indicatori psicologici e il livello atteso di benessere

Gli indicatori precedentemente descritti concorrono a rappresentare una parte significativa del discomfort: quando questi si discostano dal valore nullo, le condizioni fisiche che essi esprimono sono tali da ostacolare, in modo più o meno marcato, le azioni compiute dagli utilizzatori dell'organismo edilizio. Il comfort è però uno stato mentale, ed è quindi quella parte di benessere che viene percepita dalle persone a livello cosciente: cosa sentono in realtà gli utilizzatori di uno spazio, in funzione del proprio stato psicofisico? Naturalmente, la risposta a questa domanda necessiterebbe di studi appropriati, che coinvolgerebbero medici, ergonomi, psicologi, sociologi, e che certamente esorbita i limiti di questo lavoro; qui si vuole soltanto individuare una ridotta famiglia di indicatori in grado di simulare sinteticamente i principali meccanismi di percezione delle condizioni psicofisiche. Il metodo di simulazione deve così restituire un valore di stima che - probabilisticamente - rappresenti il comfort percepibile dalle persone, valutato attraverso una scala di sensazione a sette valori, da -3 a +3, come descritto sinteticamente nella Tabella 2-27; a tale valore viene dato il nome di *livello atteso di benessere (LaB)*.

Valore	Descrizione
≥+3	Comfort elevato. L'utente avverte un'elevata sensazione di comfort; la performance aumenta di rendimento e/o l'utente trae un deciso giovamento nel compierla
+2	Comfort medio. L'utente avverte una sensazione di comfort; la performance subisce un incremento del rendimento e/o l'utente trae giovamento nel compierla
+1	Comfort leggero. L'utente avverte una leggera sensazione piacevole anche se compie la propria attività senza incremento di rendimento
0	Neutro. L'utente riesce a compiere senza alcun ostacolo la propria attività, senza percepire particolari sensazioni, né piacevoli né spiacevoli
-1	Discomfort leggero. L'utente avverte una leggera sensazione spiacevole anche se compie la propria attività senza problemi
-2	Discomfort medio. L'utente avverte una sensazione di discomfort; la performance subisce una flessione nel rendimento
≤-3	Discomfort elevato. L'utente avverte un'elevata sensazione di discomfort; la performance cala

Tabella 2-27 Scala per l'indicatore del livello atteso di benessere

Per prima cosa, occorre definire in che modo gli indicatori fisici si combinano tra loro, e in quale situazione essi sono rappresentativi dello stato di comfort di un utente, senza che debbano essere considerati altri parametri di stima. Questa dovrebbe corrispondere alle condizioni standard, dove cioè non intervengono elementi con carattere di eccezionalità per le quali possono ingenerarsi meccanismi in grado di amplificare o ridurre il benessere. Si noti che tutti gli indici precedentemente introdotti sono stati costruiti in modo tale che - al di là del segno positivo o negativo - i gradi 1, 2 e 3 delle rispettive scale che li misurano, corrispondono ad un analogo elemento di disturbo, ed in particolare:

¹²⁸ Cfr. UNI EN ISO 9432:2008, *Acustica. Determinazione del livello di esposizione personale al rumore nell'ambiente di lavoro.*

- al livello 0 corrisponde l'assenza di disagio, e le attività vengono svolte senza alcun ostacolo al loro compimento;
 - al livello 1 corrisponde un disagio leggero, ma senza che l'attività subisca ritardi degni di nota;
 - al livello 2 corrisponde un disagio medio, con flessione del rendimento nell'esecuzione dell'attività;
 - al livello 3 corrisponde un disagio elevato, con un calo della performance.
- I segni adottati sono infatti utili soltanto per distinguere le diverse sensazioni avvertite (ad esempio, il caldo ed il freddo nel PMV) ma, ai fini della valutazione finale, essi corrispondono ai gradi negativi della Tabella 2-27; per tale motivo, nelle successive considerazioni, saranno considerati *tutti* di segno *negativo*. L'omogeneità così creata consente poi di confrontare i fattori, anche se profondamente diversi, in funzione dell'effetto sulla performance, senza impiegare coefficienti di moltiplicazione correttivi (i *pesi* che di solito vengono utilizzati nei sistemi a multi criteri): la dinamicità necessaria per eseguire correttamente la stima è infatti già assicurata dalla variazione dei valori soglia in relazione alla sub-attività svolta.

Piuttosto che determinarne una media di tutti e le stime, che in un sistema multicriteria classico corrisponderebbe all'attribuzione di pesi identici, si ritiene opportuno utilizzare un indice sintetico, rappresentativo dei precedenti, pari al *minimo* valore riscontrato. Questo criterio, peggiorativo rispetto a quello della media, è giustificato dalla seguente considerazione: la presenza di un solo fattore di discomfort di livello 3, mentre tutti gli altri sono pari a 0, è sufficiente a far calare inesorabilmente il rendimento, perché è indice di una condizione ambientale per la quale una sub-azione non può in alcun modo essere portata a termine; utilizzando il valore medio, questo non supererebbe un voto di -0.5, che quindi restituirebbe un indicatore di benessere falsato rispetto alla realtà. Il valore minimo è un indice sintetico che rappresenta l'*indicatore ambientale* in quanto misura la qualità ambientale dei diversi spazi, pesata in funzione della capacità di ostacolare o meno la performance dell'utente.

Se gli indicatori di impegno metabolico, igrotermico, uditivo e visivo descrivono il discomfort dell'utente, si deduce che nelle condizioni standard non è possibile raggiungere i gradi positivi della scala per la valutazione del benessere precedentemente proposta; questo perché i meccanismi di piacere o di positività - a loro volta legati a stati psicofisici durante i quali sono presenti nell'organismo sostanze neurotoniche al di sopra di particolari soglie di concentrazione - sono estremamente complessi e necessitano di stimoli che vanno al di là della semplice assenza di ostacoli nel compimento delle proprie azioni. Anche quando si riscontra la mancanza di elementi ostativi, non è detto che questa sia sufficiente ad assicurare condizioni neutre di benessere, perché possono subentrare altri fattori psicologici, come la noia o l'obbligo ad eseguire un particolare lavoro, che aumentano il discomfort. È evidente la necessità di introdurre dei parametri *ad hoc* per valutare sinteticamente le condizioni psicologiche dei fruitori degli spazi, che andranno ad aggiungersi agli impegni fisici precedentemente stimati, per restituire il livello finale di benessere. Si propone quindi di impiegare due indicatori principali: di *sensazione* e di *intenzione*, a cui si aggiunge un terzo, detto di *frequenza*.

L'indicatore di sensazione traccia il tipo di percezione che l'utente, con probabilità, sente durante lo svolgimento dell'azione elementare: attività di carattere ludico e di svago, ma anche di soddisfacimento di necessità

fisiologiche saranno classificate come *piacevole*; lavori che non esercitano attrattiva verranno catalogati come *indifferente* o *spiacevole* a seconda del grado di sgradevolezza che ragionevolmente si pensa che suscitino nelle persone. L'indicatore di intenzione è impiegato per tener conto della coerenza dell'azione, considerando che si intende per:

- *volontaria*, un'azione svolta per iniziativa del soggetto, come per appagare un bisogno o soddisfare una necessità;
- *necessaria*, un'azione seguita per effetto di una causa esterna, senza la quale si comprometterebbero altre azioni successive, come per compiere un lavoro;
- *obbligatoria*, un'azione resa cogente da una causa importante o grave.

I punteggi sono attribuiti utilizzando un criterio omogeneo ai precedenti, e seguono le indicazioni riportate in dettaglio nella Tabella 2-28.

Val.	Sensazione	Val.	Intenzione	Val.	Frequenza
+1	Piacevole	+1	Volontaria	0.5	Di routine
0	Indifferente	0	Necessaria	1.0	Abituale
-1	Spiacevole	-1	Obbligatoria	1.5	Rara

Tabella 2-28 Indicatori di sensazione, intenzione e frequenza

L'indicatore di frequenza rappresenta l'abitudine con la quale la funzione viene svolta dal fruitore degli ambienti; in particolare l'azione è classificata:

- *di routine*, quando è compiuta con grande frequenza e familiarità: è un'azione che l'utente sa compiere con perizia;
- *abituale*, quando è compiuta diverse volte, ma non con continuità: è un'azione che l'utente sa compiere, ma non con particolare perizia;
- *rara*, quando è compiuta di rado o mai: è un'azione che l'utente compie con difficoltà.

Al contrario degli altri due indici, la frequenza *amplifica* o *riduce* la sensazione, positiva o negativa, perché funzioni piacevoli compiute raramente danno maggior soddisfazione rispetto ad analoghe realizzate abitualmente; allo stesso modo operazioni spiacevoli e saltuarie sono più fastidiose di altre compiute di routine, alle quali a lungo andare si fa l'abitudine. Per tale motivo, stabiliti i tre indicatori per ogni azione elementare, la somma dei primi due moltiplicata per il terzo restituisce il valore dell'*indicatore di azione*, che *sinteticamente* è rappresentativo del benessere psicologico che l'utente avverte durante il compimento delle proprie azioni. La somma algebrica dell'indicatore sintetico del discomfort ambientale e di quello di azione restituisce il livello atteso di benessere. Appare quindi evidente che le condizioni standard definite nel § 2.3 corrispondono alla terna {*Indifferente, Necessaria, Abituale*}, per le quali l'LaB coincide con l'indicatore sintetico del discomfort fisico. Gli indicatori di azione sono estremamente importanti durante le fasi di progettazione in quanto dipendono esclusivamente dall'attività elementare: se essi sono negativi, a maggior ragione sarà necessario fornire ambienti qualitativamente neutri allo scopo di non creare ulteriori elementi di discomfort. Luoghi di lavoro, di cura, impiegati per svolgere esami, sale d'aspetto, ed in generale dove gli utenti non sono a proprio agio perché chiamati a vivere emozioni di noia, timore, ansia, dovranno essere particolarmente curati sotto il profilo della qualità ambientale, perché lì è più probabile che le persone ne avvertano il discomfort.

2.3.5 La valutazione dinamica del benessere

Il livello atteso di benessere consente di disporre di un indicatore sintetico del comfort di un utente: esso rappresenta, nella semplificazione a-

dottata dal modello, il modo con cui una persona percepisce la propria soddisfazione nei confronti dell'ambiente che la circonda. Se il sistema di valutazione si fermasse qui, occorrerebbe *soltanto* specificare i diversi parametri fisici richiesti nelle diverse operazioni di stima per conoscere il risultato del calcolo; un metodo siffatto sarebbe quindi *statico*, nel senso che non prenderebbe in considerazione l'interazione che nella realtà avviene tra le persone e lo spazio fisico, che si articola secondo meccanismi di modifica e feedback, aventi l'obiettivo di minimizzare il discomfort o, quando possibile, di massimizzare il benessere. Il metodo che si vuole proporre è invece *dinamico* perché, utilizzando l'indicatore LaB, cerca di simulare questo rapporto di reciprocità persona/spazio fisico attraverso un modello comportamentale che cerca di utilizzare strategie passive di controllo ambientale; questo coincide con un profilo di fruitore o sensibile nei confronti del problema relativo allo spreco di risorse, o avente la volontà di contenere i consumi ed i costi di gestione della propria unità immobiliare.

Si propone quindi di utilizzare la seguente scala di priorità:

1. modificare l'abbigliamento per favorire i meccanismi di termoregolazione nel caso di discomfort igrotermico;
2. intervenire sugli infissi esterni e interni per regolare temperatura, velocità dell'aria, umidità, illuminamento, pressione sonora;
3. accendere o spegnere sistemi attivi di condizionamento e/o illuminamento;
4. modificare la collocazione della propria attività in altre unità ambientali.

Ricorrere quindi agli impianti è possibile, ed è spesso necessario quando non ci sono alternative valide (come avviene, ad esempio, la sera per assicurare l'illuminamento degli ambienti), ma resta una soluzione da adottare quando le prime due sono risultate inefficaci o non sufficienti a garantire le condizioni di neutralità corrispondenti al livello 0 della scala del benessere.

Partendo dall'ora del risveglio, quando tutti o quasi gli indicatori sono azzerati in virtù dell'effetto di riposo che il sonno notturno ha sul ciclo biologico, il metodo stima di ora in ora gli elementi stressori che agiscono sugli utilizzatori in funzione delle attività svolte, e simula i comportamenti di questi ultimi utilizzando la scala di priorità precedentemente descritta. Gli indicatori quindi crescono e decrescono nel tempo, con una evoluzione che tiene traccia degli elementi stressori e destressori; questi a loro volta modificano il livello atteso di benessere, in base al quale il metodo effettua la simulazione di interazione con lo spazio fisico. In pratica viene sviluppato un albero di dodici alternative, funzione della movimentazione degli infissi esterni ed interni - e degli eventuali tendaggi e sistemi di oscuramento - presenti nell'unità ambientale, secondo lo schema riportato nella Tabella 2-29, al quale si aggiunge una tredicesima possibilità, consistente nell'apertura di tutti gli infissi - esterni ed interni - appartenenti all'unità immobiliare allo scopo di innescare un sistema di ventilazione incrociata per effetto delle differenti distribuzioni dei coefficienti di pressione.

n.	Infissi interni		Infissi esterni		n.	Infissi interni		Infissi esterni	
	Chiusi	Aperti	Chiusi	Aperti		Chiusi	Aperti	Chiusi	Aperti
1		X		X	7		X		X
2		X		tenda	8		X		tenda
3		X		oscur.	9		X		oscur.
4	X			X	10	X			X
5	X			tenda	11	X			tenda
6	X			oscur.	12	X			oscur.

Tabella 2-29 Differenti combinazioni di utilizzo degli infissi all'interno delle unità ambientali

Determinando per ognuna di esse il livello atteso di benessere (e la resistenza termica ottimale del vestiario), il metodo sceglie la combinazione che assicura il valore di LaB più elevato. Se il PMV e/o l'indicatore di impegno visivo cadono all'esterno dell'intervallo $[-1,+1]$, allora si considera che l'utente farà ricorso ad un sistema attivo di climatizzazione o di illuminamento, e il relativo indicatore assumerà il valore convenzionale di ± 0.5 , come descritto precedentemente.

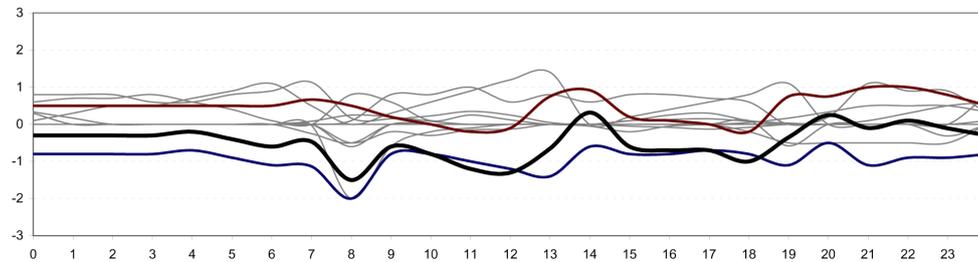


Figura 2-27 Evoluzione temporale degli indicatori adottati

Il diagramma in Figura 2-27 riporta l'andamento dei diversi indicatori: con il tratto in blu si riporta il livello di discomfort ambientale, il tratto rosso è l'indicatore di azione e quello più scuro rappresenta il livello atteso di benessere nel corso delle 24 ore, in base al quale è possibile seguire l'evoluzione del comfort.

3 *Sviluppo di un metodo integrale*

3.1 **Collaudare il metodo proposto mediante casi-studio**

3.1.1 *Criteri di scelta e strumenti di valutazione*

Enunciare i principi, le modalità di raccolta e di organizzazione dei dati, di stima dei parametri ed infine di verifica del comfort, è di essenziale importanza nella definizione di un metodo di valutazione; tutto ciò si dimostrerebbe però inutile qualora detto metodo non fosse in grado di fornire una modellazione *efficace* della realtà, perché la sua efficienza simulativa è il principale obiettivo. Ne consegue che la prima, fondamentale verifica, di carattere sostanziale, consiste nel riscontrare la capacità di isomorfizzazione, e cioè la corrispondenza tra lo scenario ricostruito e quello reale. Come è stato descritto nel capitolo precedente, in questo lavoro si è cercato di derivare gli algoritmi per la determinazione delle caratteristiche ambientali direttamente dalla normativa tecnica, *ereditandone* conseguentemente l'attendibilità scientifica. Fa parzialmente eccezione la modalità di stima descritta per l'individuazione del clima meteorologico, che invece necessita di verifica su un parco dati sufficientemente ampio, in base al quale appurare il margine di errore della simulazione ottenuta. Dovranno quindi individuarsi delle località per le quali sono disponibili un grande quantitativo di variabili meteo, allo scopo di verificare la congruenza dei risultati con un set di valori stabili e statisticamente affidabili. A scala di edificio potrà invece essere utilizzato il caso studio di un'architettura progettata secondo criteri di eco-sostenibilità e di biocompatibilità, allo scopo di provare il funzionamento del metodo, su di un esempio nel quale sono state utilizzate pratiche di progettazione ispirate ai principi della bio-architettura. Il caso sarà selezionato tra gli edifici ad uso abitativo in quanto questa funzione è la più diffusa sul territorio nazionale, costituendo quasi l'88% dell'intero patrimonio immobiliare italiano.

La seconda verifica è invece di carattere procedurale: la grande quantità di dati che occorre gestire durante la valutazione rende necessario lo svi-

luppo di uno strumento meccanizzato di stima, grazie al quale sarà più semplice e veloce l'implementazione delle variabili e la lettura dei risultati; la struttura stessa del metodo rende infatti possibile la scrittura di un protocollo informatizzato utilizzando un comune foglio di calcolo o un database.

3.1.2 Selezione dei casi studio

3.1.2.1 La verifica a scala urbana in base ai dati meteorologici

Il clima meteorologico è un fenomeno caratterizzato da un elevato grado di variabilità nel tempo: come già detto (si veda § 2.2.1), per poter lavorare con una sufficiente stabilità occorre disporre di medie eseguite sul lunghissimo periodo, pari a 20÷30 anni. Condurre quindi una campagna di rilievo diretto non è plausibile visti i tempi della ricerca. D'altro canto tanto i valori presenti nella normativa UNI quanto quelli registrati nell'Atlante Meteorologico d'Italia non sono atti alla verifica poiché vengono utilizzati dal metodo durante la stima. Occorre così individuare una rete di stazioni meteorologiche che metta a disposizione i dati accumulati nel corso di un ampio numero di anni, la cui attendibilità scientifica sia evidente perché rispetta le precise regole di misurazione dell'Organizzazione Meteorologica Mondiale.

Le caratteristiche di cui sopra sono state riscontrate nel network di stazioni meteorologiche facenti capo all'Assessorato all'Agricoltura della Regione Campania, ed in particolare ne sono state selezionate le sei che contengono tutti i dati relativi al decennio 1999 - 2008. Le località in questione sono Battipaglia, Buccino, Buonabitacolo, Castel San Lorenzo, PolICASTRO Bussentino e Vitulazio; sono state calcolate:

- la temperatura esterna (θ_o), la deviazione standard (SD_θ) e l'escursione termica ($\Delta\theta_o$);
- l'umidità relativa (RH) e la sua escursione (ΔRH);
- la piovosità (RN);
- la velocità del vento (v_a) e la sua direzione principale;
- l'irradiazione solare giornaliera media mensile totale sul piano orizzontale (\bar{H}).

Per poter eseguire con comodità le diverse e complesse procedure di stima, è stato approntato un foglio di calcolo grazie al quale, inserendo i dati richiesti quali le coordinate geografiche, l'altitudine e la fascia di antropizzazione, è stato possibile ottenere con grande rapidità i valori relativi al clima meteorologico. In particolare, quest'ultimo è stato valutato utilizzando i valori presenti nella Tabella 2-3 mediante il confronto tra le immagini satellitari facilmente scaricabili dalla rete Internet (Figura 3-1): il semplice riscontro della proporzione tra superfici costruite e non ha consentito di individuare rapidamente il livello di antropizzazione¹.

Com'è possibile osservare dai diagrammi riassuntivi, gli intervalli di imprecisione riscontrati tra le medie calcolate sui dati rilevati e quelle stimate nel metodo, evidenziano approssimazioni molto ridotte ma anche andamenti molto regolari.

¹ Questo è stato utilizzato direttamente dagli algoritmi interni, che, inseriti nel foglio elettronico, eseguono in modo automatico tutte le valutazioni prescritte dalla normativa tecnica, ed inseriscono poi i coefficienti correttivi proposti in questo lavoro, grazie ai quali è stato possibile ridurre il margine di errore della stima rispetto ai modelli classici di simulazione del clima meteorologico.



Figura 3-1 Immagini satellitari delle stazioni meteorologiche

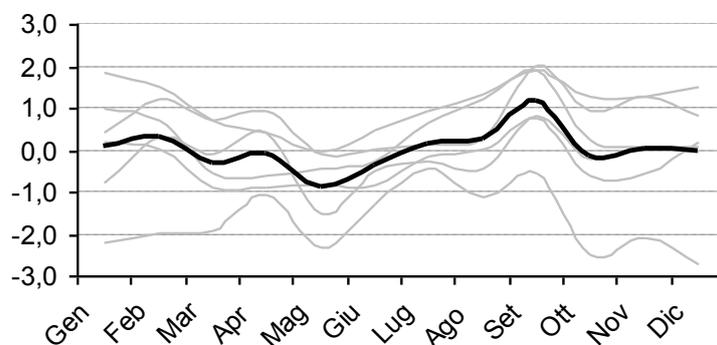


Figura 3-2 Margine di errore calcolato sulle temperature

La temperatura, sicuramente la variabile più rappresentativa, è determinata con un margine di errore annuo di 0°C , e con un'oscillazione compresa tra i valori di -1 e $+1^{\circ}\text{C}$ (Figura 3-2). Analogamente la deviazione standard e l'escursione termica mostrano errori contenuti, pari a $+0.6$ e -1.5°C , con oscillazioni che nel caso della seconda variabile è quasi nulla, come è possibile vedere nella Figura 3-3.

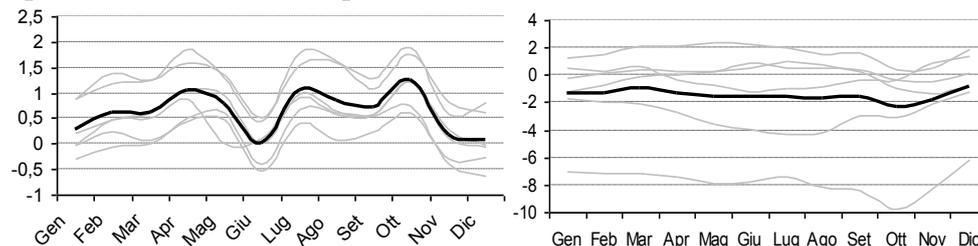


Figura 3-3 Margini di errore della deviazione standard e, a destra, dell'escursione termica

Nel caso dell'umidità relativa e della sua escursione giornaliera si registrano differenze di -0.8 e -1.0%; anche in questo caso le variazioni del secondo parametro sono estremamente ridotte, tanto che il diagramma delle medie si avvicina a quello di una retta (Figura 3-4).

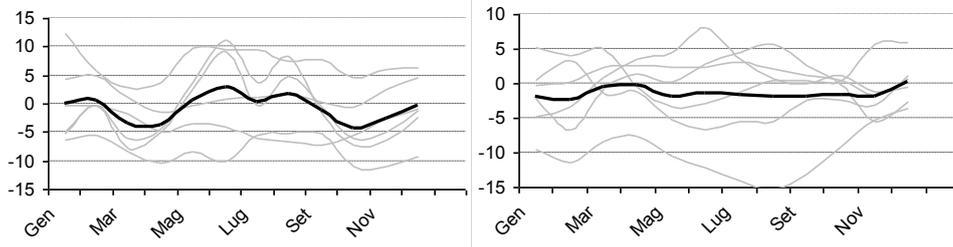


Figura 3-4 Margini di errore dell'umidità relativa e, a destra, della sua escursione giornaliera

Irradiazione solare totale e piovosità continuano a mostrare valori differenziali molto contenuti (rispettivamente 0.3 MJ/m² e 0.9 mm) con caratteristiche simili, e cioè un incremento dell'errore assoluto nei periodi in cui il fenomeno è più elevato, e cioè nei mesi estivi per il primo valore, e nei mesi autunnali ed invernali per il secondo (Figura 3-5).

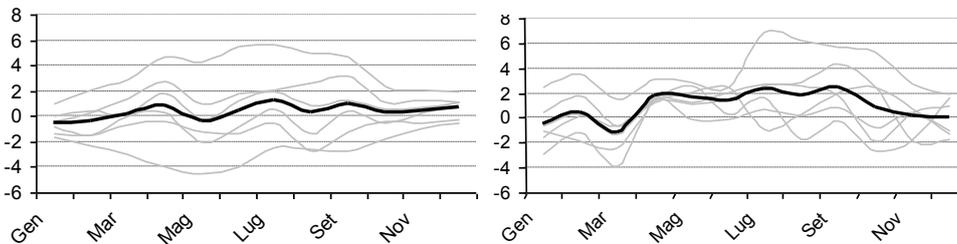


Figura 3-5 Margini di errore dell'irradiazione solare e, a destra, della piovosità

Comportamento più complesso si riscontra per la velocità dell'aria, in quanto il fenomeno della ventilazione è sicuramente uno dei più instabili, tanto per direzione che per intensità. Per tale motivo, anche se l'errore totale è soltanto di -0.1 m/s, si osserva una variabilità più ampia, anche se contenuta entro un range ridotto di ± 0.6 m/s, come si vede nella Figura 3-6.

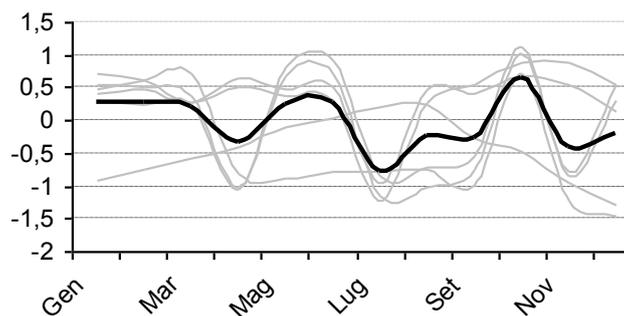


Figura 3-6 Margini di errore della velocità dell'aria

I risultati, ottenuti dal confronto di ben 219.000 dati meteorologici, sono estremamente confortanti perché i coefficienti correttivi introdotti grazie alla sola individuazione della fascia di antropizzazione ha consentito di limitare con grande efficacia lo scarto esistente tra il set di parametri assunti a campione e la simulazione ottenuta con il metodo. Partire da una stima accurata delle condizioni meteorologiche permetterà quindi di eseguire valutazioni più precise, rendendo l'intero procedimento proposto maggiormente affidabile.

3.1.2.2 La verifica a scala di edificio del caso-studio selezionato

Il caso studio selezionato è quello di un gruppo di edifici progettati nell'ambito di un programma ERP per la realizzazione di abitazioni sostenibili nel territorio campano. Il programma, voluto dalla Regione allo scopo di intraprendere un piano di *inversione* di tendenza, che vede uno scenario nel quale l'housing sociale non rappresenti uno standard *minimo* di qualità, bensì costituisca un *modello* al quale orientare l'attività edilizia di pregio, ha trovato il coinvolgimento degli Istituti Autonomi di Case Popolari delle cinque province campane attraverso altrettanti *Progetti pilota*. Queste hanno provveduto a produrre altrettanti insediamenti ERP di bio-architettura, dei quali uno è attualmente in fase di realizzazione ed i restanti quattro sono in appalto. Lo sforzo affrontato è stato notevole perché i gruppi di professionisti incaricati sono stati scelti per la loro capacità di sviluppare soluzioni sensibili ai problemi legati al risparmio delle risorse ed al benessere degli utenti; ad essi, inoltre, sono stati affiancati esperti in materia di sostenibilità ambientale e bio-compatibilità provenienti dal mondo accademico, che hanno fornito l'esperienza e la conoscenza necessari per condurre a termine il difficile percorso progettuale. Tra i diversi esempi è stato selezionato l'insediamento di Nola, progettato dallo staff dell'Arch. Colonna, e supportato dal team di esperti della Facoltà di Architettura di Napoli diretto dalla Prof. Dora Fracesse, che prevede la realizzazione di tre edifici, di cui due a corte ed uno a blocco, correttamente orientati secondo un asse nord/sud (Figura 3-7).



Figura 3-7 Planimetria dell'insediamento ERS a Nola

Gli edifici a corte, dell'altezza di tre piani, ospitano sei tipologie di alloggi, per un totale di otto appartamenti per uno, di cui quattro disposti su due livelli, e gli altri su un piano soltanto. Grande cura è stata riservata all'esposizione: le unità immobiliari hanno tutte due o tre affacci, in modo da poter sfruttare i fenomeni di ventilazione incrociata, e almeno uno di questi si trova su di un fronte *pregiato*, e cioè rivolto a sud, ovest o est. Questo consente di sfruttare il fenomeno dell'irraggiamento, e quindi dell'illuminamento naturale e del riscaldamento passivo, disponendo *ad hoc* dei locali

adibiti a serra, con infissi apribili in estate quando occorre smaltire il caldo, aumentando i flussi d'aria in transito all'interno dei locali.

Molta attenzione è stata rivolta alla definizione delle caratteristiche termiche delle chiusure, definendo con precisione i valori di trasmittanza e la qualità dei materiali da impiegarsi per evitare che le dispersioni termiche determinino sprechi di energia per la climatizzazione delle unità ambientali. Sui fronti ovest ed est, inoltre, sono stati predisposti sistemi di schermatura degli infissi per evitare che in estate l'accesso solare sia eccessivo, comportando abbagliamento ed accumulo di calore. Di contro si osserva che il lotto è molto vicino all'asse autostradale Napoli-Canosa, per cui è facile prevedere che l'inquinamento acustico, proveniente dal fronte nord, sia abbastanza elevato, soprattutto in estate quando gli infissi esterni vengono aperti per favorire la ventilazione incrociata ed il conseguente smaltimento dell'aliquota di calore latente per favorire il benessere termo-igrometrico.

La scelta dell'alloggio campione come caso-studio per l'attuazione del metodo proposto è basata sulla necessità di approfondire eventuali elementi di rischio ambientale. È stata selezionata dunque un'unità ambientale che avesse un affaccio sul lato nord - interessato dai fenomeni di rumore autostradale - ed una maggiore esposizione ai raggi solari, quindi con infissi sul fronte sud ed a contatto con il lastrico solare.



Figura 3-8 Planimetria del secondo livello. In verde, l'unità ambientale scelta

Si è quindi optato per l'appartamento al secondo livello del blocco più vicino all'autostrada, che presenta tutte le caratteristiche richieste per eseguire la verifica. La Figura 3-8 mostra la sua posizione rispetto alla planimetria generale: si tratta di un'abitazione per due persone, fornita di cucina, servizi igienici e di una serra posizionata a sud; la sua superficie calpestabile è di 53 m², ed è a contatto con la cassa scale e con altri due appartamenti.

Nel paragrafo successivo sarà riportata una descrizione dettagliata della procedura di implementazione dei dati e di stima del benessere su questo caso studio.

3.2 Valutare il caso-studio con il metodo proposto

3.2.1 Implementazione dei dati

Utilizzando un foglio di calcolo è possibile inserire i dati relativi alla posizione geografica ed alle fasce di antropizzazione del territorio, ricavando immediatamente i valori che descrivono il clima meteorologico della zona. In particolare si osserva un valore di umidità massima estremamente elevato, che nei mesi invernali raggiunge anche il 100% nelle ore notturne. Ciò è dovuto alla presenza di una grande superficie non costruita che da un lato abbatte le temperature esterne, ma dall'altro incrementa la quantità di valore acqueo presente in atmosfera (Figura 3-9).



Figura 3-9 Vista satellitare dell'insediamento a Nola

In generale il clima è abbastanza mite, soprattutto in inverno quando si riscontrano temperature minime sempre superiori a 0°C , mentre in estate le massime raggiungono anche i 30°C contribuendo, con l'umidità elevata, a rendere il clima particolarmente sgradevole (Figura 3-10). Gennaio risulta il mese più freddo, mentre quello più caldo in assoluto si è dimostrato quello di luglio, con intervalli rispettivamente di $2,8\div 11,1$ e $19,5\div 30,0^{\circ}\text{C}$.

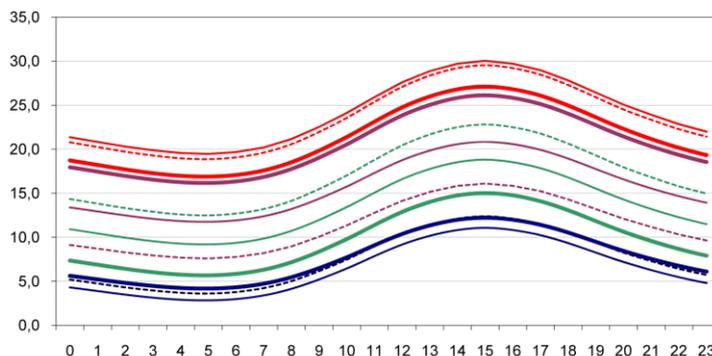


Figura 3-10 Andamento orario delle temperature esterne nel corso dell'anno

Le caratteristiche legate alla morfologia del territorio e degli ostacoli intorno all'edificio sono determinati con le tecniche cad già descritte (vedi § 2.2.4); inserendo questa seconda serie di dati all'interno del foglio di calcolo è possibile individuare in modo completamente automatico tipologia e posizione degli ostacoli che impediscono l'irraggiamento diretto del sole, ed

hanno consentito di tracciare i diagrammi riportati nella Figura 3-11. È possibile osservare il ruolo di schermatura che la corte interna esercita sul prospetto sud, ed in particolare di come l'effetto sia presente alle prime ore del mattino e più marcatamente all'imbrunire, quando l'altezza solare è particolarmente ridotta.

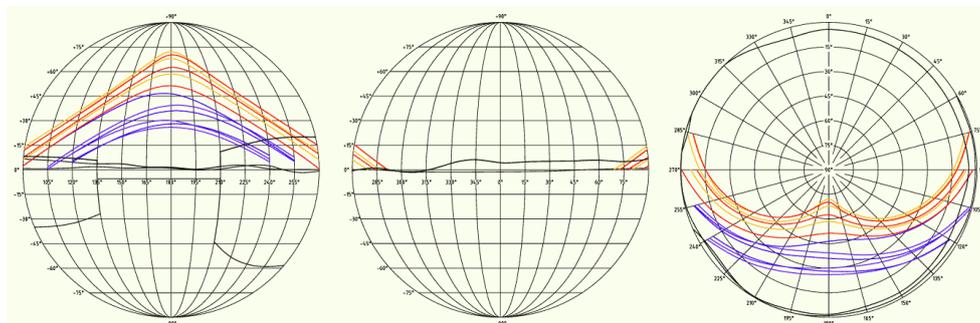


Figura 3-11 Diagrammi polari della traiettoria del sole e degli ostacoli presenti, realizzati per i fronti sud (sinistra), nord (centro), e per la copertura (destra)

Proseguendo nell'implementazione, sono state individuate le infrastrutture sul territorio: in particolare – come già accennato nel paragrafo precedente – gli assi autostradali della Napoli-Canosa e della Caserta-Salerno rappresentano le fonti di inquinamento acustico più consistenti, mentre l'aeroporto di Capodichino, ben più distante, non costituisce una sorgente di rumore particolarmente apprezzabile (Figura 3-12). Occorre sottolineare che è stata ipotizzata la presenza di una barriera antirumore sul tratto della Napoli-Canosa di un potere fonoassorbente di 25 dB, altrimenti i valori di rumore simulati dal metodo sarebbero stati superiori ai limiti consentiti dalla legge: anche così si osserva un livello medio di pressione sonora di circa 75 dB, che ben rappresenta il problema costituito dalla vicinanza di un'infrastruttura viaria di categoria A distante soli 80 metri dall'unità immobiliare.

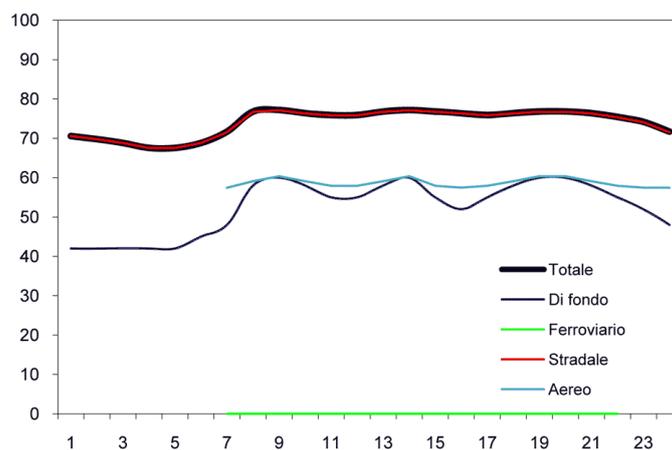


Figura 3-12 Livello di pressione sonora delle fonti di inquinamento acustico presenti

A scala territoriale è ancora possibile raccogliere i dati ISTAT relativi alla composizione demografica, economica, culturale e sanitaria della popolazione, allo scopo di individuare il profilo di utenza e, successivamente, il modello di comportamento su cui effettuare la valutazione del benessere. Vista la dimensione dell'appartamento oggetto della valutazione, è stata considerata una coppia di utenti – coniugati – delle seguenti caratteristiche:

- Utente A, uomo, ha un'età media di 50 anni, un'altezza di 1,75 m ed un peso di 85 kg, in buona salute, impiegato nel settore terziario;

- Utente B, donna, ha un'età media di 47 anni, altezza di 1,73 kg e peso di 73 kg, in buona salute, casalinga.

Questi tratti peculiari sono stati ottenuti intersecando la distribuzione demografica con lo stato civile, il livello di istruzione, tassi di attività ed occupazione, settore di impiego, salute dichiarata, stile di vita. Il calcolo delle medie, effettuato manualmente, può comunque essere implementato allo scopo di rendere automatica la descrizione dell'utenza.

Si rende ora necessario procedere con l'inserimento dei dati a scala di edificio, descrivendo i fronti ed i prospetti dell'organismo edilizio e le aperture presenti su di essi; a seguire andranno specificate le diverse unità ambientali, indicandone superficie ed altezza, come indicato nella Figura 3-13.

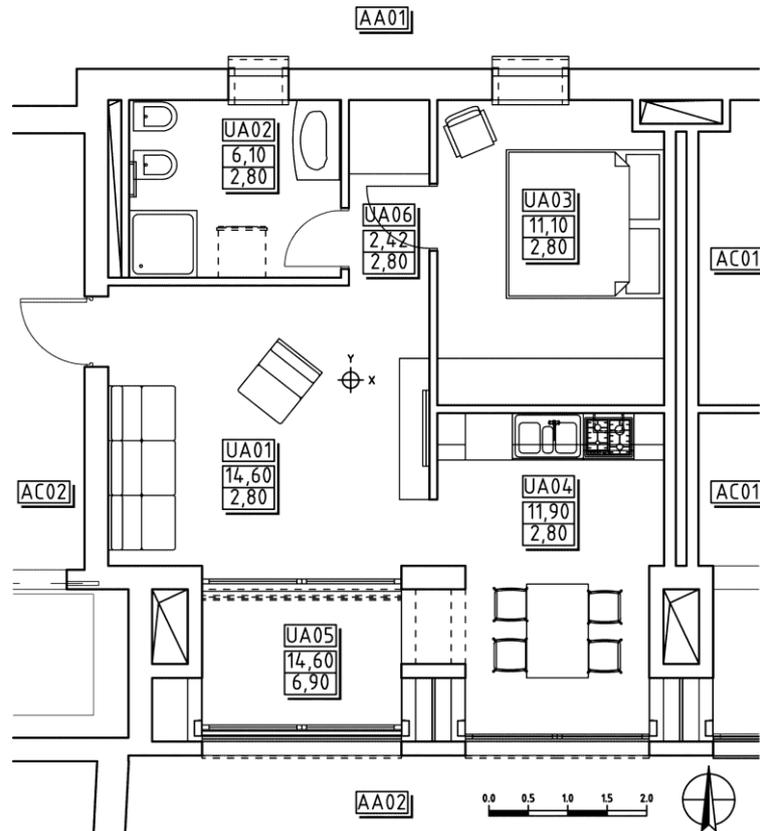


Figura 3-13 Pianta dell'unità immobiliare ed indicazione degli ambienti esterni e delle unità ambientali presenti

Vengono quindi individuati tre differenti ambienti esterni all'aperto (fronte nord, sud e copertura) due al chiuso (altro appartamento, cassa scale) e sei unità ambientali, i cui dati specifici sono riportati nella Tabella 3-1.

Cod.	Descrizione	Superficie	Altezza
UA01	Ingresso	14,60	2,80
UA02	Bagno	6,10	2,80
UA03	Camera da letto	11,10	2,80
UA04	Cucina – pranzo	11,90	2,80
UA05	Serra	6,90	2,80
UA06	Disimpegno	2,42	2,80

Tabella 3-1 Unità ambientali

Inseriti e codificati tutti gli ambienti, esterni ed interni, l'implementazione prosegue su due strade parallele: da un lato occorre procedere alla descrizione dell'organismo edilizio redigendo gli abachi degli elementi tecnici in base ai quali completare i legami relazionali descritti sintetica-

mente nella Figura 2-19; dall'altro, è possibile inserire i modelli di comportamento degli utenti, riferendo le singole azioni elementari alle diverse unità ambientali.

Si individuano così le diverse sezioni che caratterizzano gli elementi opachi verticali (muri perimetrali e divisori); in particolare si riscontrano un'unica chiusura e sei tipologie differenti di tramezzi, ognuno dei quali ha diverse caratteristiche fisiche che lo contraddistinguono dagli altri. Allo stesso modo vengono inseriti i dati relativi agli orizzontamenti (Tabella 3-2).

Cod.	Descrizione	U	Y _A	Y _B	m ₁₂	arg(m ₁₂)	R ₁₂₅	R ₁₀₀₀
CP01	Chiusura esterna	0.26	4.37	3.44	12.16	0.54	49.7	-
PP01	Divisorio cassa scale	0.26	3.42	3.42	15.52	0.79	-	62.3
PP02	Divisorio altri appartam.	0.37	3.94	3.94	5.76	-0.08	-	61.5
PP03	Divisori interni	1.17	2.49	2.49	0.78	3.85	-	50.5
PP04	Cavedio tecnico bagno	0.48	3.73	2.99	2.90	-0.99	-	57.9
PP05	Cavedio tecnico serra	0.50	3.30	3.00	2.72	-1.11	-	57.1
PP06	Cavedio tecnico cucina	0.44	5.32	2.92	4.05	-0.65	-	61.4
CS01	Solaio di copertura	0.32	4.93	4.64	4.11	-0.21	-	52.9
PS01	Solaio interpiano	0.52	7.35	3.79	1.43	-1.21	-	62.8

Tabella 3-2 Abaco delle sezioni relative agli elementi opachi verticali e orizzontali

La procedura di implementazione degli infissi consente invece di ottenere in automatico le prestazioni in funzione dell'uso di tendaggio o dei sistemi di oscuramento allo scopo di poter simulare efficacemente la variazione delle condizioni microclimatiche in funzione della movimentazione che i fruitori effettuano su porte e finestre.

Cod.	Descrizione	A	U	R _{sh}	R ₁₂₅			R ₁₀₀₀
					infisso	Inf.+osc	oscur.	
CI01	Finestra bagno	1.50	2.47	0.20	28.7	33.2	25.2	-
CI02	Finestra camera letto	1.50	2.50	0.20	28.2	32.9	25.2	-
CI03	Finestra cucina	1.26	2.51	0.15	28.0	31.2	0.00	-
CI04	Finestra serra	1.26	2.51	0.15	28.0	31.2	0.00	-
PI01	Porta interna	2.10	0.38	0.00	-	-	-	25.2
PI02	Porta di caposcala	2.10	0.26	0.00	-	-	-	40.9
PI03	Portafinestra serra	1.96	2.52	0.20	-	-	-	40.1

Tabella 3-3 Abaco degli infissi

L'ultima operazione consiste nell'associare gli infissi e gli elementi opachi alle differenti unità ambientali, utilizzando le schede riportate nel capitolo precedente (Figura 2-24 e Figura 2-25).

La descrizione dei modelli di comportamento è realizzata ampliando l'elenco di azioni elementari già conosciute in letteratura², che sono state classificate in funzione degli indicatori di azione (sensazione, intenzione e frequenza) allo scopo di poter eseguire la valutazione del livello atteso di benessere, utilizzando le modalità descritte nel § 2.3.5. In particolare, nella tipologia abitativa si riscontra che quasi la totalità di azioni sono abituali, per cui saranno gli indici di intenzione e sensazione a differenziare l'indicatore di azione sintetico: in particolare, il valore più elevato si riscontra per quei compiti piacevoli o di relax, mentre quelli negativi caratterizzano le operazioni di pulizia dell'appartamento o di studio.

L'inserimento dei modelli di comportamento conclude le operazioni preliminari di implementazione: sono adesso disponibili tutti i dati necessari a descrivere, qualificare e laddove possibile quantificare i parametri relativi alla qualità ambientale ed al livello atteso di benessere.

² Cfr. M. Zaffagnini, *Per una progettazione esigenziale, op. cit.*

Cod	Descrizione	Indicatori di azione			
		frequenza	intenzione	sensazione	val.
001	Entrare e uscire dall'unità immobiliare	Abituale	Volontaria	Indifferente	0,5
002	Prendere e riporre oggetti	Abituale	Volontaria	Indifferente	0,5
003	Comunicare con il telefono	Abituale	Volontaria	Indifferente	0,5
004	Conservare cibi	Abituale	Necessaria	Indifferente	0,0
005	Lavare cibi	Abituale	Necessaria	Indifferente	0,0
006	Preparare cibi	Abituale	Necessaria	Indifferente	0,0
007	Cuocere cibi	Abituale	Necessaria	Indifferente	0,0
008	Lavare piatti e stoviglie	Abituale	Necessaria	Spiacevole	-0,5
009	Riporre temporaneamente rifiuti solidi	Abituale	Necessaria	Spiacevole	-0,5
010	Consumare pasti	Abituale	Volontaria	Piacevole	1,0
011	Rilassarsi in poltrona	Abituale	Volontaria	Piacevole	1,0
012	Assistere alla trasmissione di programmi televisivi o via Internet	Abituale	Volontaria	Piacevole	1,0
013	Ascoltare musica	Abituale	Volontaria	Piacevole	1,0
014	Intrattenere ospiti	Abituale	Volontaria	Piacevole	1,0
015	Rilassarsi all'aperto	Abituale	Volontaria	Piacevole	1,0
016	Coltivare piante e fiori	Abituale	Volontaria	Piacevole	1,0
017	Dormire	Abituale	Volontaria	Indifferente	0,5
018	Stare insieme in intimità	Abituale	Volontaria	Piacevole	1,0
019	Vestirsi e svestirsi	Abituale	Volontaria	Indifferente	0,5
020	Dormire in culla	Abituale	Volontaria	Indifferente	0,5
021	Accudire i neonati	Abituale	Necessaria	Indifferente	0,0
022	Lavarsi e asciugarsi completamente	Abituale	Volontaria	Indifferente	0,5
023	Lavarsi e asciugarsi parzialmente	Abituale	Volontaria	Indifferente	0,5
024	Acconciarsi	Abituale	Volontaria	Indifferente	0,5
025	Soddisfare i bisogni fisiologici	Abituale	Volontaria	Piacevole	1,0
026	Riporre temporaneamente biancheria sporca	Abituale	Necessaria	Indifferente	0,0
027	Lavare biancheria	Abituale	Necessaria	Spiacevole	-0,5
028	Stendere biancheria	Abituale	Necessaria	Spiacevole	-0,5
029	Stirare biancheria	Abituale	Necessaria	Spiacevole	-0,5
030	Lavorare di cucito	Saltuaria	Necessaria	Indifferente	0,0
031	Studiare	Abituale	Obbligatoria	Spiacevole	-1,0
032	Giocare (bambini)	Abituale	Volontaria	Piacevole	1,0
033	Pulire e mantenere l'alloggio	Abituale	Necessaria	Spiacevole	-0,5
034	Lavorare a computer	Abituale	Necessaria	Indifferente	0,0
035	Leggere	Abituale	Necessaria	Piacevole	0,5

Tabella 3-4 Azioni elementari e loro indicatori (in corsivo le azioni aggiunte)

3.2.2 Valutazione del comfort

Mentre nei sistemi statici di valutazione, il protocollo prevede prima la stima dei parametri ambientali e poi la verifica del comfort, nel metodo proposto si adotta invece un processo iterativo: partendo dalle condizioni iniziali di azzeramento di tutti gli indici del comfort, il metodo riproduce l'evoluzione nel tempo delle condizioni ambientali e le conseguenti scelte che, ora per ora, l'utente compie nel tentativo di massimizzare il livello atteso di benessere, utilizzando la già detta scala di priorità³.

Nel caso in esame, la simulazione viene compiuta per ogni modello di comportamento inserito - e quindi per ogni classe di utenze considerata - ed è ripetuto per i dodici mesi dell'anno; i risultati sono resi disponibili per quel brevissimo periodo in cui è possibile tracciare l'andamento del comfort orario. Per ottenere una stima rappresentativa delle condizioni che si

³ Cfr. § 2.3.5.

riscontrano all'interno di un organismo edilizio è comunque possibile limitare l'analisi ai due mesi dell'anno che sono caratterizzati dalle condizioni più estreme dal punto di vista igrotermico, e cioè a gennaio ed a luglio, quando temperatura ed irraggiamento raggiungono i valori più estremi. Anche l'inquinamento acustico è, rispettivamente, minimo e massimo in quanto gli utenti tendono ad utilizzare gli infissi esterni secondo modalità diametralmente opposte, tenendoli tendenzialmente chiusi nella stagione invernale, ed aperti in quella estiva.

Prima di procedere alla valutazione vera e propria è opportuno sottolineare ancora una volta che il benessere *non* è una qualità degli ambienti, ma piuttosto un'interazione complessa tra utenti e spazio fisico. Per tale motivo il valore che si ottiene non rappresenta una sorta di *marchio di qualità* di un organismo edilizio in quanto modificando la tipologia di utenza, e di conseguenza il suo modello di comportamento, varierà anche la stima del comfort. Se ne deduce quindi che il livello atteso di benessere è il risultato di una dicotomia Uomo-Architettura, e che l'attribuzione della specifica di prestazione ad uno soltanto di essi è un'operazione scorretta.

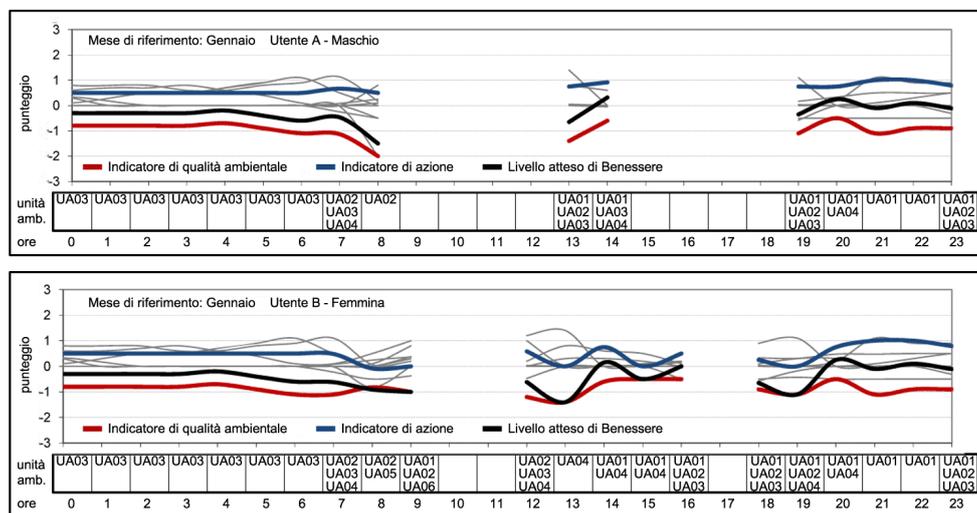


Figura 3-14 Andamento temporale degli indici degli utenti A e, in basso, B nel mese di gennaio

Proseguendo quindi con il caso studio, la procedura ha eseguito le simulazioni necessarie a stabilire l'andamento dei diversi indici nel tempo, ottenendo i diagrammi riportati in Figura 3-14. Per prima cosa occorre osservare che la permanenza dell'utente A all'interno dell'appartamento è ridotta rispetto alla donna in quanto, nella definizione dei rispettivi profili, è risultato che la seconda è impegnata nel lavoro domestico. È immediato notare che nelle ore di assenza all'interno dell'alloggio la valutazione non viene effettuata; inoltre gli indici sono tutti contenuti entro un intervallo compreso tra -1 e +1, quindi in una condizione di sostanziale neutralità, con una leggera tendenza al discomfort. Effettuando la media sulle ventiquattro ore infatti si ricava un indice LaB di -0.3 per l'utente A, e -0.4 per l'utente B. La condizione di sostanziale omogeneità è derivata dal fatto che, nelle ore di convivenza dei due fruitori, la procedura sceglie il set di soluzioni che minimizza il disagio di entrambi. Altra notazione di rilievo è costituita dal fatto che nell'arco dell'intera giornata non è necessario ricorrere ad impianti di riscaldamento ad esclusione del bagno dove, per motivi legati alla necessità di svestirsi per potersi lavare, si nota un discomfort termigrometrico più spiccato.

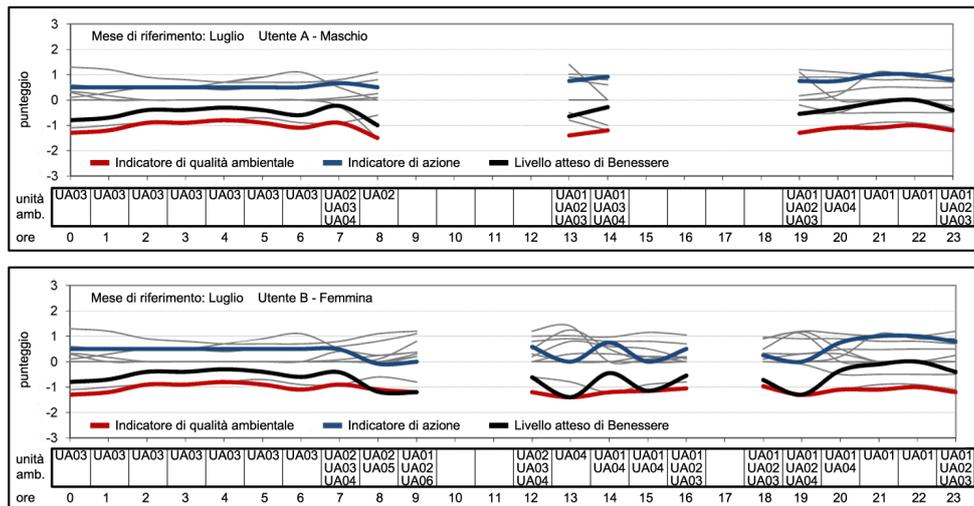


Figura 3-15 Andamento temporale degli indici degli utenti A e, in basso, B nel mese di luglio

L'illuminazione artificiale è attiva dalle 17.00 alle 8.00 del giorno successivo in quanto nei mesi invernali il sorgere ed il tramontare del sole non consentono di disporre di molte ore di luce naturale. Diverso è quanto si riscontra nel mese estivo di luglio: qui il programma, nella simulazione dell'attività dell'utente, ha dovuto mediare tra la minimizzazione del discomfort igrotermico - che si sarebbe ridotto notevolmente lasciando tutti gli infissi aperti per favorire la ventilazione incrociata degli ambienti - e quella del discomfort uditivo - che poteva essere abbattuto chiudendo tutte le finestre sul fronte nord.

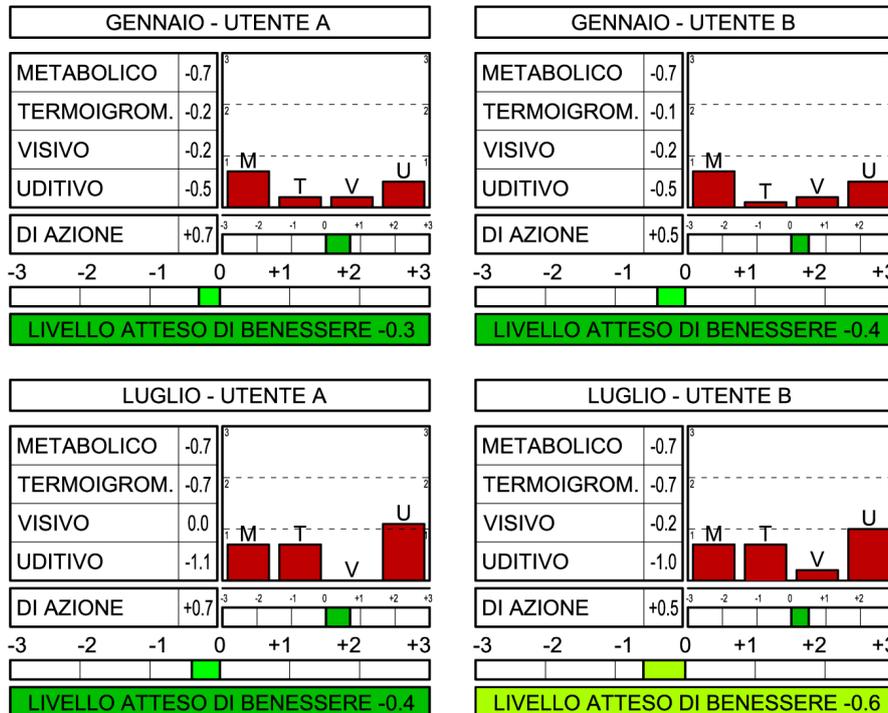


Figura 3-16 Icone sintetiche degli indici e dei livelli attesi di benessere

La soluzione intermedia adottata ha consentito di ridurre l'indice LaB a -0.4 per l'uomo ed a -0.6 per la donna, restando quindi in una zona di sostanziale neutralità, come già verificato in inverno. Questa volta le ore di impiego dell'illuminazione artificiale si riducono all'intervallo di tempo che va dalle 20.00 alle 7.00 del giorno successivo, mentre sistemi attivi di condizionamen-

to non sono risultati necessari. Emerge comunque dall'analisi degli indici relativi al comfort uditivo la necessità di provvedere, grazie all'impiego di barriere anti rumore, ad un'efficace isolamento del tratto autostradale così prossimo alla costruzione: ciò consentirebbe di ridurre ancora di più il disagio degli utenti, e quindi di ottenere livelli attesi di benessere più elevati.

L'analisi condotta ha permesso di verificare che l'approccio adattivo consente di analizzare le prestazioni dell'organismo edilizio in modo più completo, perché non solo restituisce una valutazione globale dell'unità immobiliare, ma mette in luce quali sono le prestazioni da incrementare per migliorare la soddisfazione dei fruitori nei confronti dell'ambiente fisico che li circonda. L'uso di diagrammi che sintetizzano le stime ottenute (Figura 3-16) rende più agevole la lettura dei risultati, raggruppati per indici termigrometrici (T), metabolici (M), visivi (V), uditivi (U) e di azione. Il metodo si è poi dimostrato sufficientemente flessibile nella implementazione delle caratteristiche degli ambienti e dei modelli di comportamento, restituendo stime molto prossime ai valori attesi per il caso studio preso in esame.

3.3 Conclusioni

3.3.1 Approfondimenti possibili per il modello

Il modello qui proposto per la verifica della biocompatibilità potrebbe essere approfondito e, in seguito all'uso collaudato, reso maggiormente appropriato ai diversi scopi. Le possibili modifiche si raggruppano in due categorie: sostanziale e procedurale. Le modifiche sostanziali comprendono tutti quei miglioramenti che possono allargare la definizione di livello atteso di benessere, utilmente estendibile ad altri campi, quali:

- l'ergonomia degli ambienti;
- la qualità dell'aria interna ed esterna;
- lo stress mentale degli utenti;
- la qualità socioeconomica della vita.

La qualità dell'aria il campo più facilmente inseribile, in quanto il modello già esegue stime sulla portata d'aria in ingresso/uscita dagli ambienti; occorrerebbe aggiungere una procedura per inserire i dati relativi all'inquinamento atmosferico, e trovare una famiglia di indicatori in grado di eseguire la valutazione del comfort relativo. Più complicati appaiono gli altri punti. L'ergonomia degli ambienti comporta due ordini di difficoltà: il primo è di tipo *parametrico*, poiché occorre individuare quale set di valori è sufficientemente caratterizzante il problema e, in seconda battuta, effettuare la stima sintetica della comodità degli spazi. Stress mentale e qualità socioeconomica sono invece fenomeni molto complessi per i quali si dispone già di metodi di approccio e di calcolo, che però richiedono una conoscenza particolarmente dettagliata del fenomeno, e conseguentemente tempi di raccolta, organizzazione ed elaborazione dei dati molto lunghi.

Dal punto di vista procedurale, l'impiego dei fogli di calcolo ha evidenziato alcuni limiti del modello, sia nella gestione dinamica dei dati che nella possibilità di meccanizzare efficacemente le diverse procedure. Ambienti di programmazione diversi, come il VBA™ applicato a database, o ancora C++™ in modalità Visual, permetterebbero la scrittura di un software *stand alone* di facile gestione per utenti terzi, che non sarebbero costretti ad utilizzare programmi distinti per ricavare i dati da inserire nel metodo. In particolare potrebbe essere implementato l'intero modello geo-

referenziato WGS84 – tra l'altro disponibile come *open source* in diversi formati di importazione – consentendo di evitare i passaggi in ambiente CAD che si rendono ora necessari per definire l'orizzonte geografico.

Altri margini di miglioramento si individuano nelle procedure di stima delle caratteristiche fisiche: in particolar modo l'illuminamento naturale potrebbe essere perfezionato utilizzando fattori di forma in grado di modellare meno approssimativamente gli ambienti, ed utilizzarli anche nella stima della propagazione dei rumori, inserendo sistemi sintetici di valutazione del tempo di riverberazione.

3.3.2 Applicabilità della ricerca

Come detto, il metodo può essere utilmente impiegato per sviluppare un software *stand alone* in grado di funzionare senza la necessità di ricorrere ad altri applicativi. Allo stesso modo, è in grado di scambiare dati con altri programmi grazie a formati di importazione ed esportazione già disponibili da tempo, come il linguaggio marcatore *xml* o il più complesso *IGES*, quest'ultimo utilizzabile direttamente in ambienti CAD. Ciò consente, almeno in linea di principio, di inquadrare il metodo proposto in un'ottica di *interoperabilità concettuale e tecnica*, in un panorama dove diversi protocolli consentono l'automatizzazione del flusso dei dati, permettendo sia un notevole risparmio di risorse nell'elaborazione delle soluzioni progettuali, sia un migliore controllo dell'errore, perché si riduce l'apporto umano nel lungo e noioso compito di trascrizione delle informazioni da un sistema all'altro. Dopotutto questo rappresenta lo scenario futuribile che le principali software houses propongono attraverso pacchetti che integrano sistemi di modellazione assistita e sistemi di calcolo diversi.

In realtà questo metodo di valutazione è nato dalla convinzione che, almeno allo stato attuale, la tecnologia *BIM* si trova di fronte ad un *empasse* di tipo pratico, che – a mio parere – è ancora lontano dall'essere risolto. Un sistema di modellazione informatizzata basa la sua potenza sulla possibilità di lavorare con oggetti tridimensionali riconosciuti direttamente sia come elemento tecnico sia come parte di esso – e non come semplici primitive geometriche; agli elementi tecnici si può utilmente associare un set di informazioni impiegabili all'interno di sistemi di calcolo, i cui dati di ingresso deriverebbero direttamente dal database del programma CAD. La debolezza del sistema risiede dunque proprio nella necessità di dover modellare l'intero progetto, e quindi di conoscere già tutte le soluzioni formali e tecnologiche, che sono a disposizione soltanto in fase di progettazione definitiva. Al contrario, scelte di orientamento dei prospetti, forma e dimensione degli ambienti e tecniche di esecuzione sono elementi fondamentali che condizionano l'intero funzionamento dell'architettura, e devono essere sviluppate già durante il preliminare, dove ancora non sono disponibili risorse economiche e informazioni dettagliate per poter impiegare sistemi di progettazione e calcolo così potenti. Perciò questo metodo è strutturato attraverso un database relazionale che consente di inserire i dati senza dover necessariamente restituire il modello tridimensionale in ambiente CAD, rendendo così più rapida l'implementazione e permettendone l'uso anche agli operatori con un ridotto livello di conoscenza tecnica. Lo scopo è ottenere uno strumento di lavoro semplice e veloce, utilizzabile anche da chi non possiede specifiche abilità nel campo della valutazione del comfort e delle tecniche di modellazione, e di renderlo particolarmente adatto per l'impiego negli Uffici Tecnici e negli studi professionali.

Appendice

4 Procedure utilizzate nel metodo

4.1 Prelievo ed elaborazione dei dati

4.1.1 Scala globale, territoriale ed urbana

4.1.1.1 Geo-morfologia ed antropizzazione del territorio

I dati da raccogliere alla grande scala possono essere relativi tanto al luogo in cui si effettua il calcolo quanto a una località di riferimento di cui siano noti, ad esempio, il clima meteorologico o acustico; alcuni di questi dati sono comuni ad entrambe le località, mentre altri sono specifici soltanto per il luogo di calcolo. Tra le informazioni relative a tutte le località si annoverano:

- coordinate geografiche ed altitudine
- distanza minima rispetto al mare
- livello di antropizzazione del territorio

sono invece riferiti alla sola località di calcolo le seguenti:

- distanza e inclinazione rispetto alle località di riferimento
- ostacoli naturali per determinare la linea di orizzonte

Utilizzando carte geografiche con scala 1:1000000 è possibile individuare le coordinate geografiche con un'approssimazione fino al primo di grado, a cui corrisponde una distanza massima – alle nostre latitudini – di circa 2 km, mentre per arrivare ad approssimazioni fino al secondo di grado occorre impiegare aerofotogrammetrie con scala 1:5000 o 1:1000; queste ultime consentono anche di leggere le altitudini con un errore inferiore al metro, e sono indispensabili per individuare con precisione la posizione del luogo di calcolo. In generale, per tutte le altre località, è possibile impiegare un qualsiasi programma di geo-referenziazione disponibile direttamente sulla rete Internet¹. In tutti i casi, dopo aver prelevato le coordinate geografiche del luogo, si può individuare la distanza minima rispetto al mare attraverso gli strumenti di misura che questi programmi rendono disponibili; nel caso in cui, ad e-

¹ Per conoscere la precisione di questi strumenti, *cfr.* § 2.2.4.

sempio, si impieghi Google Earth™, si traccia con lo strumento Righello la linea che separa la località dalla linea di costa e si legge su una finestra mobile il valore corrispondente. La determinazione della fascia di antropizzazione a cui appartiene la porzione di territorio osservato è molto semplice in quanto i softwares di mappatura della superficie terrestre, mettendo a disposizione i rilievi fotografici, consentono una immediata valutazione della percentuale di superficie costruita, a scala urbana, in base alla quale è possibile eseguire la classificazione riportata nella Tabella 2-3.

Il calcolo della distanza tra due punti può essere facilmente meccanizzata in un foglio di calcolo o in un database, quando sono note le rispettive coordinate geografiche, grazie alla relazione del *great circle*:

$$d = R \arctan \left(\frac{\sqrt{(\cos \varphi_{la,1} \sin \Delta \gamma_{lo})^2 + (\cos \varphi_{la,2} \sin \varphi_{la,1} - \sin \varphi_{la,2} \cos \varphi_{la,1} \cos \Delta \gamma_{lo})^2}}{\sin \varphi_{la,2} \sin \varphi_{la,1} + \cos \varphi_{la,1} \cos \varphi_{la,2} \cos \Delta \gamma_{lo}} \right), \quad (4.1)$$

dove d è espresso in chilometri, i pedici 1 e 2 indicano i due punti e $\Delta \gamma_{lo}$ è la differenza tra le loro longitudini, ed R è il raggio medio della terra, pari a 6371,01 km. L'inclinazione rispetto alla direzione nord² della località 2 rispetto ad un osservatore posto nel punto 1, ferme restando le convenzioni stabilite per la (4.1), può essere calcolata come:

$$\beta = f - \arctan \left(\frac{\tan \varphi_{la,2}}{\sin \Delta \gamma_{lo}} - \frac{\tan \varphi_{la,1}}{\tan \Delta \gamma_{lo}} \right), \quad (4.2)$$

avendo posto $f = 270^\circ$ se $\gamma_{lo,2} < \gamma_{lo,1}$, altrimenti $f = 90^\circ$.

La determinazione della distanza limite di osservazione della morfologia del territorio può essere calcolata in base alla relazione:

$$d_{lim} = R \left(\arctan \left(\frac{R}{R+z} \right) + \arctan \left(\frac{R}{R+z'} \right) \right), \quad (4.3)$$

dove R è il raggio medio della terra, pari a 6371,01 km, mentre z e z' sono le altitudini, espresse in chilometri, del luogo di calcolo e del rilievo più alto presente nella regione geografica³. La (4.3) rappresenta l'arco di circonferenza che separa i due punti P e P' proiettati sulla superficie terrestre - approssimata ad una sfera - nella condizione di maggior svantaggio, e cioè quando non si frappone nessun altro ostacolo naturale (Figura 4-1).

Ponendo $z' = 0$, la (4.1) restituisce la distanza tra l'osservatore e la linea di orizzonte della geoide (l'arco di cerchio sotteso dai raggi CP e CO della Figura 4-1), mentre il valore di α , pari a $\arctan[R/(R+z)]$, è equivalente all'angolo di osservazione sotto il quale appare l'orizzonte geodetico. Conosciuto d_{lim} , è possibile importare direttamente in AutoCAD™ la forma della porzione di territorio inquadrato nella finestra di Google Earth™ in

² Si considera la convenzione destrogira con origine nella direzione Nord che viene utilizzata per la determinazione della direzione del vento, e cioè $N = 0^\circ$, $E = 90^\circ$.

³ L'utilità della (4.3) consiste nel restringere il campo di osservazione alla porzione di territorio che realmente può essere determinante ai fini dei calcoli per la determinazione dei dati ambientali, valutando la distanza limite nel caso in cui i rilievi siano posizionati nella condizione più sfavore in assoluto. L'altezza massima a cui si fa riferimento può quindi considerarsi il più alto ostacolo naturale presente nella regione, che può essere individuato facilmente tramite una cartina geografica; in caso di incertezza, una stima comunque pessimistica del valore di z' porterà ad una sopravvalutazione della distanza minima.

un elemento *mesh* 32×32 utilizzando una *tool* messa a disposizione gratuitamente da Autodesk™ e scaricabile dal suo sito internet⁴.

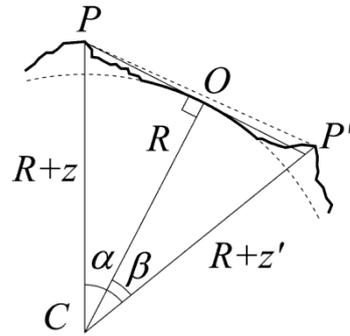


Figura 4-1 Costruzione trigonometrica per la determinazione della distanza limite di osservazione della morfologia del territorio

Mantenendo al centro dell'immagine la località di riferimento, occorre variare l'altitudine di osservazione in modo che il lato corto del rettangolo mostrato in Google Earth™ sia pari al doppio della distanza limite (Figura 4-2); dato che la procedura dipende dall'estensione del territorio visibile nella finestra del programma, e questa a sua volta è funzione delle dimensioni del monitor e dei settaggi della scheda video, non è possibile dare indicazioni generali sull'altitudine da raggiungere per ottenere la giusta inquadratura, che deve essere necessariamente controllata utilizzando lo strumento Righello.

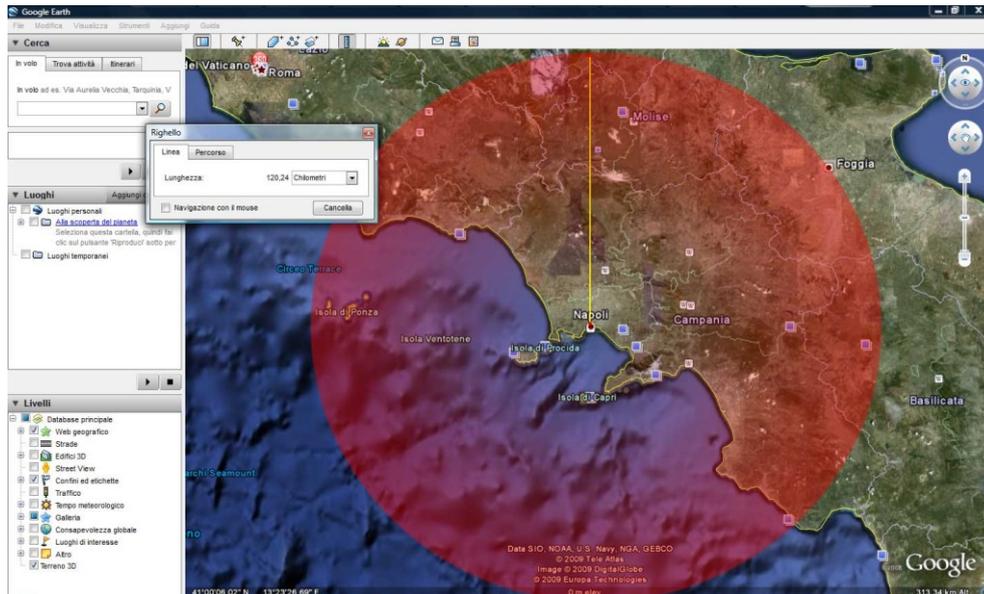


Figura 4-2 Finestra di Google Earth™ nella quale viene definita l'altitudine in funzione della distanza limite

L'importazione in AutoCAD™ avviene utilizzando il comando `ImportGEMesh` che creerà una *mesh* all'interno del *model space*, della quale richiede il punto di inserimento e la rotazione⁵. A causa della impossibilità di aumenta-

⁴ Il *plug-in* è disponibile all'indirizzo http://labs.autodesk.com/utilities/google_earth_extension_beta/. Sono disponibili specifiche *tool* a partire dalla versione 2006. Installato il *plug-in*, lo stesso deve essere caricato in AutoCAD™ ad ogni avvio utilizzando la stringa di comando `Appload` e selezionando il file `AeccDWGT0-GE.arx` presente nella directory di installazione del programma.

⁵ Per avere un riferimento preciso, è buona norma inserire la *mesh* al centro

re la precisione della discretizzazione della superficie, si rende necessario ripetere più volte l'operazione, diminuendo l'altitudine, per ottenere più elementi sovrapposti di dimensioni differenti (Figura 4-3). La Tabella 4-1 riporta una serie di distanze, classificate in funzione della scala di osservazione, che possono essere utilizzate in combinazione con Righello per inquadrare le diverse porzioni di territorio; questi valori, che impiegano un rapporto di ingrandimento di circa 1:3, consentono di diminuire il numero di importazioni, mantenendo al contempo una buona approssimazione della superficie terrestre in funzione della distanza dal punto di osservazione⁶.

Scala globale		Scala territoriale		Scala urbana		
> 300 km	300 km	100 km	30 km	10 km	3 km	1 km

Tabella 4-1 Distanze di riferimento per l'importazione delle mesh

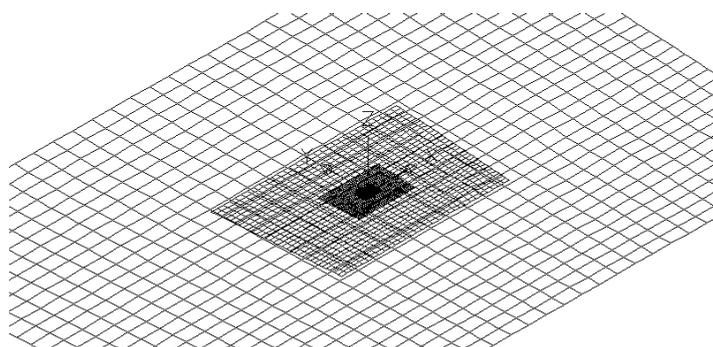


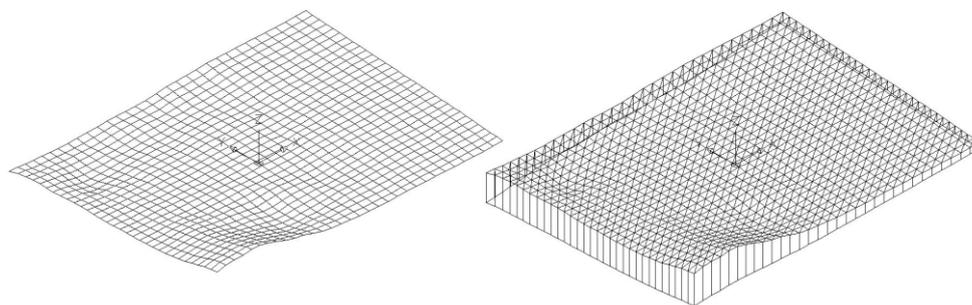
Figura 4-3 Superfici importate con diversi fattori di ingrandimento

La linea di orizzonte può essere ora determinata in un ambiente CAD in grado di gestire gli oggetti ottenuti dal software di georeferenziazione, calcolando, per tutte le ventiquattro direzioni di interesse, l'altezza angolare β sottesa alla linea che congiunge il punto di osservazione P alla sommità del massimo rilievo visibile P' come arcoseno del rapporto tra la distanza PP' e la differenza di quota HP' (Figura 4-4)⁷.

del sistema di riferimento, confermando al prompt dei comandi il punto di coordinate 0, 0 e rotazione 0. È bene verificare, con una finestra di Render, che la mesh non sia capovolta; per agevolare il controllo, può essere d'aiuto aver selezionato Confini ed etichette nel menù Livelli di Google Earth™.

⁶ Anche se non è importante per determinare il valore dell'altezza angolare, occorre notare che l'unità di misura delle mesh importate è il millimetro, per cui, volendo lavorare in metri o in chilometri, occorre scalare gli oggetti con fattori di 0.001 e 0.000001 rispettivamente.

⁷ Utilizzando AutoCAD™ può essere utile trasformare le mesh in solidi ma, mentre la versione 2010 supporta un comando dedicato, per le precedenti releases occorre scaricare il tool gratuito Face-to-Solid sviluppato in AutoLisp™ da Bill Gillis e disponibile all'indirizzo <http://jdimyadi.googlepages.com/F2S.lsp>. Il risultato che si ottiene è visibile nella seguente figura:



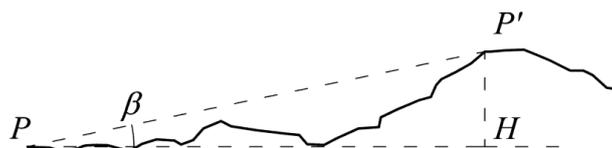


Figura 4-4 Sezione del terreno per la determinazione dell'altezza angolare

Sempre a scala urbana è di grande importanza stabilire la morfologia dell'ambiente costruito, perché influenza notevolmente i parametri fisici che concorrono a determinare le condizioni ambientali all'interno delle quali si effettua la stima. Nella Tabella 2-3 sono riportate cinque fasce di antropizzazione, classificate in funzione della percentuale di superficie planimetrica fabbricata (occupata cioè da edifici, strade, infrastrutture) rispetto a quella totale⁸. A queste sono associate altri cinque gruppi relativi alle altezze medie delle costruzioni, corrispondenti a 6, 7, 9, 15 e 18 metri rispettivamente. Nei paragrafi successivi le fasce di antropizzazione saranno utilizzate allo scopo di individuare coefficienti correttivi o caratteristiche medie delle variabili fisiche necessarie alla valutazione del comfort.

A scala di edificio è necessario impiegare una cartografia della zona allo scopo di ricostruire lo *sky line* dovuto alla presenza di costruzioni. Lavorando in ambiente CAD, si determina per ogni direzione l'altitudine del piano di campagna e della copertura dell'ostacolo visto con l'angolo di osservazione più elevato, e la distanza rispetto al baricentro dell'area di sedime dell'unità immobiliare oggetto della valutazione; questo consente di ricavare un diagramma sostanzialmente simile a quello riportato nella Figura 2-14, al quale quest'ultimo si sovrappone. Quando occorre determinare la linea di orizzonte visibile da un altro punto, come ad esempio da un infisso, è possibile operare nel seguente modo:

- la linea geografica resta invariata, in quanto gli ostacoli naturali sono sufficientemente distanti da generare un errore di parallasse e di altezza di osservazione estremamente ridotto, e quindi trascurabile;
- la linea determinata dalla presenza di costruzioni a scala di edificio deve essere ricalcolata in funzione dello spostamento dell'origine, in quanto la distanza tra l'osservatore e gli ostacoli risulta modificata.

Conoscendo le coordinate del nuovo punto di osservazione e quelle degli ostacoli rispetto all'origine baricentrica, la distanza può essere semplicemente valutata grazie alla nota formula del teorema di Pitagora (o della distanza archimedeica tra due punti), mentre l'angolo di osservazione è pari all'arcotangente del rapporto tra l'altezza dell'ostacolo e la distanza precedentemente calcolata.

Per calcolare le superfici che delimitano l'invaso a base rettangolare di cui al § 2.2.4, occorre prima di tutto definire il fronte a cui appartiene l'edificio – che qui sarà denominato *fronte principale*; questo è limitato alla superficie su cui giacciono una o più chiusure dell'unità immobiliare, ivi

Il file F2S.lsp deve essere caricato all'avvio attraverso il consueto `Appload`; per poter eseguire il comando `F2S` però occorrerà prima esplodere le mesh con `Explode`. Ottenuti i solidi (che conviene unificare con `Union`) è possibile generare le sezioni del terreno usando `Section` grazie alle quali si può più facilmente determinare le distanze PP' e HP' .

⁸ La percentuale differisce dall'indice di fabbricazione perché quest'ultimo considera esclusivamente le aree di sedime degli edifici, escludendo quindi tutte le superfici lastricate che vengono qui prese in considerazione.

compresi aggetti non particolarmente sporgenti (la cui entità non superi il 20% della lunghezza dell'intero fronte, come in Figura 2-15), del quale può calcolarsi sia la lunghezza l_0 che l'altezza media Z_0 , e quindi l'area A_0 . qualora fossero presenti altre costruzioni sul lato opposto, sarà possibile calcolarne la superficie nel seguente modo: si proiettano in pianta le lunghezze dei diversi prospetti su una retta parallela alla direzione del fronte principale, limitatamente al tratto ad esso prospiciente, e si esegue la somma (detta l_1); si determina poi l'altezza media degli ostacoli Z_1 ; l'area del secondo fronte è quindi pari al prodotto $A_1 = \min\{l_0, l_1\} \times \min\{Z_0, Z_1\}$. Il modello considererà quindi che ci sia un rettangolo parallelo al fronte principale, di lunghezza l_0 ed altezza A_1 / l_0 , posto ad una distanza d_1 equivalente alla media aritmetica delle distanze dei singoli ostacoli. Allo stesso modo si opererà per gli elementi posti ai due lati⁹, proiettandone le lunghezze sulla direzione perpendicolare a quella del fronte principale e sommandone i valori (detti l_2 e l_3); determinandone le altezze medie Z_2 e Z_3 si ottengono le aree $A_2 = \min\{l_0, l_2\} \times \min\{Z_0, Z_2\}$ e $A_3 = \min\{l_0, l_3\} \times \min\{Z_0, Z_3\}$. Anche qui il modello considererà che l'invaso abbia due superfici rettangolari a destra ed a sinistra, di pari lunghezza l_0 e di altezza A_2 / l_0 e A_3 / l_0 rispettivamente, posti a distanza d_2 e d_3 equivalenti alla media calcolata rispetto agli estremi destro e sinistro del fronte principale.

4.1.1.2 Dati meteorologici

Per poter definire il clima meteorologico per una località di studio occorre determinare le seguenti medie giornaliere medie mensili:

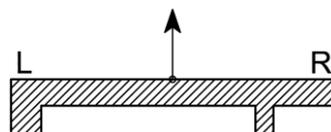
- $\theta_{a,med}$ - temperatura di bulbo asciutto dell'aria e sua deviazione standard;
- $\Delta\theta$ - escursione termica di bulbo asciutto dell'aria;
- RH_{med} - umidità relativa;
- ΔRH - escursione dell'umidità relativa;
- \bar{I} - irradianza oraria;
- RN - precipitazioni e giorni di assenza di pioggia;
- $v_{a,med}$ - velocità dell'aria e sua deviazione standard;
- $\beta_{a,med}$ - direzione del vento e sua deviazione standard.

Per determinare la temperatura media giornaliera media mensile si individua quale stazione - UNI o AM - appartenente alla stessa zona geografica (cfr. Tabella 4-2) è più vicina alla località di calcolo; per fare ciò occorre preventivamente aver individuato le coordinate delle stazioni dell'Atlante Meteorologico con i metodi descritti in § 4.1.1.1. Come stabilito dalla norma UNI, a meno di $\Delta\theta_{ant}$ la temperatura media mensile è determinata dalla relazione¹⁰:

$$\theta_o = \theta_{o,ref} - (z - z_{ref}) \partial_z \theta + \Delta\theta_{ant}, \quad (4.4)$$

dove $\partial_z \theta$ è il gradiente termico verticale, dipendente dalla zona geografica di appartenenza (Tabella 4-2).

⁹ Per convenzione si considererà sempre che l'osservatore guardi in pianta il fronte come in figura (con la normale rivolta verso l'esterno), distinguendo così univocamente il lato destro (R) rispetto a quello sinistro (L).



¹⁰ Cfr. UNI 10349, op. cit..

Zona geografica	$\partial_z \theta$ [°C/m]
Italia settentrionale transpadana	1/178
Italia settentrionale cispadana	1/200
Italia centrale e meridionale	1/147
Sicilia	1/174
Sardegna	1/192

Tabella 4-2 Gradiente termico verticale in funzione della zona geografica

Per tener conto dell'effetto *isola di calore* che si riscontra nei luoghi altamente costruiti, si propone di introdurre un coefficiente di correzione $\Delta\theta_{ant}$ in funzione del livello di antropizzazione¹¹: individuato il livello sia per la località di riferimento e per il luogo di calcolo, la Tabella 4-3 fornisce sia il fattore correttivo medio annuale che il coefficiente mensile, il cui prodotto rappresenta appunto lo scarto termico $\Delta\theta_{ant}$ da sommare nella (4.4).

		Località di riferimento				
		I	II	III	IV	V
Luogo di calcolo	I	0.0	-0.5	-1.0	-1.5	-2.0
	II	+0.5	0.0	-0.5	-1.0	-1.5
	III	+1.0	+0.5	0.0	-0.5	-1.0
	IV	+1.5	+1.0	+0.5	0.0	-0.5
	V	+2.0	+1.5	+1.0	+0.5	0.0

Dicembre	Gennaio	Febbraio	Marzo	Aprile	Maggio	Giugno
	Novembre	Ottobre	Settembre	Agosto	Luglio	
1.3	1.2	1.1	1.0	0.9	0.8	0.7

Tabella 4-3 Coefficiente di correzione funzione del livello di antropizzazione del territorio

Il calcolo della deviazione standard della media mensile proposto è espresso dalla relazione:

$$SD_{\theta,med} = \frac{d_1 SD_{\theta,med1} + d_2 SD_{\theta,med2}}{d_1 + d_2}, \quad (4.5)$$

dove i pedici 1 e 2 si riferiscono alle due stazioni meteo dell'Atlante Meteorologico più vicine alla località di calcolo, d alle loro distanze, e $SD_{\theta,med}$ alle loro deviazioni standard, valutabili come la metà della media calcolata tra le differenze fra l'85° ed il 15° percentile delle temperature massima e minima media mensile.

L'escursione termica può essere valutata conoscendo:

- il valore dell'escursione per la località di riferimento scelta dall'Atlante meteorologico d'Italia, calcolata come differenza tra la temperatura massima e minima media mensile;
- la fascia di antropizzazione del territorio, la distanza dalla linea di costa e l'altitudine della località di riferimento e di calcolo, valutate utilizzando i gruppi di classificazione illustrate nella Tabella 2-3, Tabella 2-4 e Tabella 2-5.

Si propone di calcolare il valore dell'escursione termica con la relazione:

$$\Delta\theta = \Delta\theta_{ref} \left(1 - \frac{f_{ant} + 2f_{sea}}{15} + \frac{4}{5\pi} \arctan \left[\frac{5f_{alt}}{3} \right] \right), \quad (4.6)$$

dove f_{ant} , f_{sea} e f_{alt} sono desumibili dalla Tabella 4-4.

¹¹ Cfr. Tabella 2-3.

Luogo di calcolo	f_{ant}	Località di riferimento					Luogo di calcolo	f_{sea}	Località di riferimento		
		I	II	III	IV	V			A	B	C
I	0	-1	-2	-3	-4	A	0	-1	-2		
II	1	0	-1	-2	-3	B	1	0	-1		
III	2	1	0	-1	-2	C	2	1	0		
IV	3	2	1	0	-1						
V	4	3	2	1	0						

Luogo di calcolo	f_{alt}	Località di riferimento					
		(1)	(2)	(3)	(4)	(5) – (6)	(7) – (8)
(1)	0	1	2	3	4	5	
(2)	-1	0	1	2	3	4	
(3)	-2	-1	0	1	2	3	
(4)	-3	-2	-1	0	1	2	
(5) – (6)	-4	-3	-2	-1	0	1	
(7) – (8)	-5	-4	-3	-2	-1	0	

Tabella 4-4 Variabili per il calcolo dell'escursione termica

La distribuzione oraria della temperatura, coerentemente con quanto indicato nella norma, viene calcolata grazie alla relazione:

$$\theta[t] = \theta_{med} + \Delta\theta \left(\frac{1}{2} - f_t \right), \quad (4.7)$$

dove il coefficiente di distribuzione f_t è riportato nella Tabella 4-5.

ora	f_t										
1	0.87	5	1.00	9	0.71	13	0.11	17	0.10	21	0.58
2	0.92	6	0.98	10	0.56	14	0.03	18	0.21	22	0.68
3	0.96	7	0.93	11	0.39	15	0.00	19	0.34	23	0.76
4	0.99	8	0.84	12	0.23	16	0.03	20	0.47	24	0.82

Tabella 4-5 Fattore di distribuzione orario

Esprimendo l'umidità media mensile in termini relativi, individuata la località di riferimento più vicina - scelta indifferentemente tra quelle presenti nella UNI o nell'Atlante Meteorologico - si propone di calcolare il valore:

$$RH_{med} = RH_{med,ref} + \Delta RH_{ant} + \Delta RH_{sea}; \quad (4.8)$$

per poter applicare la (4.8) utilizzando i dati della norma, occorre preventivamente trasformare i valori di pressione parziale per esprimerli in termini di umidità relativa, tramite la nota formula di Magnus:

$$p_{vs} = 610.78 e^{\frac{17.5043 \theta_a}{241.2 + \theta_a}}, \quad RH_{med} = 100 \frac{p_{va}}{p_{vs}}, \quad (4.9)$$

mentre se la stazione meteo proviene dall'Atlante, allora $RH_{med} = (RH_{max} - RH_{min})/2$. Gli incrementi ΔRH_{ant} e ΔRH_{sea} sono funzione della differenza di antropizzazione del territorio, desumibile dalla Tabella 2-3, e di vicinanza alla linea costiera, suddivisa nelle tre fasce della Tabella 2-4, e sono riportate nella Tabella 4-6.

Luogo di calcolo	ΔRH_{ant}	Località di riferimento					Luogo di calcolo	ΔRH_{sea}	Località di riferimento		
		I	II	III	IV	V			A	B	C
I	0	5	7.5	12.5	15	A	0	2.5	5		
II	-5	0	5	7.5	12.5	B	-2.5	0	2.5		
III	-7.5	-5	0	5	7.5	C	-5	-2.5	0		
IV	-12.5	-7.5	-5	0	-1						
V	-15	-12.5	-7.5	-5	0						

Tabella 4-6 Incremento di umidità relativa

Individuata la stazione meteo AM più vicina, si adotterà la sua escursione ΔRH_{rif} calcolabile come differenza tra il valore massimo e minimo, ma facendo in modo che RH_{max} non sia superiore a 100% e RH_{min} non sia inferiore a 40%; si può quindi scrivere la relazione:

$$\Delta RH = \min\{\Delta RH_{ref}, 200 - 2RH_{med}, 80 + 2RH_{med}\}, \quad (4.10)$$

grazie alla quale è possibile ora determinare la distribuzione dell'umidità nel corso della giornata, che, analogamente alla (4.7) può scriversi:

$$RH[t] = \Delta RH \left(f_t - \frac{1}{2} \right) - RH_{med}. \quad (4.11)$$

Per individuare l'irradiazione solare giornaliera media mensile su una superficie orizzontale, come prescritto da UNI, occorre applicare la relazione:

$$\bar{H} = \bar{H}_{rif,1} + \frac{\bar{H}_{rif,2} - \bar{H}_{rif,1}}{\varphi_{lt,2} - \varphi_{lt,1}} (\varphi_{lt} - \varphi_{lt,1}), \quad (4.12)$$

dove φ_{lt} rappresenta la latitudine della località di calcolo, ed i pedici 1 e 2 si riferiscono alle proprietà relative ai due capoluoghi scelti secondo il seguente criterio:

- il pedice 1 indica il capoluogo più vicino al luogo di calcolo;
- il pedice 2 individua il capoluogo *antipolare* più vicino al luogo di calcolo, e cioè posto nel semipiano individuato dalla latitudine φ_{lt} e che non contiene la prima località¹².

La (4.12) viene impiegata per calcolare sia i valori di irradiazione su superficie orizzontale diretta $\bar{H}_{b,ho}$ che e diffusa $\bar{H}_{d,ho}$. Stabilito il giorno del mese rappresentativo delle condizioni medie¹³, possono determinarsi le variabili riportate nella Tabella 4-7¹⁴. Qui *dec* indica la declinazione, *E.T.* l'equazione del tempo e \bar{I}_{ext} l'irradianza extra atmosferica che, combinati con longitudine γ_{lor} , latitudine φ_{la} ed altitudine z del luogo, nonché indicato meridiano di riferimento $\gamma_{lo,ref}$ del fuso orario, consentono di calcolare l'irradianza massima, e cioè in assenza di copertura nuvolosa.

<i>mese</i>	<i>giorno</i>	<i>n.g.</i>	<i>dec.</i>	<i>E.T.</i>	\bar{I}_{ext}
	<i>day</i>		<i>rad</i>	<i>min</i>	$W m^{-2}$
Gennaio	17	17	-0.36507	-11.1	1410
Febbraio	16	47	-0.22610	-13.4	1398
Marzo	16	75	-0.04220	-6.9	1379
Aprile	15	105	0.16432	1.8	1356
Maggio	15	135	0.32798	4.0	1336
Giugno	11	162	0.40293	-0.6	1325
Luglio	17	198	0.36973	-7.0	1323
Agosto	16	228	0.23483	-4.0	1335
Settembre	15	258	0.03869	6.5	1355
Ottobre	15	288	-0.16754	15.3	1378
Novembre	14	318	-0.33008	14.0	1398
Dicembre	10	344	-0.40229	4.5	1409

Tabella 4-7 Declinazione, equazione del tempo e irraggiamento extraterrestre per i dodici mesi dell'anno

¹² In altre parole, se la località 1 si trova più a nord del luogo di calcolo, allora la località 2 deve essere scelta come quella più prossima tra tutti i capoluoghi posti a sud, e viceversa.

¹³ Cfr. Appendice A, UNI 8477-1:1983, *Energia solare. Calcolo degli apporti per applicazioni in edilizia. Valutazione dell'energia raggiante ricevuta* (Norma ritirata senza sostituzione).

¹⁴ I valori sono stati calcolati impiegando le seguenti relazioni:

$$dec = 0.4093 \sin \left[\frac{2\pi(284 + n.g.)}{365} \right], \quad E.T. = -10.1 \sin \left[\frac{2\pi(2n.g. + 31)}{365.25} \right] - 6.9 \sin \left[2\pi \frac{n.g.}{365.25} \right],$$

$$\bar{I}_{ext} = 1367 \left(1 + 0.033 \cos \left[2\pi \frac{n.g.}{365.25} \right] \right).$$

Si determina lo scarto temporale Δt da applicare al tempo solare t_{sun} - allo scopo di riferire la variabile al tempo convenzionale t_{cnv} - per determinare l'angolo orario $\beta[t_{cnv}]$ con le relazioni:

$$\Delta t = \frac{E.T.}{60} - \frac{12}{\pi} (\gamma_{lo,ref} \gamma_{lo}) - f_{cnv}, \quad \beta[t_{cnv}] = \pi \left(\frac{t_{sun} + \Delta t}{12} - 1 \right). \quad (4.13)$$

La costante f_{cnv} è una correzione che si rende necessaria quando nei mesi estivi è in vigore l'ora legale; considerando che a marzo entra in vigore nell'ultima settimana e ad ottobre decade dalla terza settimana, si propone di adottare i seguenti valori: da novembre a febbraio, $f_{cnv} = 0$; marzo, $f_{cnv} = -0.25$; da aprile a settembre, $f_{cnv} = -1.0$; ottobre, $f_{cnv} = -0.5$. È ora possibile calcolare altezza ed azimut solari; la prima è stimabile con la relazione:

$$\varphi_{sun} = \arcsin[\sin[dec]\sin[\varphi_{la}] + \cos[dec]\cos[\varphi_{la}]\cos[\beta[t_{cnv}]]]; \quad (4.14)$$

dato che l'azimut solare, misurato da sud verso ovest, varia entro l'intervallo di estremi $\pm\pi$, per stabilirne il valore è necessario calcolare il segno della derivata prima dell'argomento della funzione arcoseno, e cioè:

$$\begin{aligned} \sin[\gamma_{sun}] &= \frac{\cos[dec]\cos[\beta[t_{cnv}]]}{\cos[\varphi_{sun}]} \\ \partial_{\beta[t_{cnv}]}[\sin[\gamma_{sun}]] &= \\ &= \cos[dec] \left(-\frac{1}{2} \cos[\beta[t_{cnv}]] (-1 + \cos[2dec]\cos[2\varphi_{la}]) - \right. \\ &\quad \left. - \frac{1}{8} (3 + \cos[2\beta[t_{cnv}]] \times \sin[2dec]\sin[2\varphi_{la}]) \right) / \\ &\quad \sqrt{(1 - (\cos[\beta[t_{cnv}]]\cos[dec]\cos[\varphi_{la}] + \sin[dec]\sin[\varphi_{la}])^2)^3} \end{aligned} \quad (4.15)$$

Dal segno della (4.15) è possibile stabilire il valore dell'azimut solare:

$$\begin{aligned} \partial_{\beta[t_{cnv}]}[\sin \gamma_{sun}] \geq 0, \quad \gamma_{sun} &= \arcsin \left[\frac{\cos[dec]\cos[\beta[t_{cnv}]]}{\cos[\varphi_{sun}]} \right] \\ \partial_{\beta[t_{cnv}]}[\sin \gamma_{sun}] < 0, \quad &\begin{cases} t_{cnv} < 12, \gamma_{sun} = -\pi - \arcsin \left[\frac{\cos[dec]\cos[\beta[t_{cnv}]]}{\cos[\varphi_{sun}]} \right] \\ t_{cnv} > 12, \gamma_{sun} = \pi - \arcsin \left[\frac{\cos[dec]\cos[\beta[t_{cnv}]]}{\cos[\varphi_{sun}]} \right] \end{cases} \end{aligned} \quad (4.16)$$

Ora, determinata la pressione atmosferica $p[z]$ all'altitudine di calcolo, sono noti tutti i dati necessari per valutare l'irradianza in assenza di copertura nuvolosa; determinata la massa d'aria attraversata dai raggi solari ed il relativo coefficiente di trasmissione, rispettivamente pari a:

$$\begin{aligned} p[z] &= 101325 \frac{1.18181 \times 10^{-13}}{(288.15 - 0.0065z)^{-5.25588}} \\ m_a &= \left(\sqrt{1229 + (614 \sin[\varphi_{sun}])^2} - 614 \sin[\varphi_{sun}] \right) \frac{p[z]}{101325} \\ f_I &= \frac{1}{2} (e^{-0.65m_a} + e^{-0.095m_a}) \end{aligned} \quad (4.17)$$

si ottiene il dato cercato con il prodotto:

$$\bar{I}_{ho,max}[t_{cnv}] = \max\{0; \bar{I}_{ext} \sin[\varphi_{sun}] f_I\}. \quad (4.18)$$

Noto il valore orario, considerandolo costante per il brevissimo periodo, si calcola l'irradiazione massima con la relazione:

$$\overline{H}_{b,h_o,\max} = 3600 \sum_{j=0}^{23} \overline{I}_{\max} [j]; \quad (4.19)$$

il rapporto tra la (4.12) e la (4.19) restituisce due fattori $f_{\overline{H}_b}$ e $f_{\overline{H}_d}$ che, moltiplicati per la (4.18), consentono di calcolare l'irradianza media oraria diretta e diffusa per i dodici mesi dell'anno.

Il calcolo della piovosità si divide nella determinazione della percentuale dei giorni di assenza di pioggia (RN_0) e nella quantità media di precipitazioni (RN_{med}) che cade durante i giorni in cui le precipitazioni non sono nulle (convenzionalmente, quando $RN_{med} \geq 1$ mm). Individuate le località più vicine dall'elenco di quelle disponibili nell'Atlante Meteorologico d'Italia, indicando con i pedici 1 e 2 le sia le distanze che il loro rispettivo valore di RN , entrambi i parametri possono essere valutati tramite la relazione:

$$RN_j = \frac{d_2 RN_{j,1} + d_1 RN_{j,2}}{d_1 + d_2}, \quad j \in \{0, med\} \quad (4.20)$$

dove i valori di riferimento delle singole stazioni meteorologiche sono ricavati nel seguente modo:

- la piovosità RN_{med} è pari al rapporto tra la piovosità media mensile (indicata nell'Atlante con il simbolo RTot) ed il numero di giorni con precipitazioni ($NgR>1$);
- la percentuale di giorni di assenza di pioggia RN_0 è data dal rapporto ($gg \text{ mese} - NgR>1$)/ $gg \text{ mese}$, dove $gg \text{ mese}$ indica il numero dei giorni del mese di calcolo (per febbraio si adotta il numero convenzionale di 28,25).

	0-9	10-19	20-29	30-39	40-49	50-59	60-69	70-79	80-89	90-99
0	∞	-0.91	-0.60	-0.37	-0.18	0.00	0.18	0.37	0.60	0.91
1	-1.64	-0.87	-0.57	-0.35	-0.16	0.02	0.20	0.39	0.62	0.95
2	-1.45	-0.83	-0.55	-0.33	-0.14	0.04	0.22	0.41	0.65	0.99
3	-1.33	-0.80	-0.52	-0.31	-0.12	0.05	0.23	0.43	0.67	1.04
4	-1.24	-0.76	-0.50	-0.29	-0.11	0.07	0.25	0.45	0.70	1.10
5	-1.16	-0.73	-0.48	-0.27	-0.09	0.09	0.27	0.48	0.73	1.16
6	-1.10	-0.70	-0.45	-0.25	-0.07	0.11	0.29	0.50	0.76	1.24
7	-1.04	-0.67	-0.43	-0.23	-0.05	0.12	0.31	0.52	0.80	1.33
8	-0.99	-0.65	-0.41	-0.22	-0.04	0.14	0.33	0.55	0.83	1.45
9	-0.95	-0.62	-0.39	-0.20	-0.02	0.16	0.35	0.57	0.87	1.64

Tabella 4-8 Valore f_{PDv}

Per calcolare la velocità media mensile del vento, si individua sull'Atlante Meteorologico d'Italia la stazione meteorologica più prossima al luogo di calcolo appartenente alla stessa regione di vento (Figura 4-5), così come stabilito dalla norma UNI; per tale stazione, si procede a determinare le incidenze percentuale dei quattro gruppi di velocità¹⁵; indicati i primi tre con i generici termini a , b e c , i valori della funzione di ripartizione sono pari a $P_D[v_1] = a$, $P_D[v_{10}] = P_D[v_1] + b$, $P_D[v_{20}] = P_D[v_{10}] + c$, $P_D[v_{\infty}] = 100\%$, e, per i primi tre, si individua il corrispondente valore f_{PDv} desumibile dalla Tabella 4-8¹⁶.

¹⁵ Nell'Atlante, sono riportati, per ogni direzione di vento e per ogni ora di rilevamento, quattro gruppi di velocità, indicati con: *Calma*, 1-10, 11-20 e >20; per ogni mese, la media per ognuno dei gruppi, calcolata sulle diverse direzioni di vento e di ora di osservazione, rappresenta il valore cercato.

¹⁶ La tabella riporta i valori corrispondenti alla funzione $Erf^1[2(x/100-1/2)]$. Sapendo infatti che la funzione di ripartizione di una distribuzione normale è del

Le tre deviazioni standard corrispondenti ai tre gruppi di velocità sono quindi pari a:

$$SD_1 = \frac{1}{3 + \sqrt{2}f_{PDv1}}, SD_{10} = \frac{10}{3 + \sqrt{2}f_{PDv10}}, SD_{20} = \frac{20}{3 + \sqrt{2}f_{PDv20}}; \quad (4.21)$$

il triplo del valore della deviazione media, espressa in metri al secondo, restituisce invece il valore di velocità media cercato, che è dato quindi dalla relazione¹⁷:

$$v_{med} = 1.543 \times med\{SD_1, SD_{10}, SD_{20}\}. \quad (4.22)$$

La velocità del vento viene stabilita con:

$$v = f_{v1} f_{v2} v_{rif}, \quad (4.23)$$

dove v_{rif} è la media ottenuta dalla (4.22), f_{v1} un fattore di correzione, deducibile individuando la zona di vento di entrambe le località grazie alla Tabella 4-9, e stabilendone il valore in base alla Tabella 4-10, e f_{v2} può essere determinato con Tabella 4-11, in funzione delle altezze medie (Tabella 2-3).

Individuate le due stazioni meteo appartenenti alla medesima regione di vento e più vicine alla località di calcolo, è possibile stimare la direzione prevalente del vento nel seguente modo:

- per ognuna delle due stazioni, si calcola la percentuale media mensile per ognuna delle otto direzioni (N, NE, E, SE, S, SW, W e NW) indifferentemente dai gruppi di velocità (tra uno e dieci nodi, tra undici e venti nodi, superiore a venti nodi) e dall'ora di rilevamento (0.00, 6.00, 12.00 e 18.00)¹⁸;
- per ognuna delle otto direzioni, si calcola la media ponderata sulla direzione, in modo del tutto analogo con quanto indicato per la piovosità con la relazione (4.20);

la direzione prevalente del vento, corrispondente alla moda, è quella che risulta avere la percentuale più alta.

Note le variabili climatiche, riportate nella Tabella 2-6, il profilo meteorologico della località di riferimento suddiviso in un periodo di tre decenni è riportato nella Tabella 4-12.

Regioni di vento	Costa ≤20km	Subcostiera ≤40km	Entrotterra* >20km						
			Altitudine						
			300	500	800	1200	1500	2000	> 2000
A	3	2	1	1	2	2	3	3	4
B	2		1	2	2	3	3	4	4
C	3		2	2	3	3	3	4	4
D	3		3	3	3	4	4	4	4
E	4		3	3	3	4	4	4	4

* Ad eccezione della regione A, dove l'entrotterra è >40km

Tabella 4-9 Definizione delle zone di vento

tipo $F_D = 1/2(1 + Erf[(x - x_{med}) / \sqrt{2}SD_x])$, imponendo che $x_{med} = 3 SD_x$, esplicitando SD_x in funzione di f si ottiene $SD_x = f / (3 + \sqrt{2}Erf^{-1}[2(x/100 - 1/2)])$.

¹⁷ Dato che i gruppi di velocità sono espressi in nodi, ottenuta la deviazione standard media bisogna trasformarla in metri al secondo (moltiplicando per 0.51444) e poi moltiplicarla per tre.

¹⁸ Si esclude il gruppo di velocità inferiore a un nodo in quanto questo viene considerato come calma di vento, e non viene indicata la direzione; eliminando quindi questo valore, le medie devono essere calcolate di conseguenza in modo che la somma delle otto percentuali restituisca il 100%.



Figura 4-5 Regioni di vento

Zona di vento della loc. di rif.	Zona di vento della località di calcolo			
	1	2	3	4
1	1	1.780	2.780	4.000
2	0.562	1	1.560	2.250
3	0.360	0.640	1	1.440
4	0.250	0.445	0.694	1

Tabella 4-10 Determinazione del coefficiente di correzione f_{v1}

Località di calcolo	Località di riferimento			
	a, b	c	d	e
a, b	1.00	1.17	1.63	2.61
c	0.85	1.00	1.40	2.23
d	0.61	0.72	1.00	1.60
e	0.38	0.45	0.63	1.00

Tabella 4-11 Determinazione del coefficiente di correzione f_{v2}

Variabile	Valore		
temperatura	$\theta_{med} - 0.97 SD_{\theta}$	θ_{med}	$\theta_{med} + 0.97 SD_{\theta}$
	$\Delta\theta - 0.485 SD_{\theta}$	$\Delta\theta$	$\Delta\theta + 0.485 SD_{\theta}$
irradiazione	$0.9 \bar{H}_{med}$	\bar{H}_{med}	$1.1 \bar{H}_{med}$
umidità	$RH_{med} - 5$	RH_{med}	$RH_{med} + 5$
relativa	$\max\{\Delta RH_{med} - 5, 2 RH_{med} - 80\}$	ΔRH_{med}	$\min\{\Delta RH_{med} + 5, 190 - 2 RH_{med}\}$
precipitazioni	$1.33 RN_{med}$	RN_{med}	$0.67 RN_{med}$
	RN_0	RN_0	RN_0
ventilazione	\vec{v}_{mod}	\vec{v}_{mod}	\vec{v}_{mod}
	$1.1 v_{med}$	v_{med}	$0.9 v_{med}$

Tabella 4-12 Calcolo delle variabili in funzione del profilo meteorologico

4.1.1.3 Dati acustici

Il livello medio del rumore di fondo per una data zona - a scala urbana - può essere determinato conoscendone la fascia di antropizzazione (Tabella 2-3) e la sua classe acustica, in base alle quali si ricavano i livelli limiti diurno e notturno (Tabella 2-8). In particolare, detto L_{lim} il livello di pressione sonora massimo, si propone di valutare la variazione temporale del rumore di fondo sommando algebricamente un valore ΔL funzione dell'ora (Tabella 4-13):

$$L_{gdn} = L_{lim} + \Delta L. \quad (4.24)$$

Dipendendo dall'attività umana, la tabella è stata redatta distinguendo i valori differenziali non soltanto per fascia oraria ma anche differenziando i giorni feriali da quelli festivi¹⁹.

¹⁹ Cfr. § 2.2.2.

ora	fer.	fest.	ora	fer.	fest.	ora	fer.	fest.	ora	fer.	fest.
0.00	-10	-3	6.00	-7	-13	12.00	+3	+3	18.00	+5	0
1.00	-13	-3	7.00	0	-10	13.00	+5	+3	19.00	+3	+3
2.00	-13	-3	8.00	+5	-7	14.00	0	0	20.00	+3	+5
3.00	-13	-7	9.00	+3	-7	15.00	-3	-3	21.00	0	+3
4.00	-13	-10	10.00	0	0	16.00	0	-3	22.00	-3	0
5.00	-10	-13	11.00	0	0	17.00	+3	-3	23.00	-7	-3

Tabella 4-13 Valore ΔL per la determinazione del rumore di fondo

La pressione sonora massima generata dal passaggio di un aereo in prossimità del luogo di calcolo si determina in funzione della posizione dell'aeroporto e dell'inclinazione della pista (Figura 4-6). Note le coordinate geografiche del punto P è possibile ricavarne la distanza d_{OP} grazie alla (4.1) e l'inclinazione rispetto alla direzione $y \equiv N$ utilizzando la (4.2). Nel riferimento locale $Oxyz$, dove O è il luogo di calcolo, detta α l'inclinazione della pista di atterraggio rispetto alla direzione Est - con convenzione levogira - le relazioni:

$$x_P = d_{OP} \sin \beta, \quad y_P = d_{OP} \cos \beta, \quad d_{PK} = \frac{y_P}{\cos 4^\circ} \sqrt{1 - \frac{1}{\tan^2 \alpha}}$$

$$d_{OK} = \sqrt{\left(x_P - \frac{y_P}{\tan \alpha}\right)^2 + \left(1 + \frac{1}{\tan^2 \alpha}\right) y_P^2 \tan^2 4^\circ}, \quad (4.25)$$

$$d_{PH} = \frac{d_{OP}^2 + d_{PK}^2 - d_{OK}^2}{2d_{PK}}, \quad d_{\min} = d_{OH} = \sqrt{d_{OP}^2 - d_{PH}^2}, \quad d_{HH^*} = d_{PH} \tan 4^\circ$$

consentono di calcolare la distanza minima e la relativa altezza dal suolo, grazie alle quali si possono valutare le attenuazioni²⁰ ed il rumore:

$$AT_{div,sp} = 20 \log \frac{d_{OH}}{10}, \quad AT_{gnd} = 4.8 - \frac{d_{HH^*}}{d_{OH}} \left(17 + \frac{300}{d_{OH}}\right) \geq 0,$$

$$AT_{dc} = 10 \log \left[1 + \frac{(d_{OH^*}^2 + (d_{HH^*} - z)^2)}{(d_{OH^*}^2 + (d_{HH^*} + z)^2)}\right], \quad (4.26)$$

$$d_{OH^*} = \sqrt{d_{OH}^2 - d_{HH^*}^2}, \quad L_{jet,max} = 123 - (AT_{div} + AT_{gnd} + AT_{dc}),$$

dove z è l'altezza del luogo di ascolto²¹ e il rumore di un aeroplano in volo, udito ad una distanza di 10 m, è pari a 123 dB, come rilevabile in letteratura²².

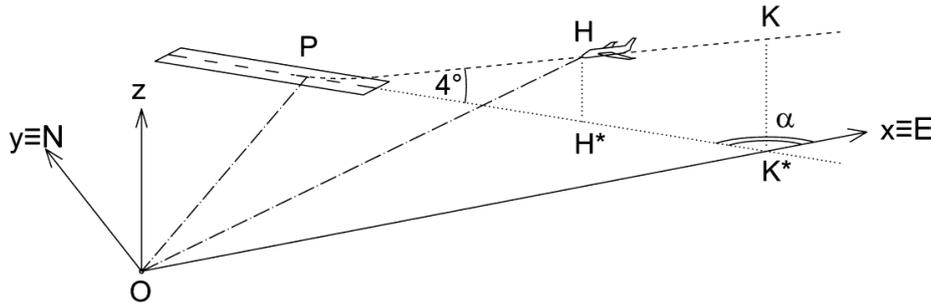


Figura 4-6 Determinazione della posizione di un aereo in fase di decollo o atterraggio rispetto al punto di calcolo

Posto come limite di udibilità il rumore di fondo orario determinato con la (4.24), è possibile calcolare la distanza massima oltre la quale l'attenuazione

²⁰ Cfr. UNI ISO 9613-2, op. cit..

²¹ Per altezza si intende l'elevazione del punto di ascolto al di sopra del piano di campagna; quest'ultimo rappresenta il punto su cui viene calcolata l'altitudine di riferimento.

²² Cfr. § 2.2.2 nota 63.

per divergenza geometrica è sufficientemente elevata per rendere il suono impercettibile²³ e, conoscendo la velocità dell'aereo, il tempo necessario che questo impiega per portarsi da tale distanza limite alla minima d_{OH} ²⁴. Sostituendo nelle relazioni matematiche i valori relativi al caso in esame, è possibile calcolare il rumore equivalente come²⁵:

$$d_{\max} = 10^{7.15 - \frac{AT_{gnd} + AT_{dc} + L_{gnd}}{20}}, \quad t_{\max} = \frac{\sqrt{d_{\max}^2 - d_{OH}^2}}{80}, \quad (4.27)$$

$$L_{jet,eq} = 10 \log \left[\frac{10^{14.3}}{80 d_{OH} t_{\max}} \arctan \left[\frac{80 t_{\max}}{d_{OH}} \right] \right].$$

Per determinare il livello di pressione sonora al passaggio di n aerei in un'ora²⁶ è sufficiente sommare gli n livelli equivalenti al livello di sottofondo, e cioè:

$$L_{(gnd+jet),eq} = 10 \log \left[\frac{nt_{\max} 10^{0.1L_{jet,eq}} + (3600 - nt_{\max}) 10^{0.1L_{gnd}}}{3600} \right], \quad (4.28)$$

che corrisponde ad eseguire l'integrazione delle pressioni sostituendo ai picchi riportati nella Figura 4-7 i relativi livelli equivalenti (tratti orizzontali) ottenendo il valore finale rappresentato dalla linea tratteggiata.

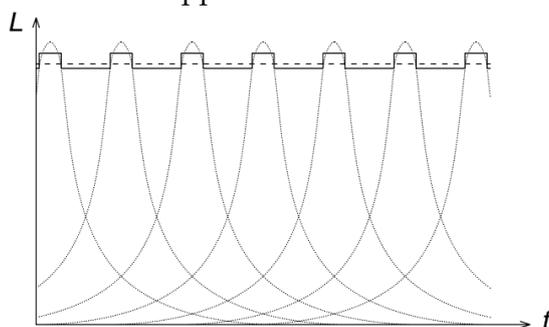


Figura 4-7 Livello di pressione sonora del rumore aereo in relazione al livello di pressione sonora di fondo

Il rumore di un treno in transito è paragonabile a quello di una fonte in movimento che genera un rumore da rotolamento, e cioè originato dal movimento delle ruote sulle rotaie, ed un eventuale rumore aerodinamico, dovuto all'attrito tra l'aria ed il pantografo e le parti sporgenti - che si avverte quando si superano i 240 km/h. La prima aliquota è valutabile come²⁷:

²³ Tale distanza è pari a $d_{\max} = 10^{1 + \frac{L_{ref} - L_{\min}}{20}}$, dove L_{ref} rappresenta il livello di pressione sonora a 10 metri, e L_{\min} il livello limite di soglia di udibilità.

²⁴ Il valore cercato è uguale a $\sqrt{d_{\max}^2 - d_{\min}^2} / v$, dove v rappresenta la velocità dell'aeroplano.

²⁵ Per definizione (Cfr. UNI EN ISO 9432:2008, *Acustica. Determinazione del livello di esposizione personale al rumore nell'ambiente di lavoro*) il livello equivalente è

pari a: $L_{eq} = 10 \log \left[\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} \frac{p^2[t]}{p_{ref}^2} dt \right]$; nel caso di una sorgente in moto rettilineo ad

una velocità costante v , per $t_1 = t_2 = t$ la precedente espressione si riduce a:

$$10 \log \left[\frac{10^{2+0.1L_{ref}} \arctan[tv/d_{\min}]}{tv d_{\min}} \right].$$

²⁶ Cfr. § 2.2.2 nota 67.

²⁷ Cfr. Appendice 2 - Modello del CSTB, Commissione Inteaziendale ANAS,

$$L_{tra,max} = 45 - 13 \log d_{min} - 5 \log \left[\left(\frac{2d_{min}}{l_{tra}} \right)^2 + 1 \right] - 10 \log \frac{d_{min}}{20} + \quad (4.29)$$

$$+ 30 \log [3.6v] + 10 \log f_1 / f_2$$

dove d_{min} rappresenta la minima distanza tra l'asse ferroviario e l'ascoltatore, l_{tra} la lunghezza del convoglio, v la velocità dello stesso espressa in metri al secondo, e f_1 e f_2 due coefficienti dipendenti dalla qualità del materiale rotabile. La (4.29) tiene già conto della distanza di ascolto, per cui non occorre decrementarla con il valore di attenuazione dovuto alla divergenza geometrica, e rappresenta quindi il livello di rumore percepibile in campo libero. La seconda aliquota, per velocità maggiori di 240 km/h, è pari a²⁸:

$$L_{aer,max} = 55 \log [3.6v] + 10 \log Z_{tra} + 10 \log d_{min} + \quad (4.30)$$

$$+ 10 \log [\arctan [2d_{min}^{-1}]] + 0.5 \sin [2 \arctan [2d_{min}^{-1}]] - 37$$

dove Z_{tra} è l'altezza media dei vagoni. A causa dell'indisponibilità dei diversi dati necessari ad effettuare il calcolo, si propone di ricavarli per via indiretta individuando la tipologia di linea ferroviaria²⁹ ed utilizzando i valori riportati nella Tabella 4-14³⁰.

Tipo di linea	Lunghezza	Altezza	Velocità	Rotaia	Carrozza	Flusso
	l_{tra}	Z_{tra}	v	f_1	f_2	n
Alta velocità	364	4.0	83	1.0	6.0	2
Nazionale	260	4.0	66	1.5	1.0	4
Locale	156	4.0	40	3.0	0.5	1
Metropolitana	156	3.5	25	1.5	3.0	12

Tabella 4-14 Valori proposti per la determinazione del rumore ferroviario

Le attenuazioni qui considerate sono dovute alla presenza di edifici e costruzioni che ostacolano la diffusione del rumore, ed in particolare un'aliquota AT_{hou} dovuta all'eventuale presenza di costruzioni direttamente prospicienti la linea ferroviaria, ed una seconda quantità AT_{site} che dipende dalla densità di edificazione della zona³¹:

$$AT_{hou} = -10 \log [1 - l_{hou} / l_{tot}]$$

$$AT_{site} = 0.1 \left(\frac{A_{hou}}{A_{tot}} \right)_{med} d_{tot} \quad ; \quad (4.31)$$

$(A_{hou} / A_{tot})_{med}$ rappresenta la media tra i rapporti di copertura che si riscontrano nel luogo di calcolo e intorno alla linea ferroviaria: questi possono essere sinteticamente ottenuti in funzione delle rispettive fasce di antropizzazione, alle quali si propone di associare i valori riportati nella Tabella 4-15. La distanza d_{tot} è invece la lunghezza percorsa dal suono che passa attraverso gli edifici, misurata lungo una traiettoria circolare che unisce la sorgente ed il ricevente, avente un arco di 5 km (Figura 4-8).

Ente Ferrovie dello Stato, Società Autostrade, AISCAT, Ministero dell'ambiente, Istruzioni per l'inserimento ambientale delle infrastrutture stradali e ferroviarie con riferimento al controllo dell'inquinamento acustico, op. cit.

²⁸ Ibidem.

²⁹ Cfr. § 2.2.2.

³⁰ I valori proposti sono stati calcolati in funzione di alcuni parametri reperibili in letteratura; purtroppo non sono disponibili dati sul flusso giornaliero, che sono stati qui soltanto ipotizzati.

³¹ Cfr. UNI ISO 9613-2, op. cit..

Fascia	Rapporto di copertura	Altezza media
I-a	0.10	6.0 m
II-b	0.30	7.0 m
III-c	0.50	9.0 m
IV-c	0.50	9.0 m
IV-d	0.65	15.0 m
V-e	0.80	18.0 m

Tabella 4-15 Fasce di antropizzazione, rapporti di copertura ed altezze medie degli edifici

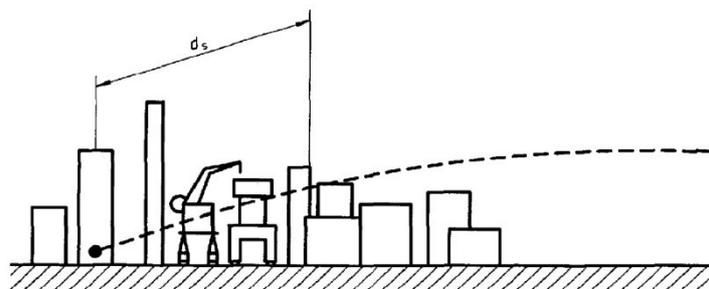


Figura 4-8 Percorso del suono attraverso un sito costruito

Per semplicità, si propone di calcolare tale distanza sostituendo al percorso circolare la sua tangente e, conoscendo il rapporto di copertura della zona e l'altezza media degli edifici (Tabella 4-15), nota la distanza minima tra la linea ferroviaria e il luogo di calcolo, si ottiene la relazione:

$$\begin{aligned}
 & \text{se } Z_j < h_{hou} \quad d_j = 0; \\
 & \text{se } Z_j \geq h_{hou} \quad \min \left\{ d_j = \frac{h_{hou} - Z_j}{d_{\min}} \sqrt{\frac{A_{hou}}{A_{tot}} (10000^2 - d_{\min}^2)}; \frac{d_{\min}}{2} \right\}; \\
 & d_{tot} = \sum_{j=1}^2 d_j.
 \end{aligned} \tag{4.32}$$

Il rumore massimo totale è dato quindi dalla relazione generale:

$$L_{tot} = 10 \log \left[\sum_j 10^{0.1L_j} \right] - \sum_k AT_k. \tag{4.33}$$

dove, in questo caso, il pedice j indica i livelli di pressione calcolati con le (4.29) e (4.30), mentre il pedice k si riferisce alle attenuazioni (4.31). Se n è il numero di treni che passano in un'ora (Tabella 4-14) e k è il numero di binari, il livello equivalente orario è pari a³²:

$$\begin{aligned}
 L_{tra,eq} &= 15 - 13 \log d_{\min} + 10 \log \left[12.96 \frac{f_1}{f_2} l_{tra} n k v^2 \right] \\
 L_{aer,eq} &= \begin{cases} 0, & \text{se } v < 66.7 \text{ ms}^{-1} \\ 10 \log n k l_{tra} Z_{tra} v^{4.5} - 10 \log d_{\min} - 65, & \text{se } v \geq 66.7 \text{ ms}^{-1} \end{cases}.
 \end{aligned} \tag{4.34}$$

Il rumore totale si ottiene applicando la (4.33) facendo variare j rispetto ai livelli ottenuti dalla precedente relazione.

Il rumore in campo libero provocato da strade a scorrimento veloce dei tipi A, B e C può essere determinato per i veicoli leggeri e pesanti come:

³² Cfr. Appendice 2 - Modello del CSTB, Commissione Inteaziendale ANAS, Ente Ferrovie dello Stato, Società Autostrade, AISCAT, Ministero dell'ambiente, Istruzioni per l'inserimento ambientale delle infrastrutture stradali e ferroviarie con riferimento al controllo dell'inquinamento acustico, op. cit.

$$L_{hgw(l),eq} = 22.5 + 10 \log \frac{2.08n_l \pi}{v_l} + 26 \log 3.6v_l$$

$$L_{hgw(h),eq} = 69.6 + 10 \log \frac{2.08n_h \pi}{v_h} + 8.1 \log 3.6v_h$$
(4.35)

dove n rappresenta il numero orario di veicoli e v la velocità, valutato sul ciglio della carreggiata stradale, che qui è stata ipotizzata a 7.5 metri dall'asse viario³³. Il valore di n è, naturalmente, variabile in funzione del tempo e della tipologia di giorno; nella relazione proposta:

$$n = \begin{cases} 1.2 \times TGM \times f_n[t] / 10^4, & \text{feriale} \\ 0.5 \times TGM \times f_n[t] / 10^4, & \text{festivo} \end{cases}$$
(4.36)

si impiega un coefficiente $f_n[t]$ i cui valori, che qui si ipotizza di utilizzare, possono essere ricavati dalla Tabella 4-16.

ora	$f_n[t]$	ora	$f_n[t]$	ora	$f_n[t]$	ora	$f_n[t]$
0.00	150	6.00	188	12.00	619	18.00	619
1.00	125	7.00	619	13.00	675	19.00	619
2.00	100	8.00	675	14.00	619	20.00	563
3.00	75	9.00	563	15.00	563	21.00	450
4.00	75	10.00	506	16.00	506	22.00	338
5.00	100	11.00	506	17.00	563	23.00	188

Tabella 4-16 Coefficiente di variazione oraria del traffico a scorrimento veloce

In assenza di dati ufficiali³⁴ è possibile valutare il TGM e le velocità dei veicoli impiegando la Tabella 4-17, dove i valori del traffico giornaliero medio sono stati ricavati dai dati statistici disponibili sul portale nazionale delle Infrastrutture³⁵.

Tipo	Veicoli leggeri		Veicoli pesanti	
	v_l [m s ⁻¹]	TGM _l	V_h [m s ⁻¹]	TGM _h
Autostrada	30.6	70.000	22.2	14.000
Scorrimento veloce	25.0	25.000	19.4	2.500
Extraurbane	19.4	10.000	16.7	500

Tabella 4-17 Valori proposti di velocità e traffico giornaliero medio per le strade di tipo A, B e C

Al valore ricavato grazie alla (4.35) occorre poi aggiungere gli incrementi determinati in funzione della tipologia di manto stradale e della pendenza³⁶, ed i decrementi dovuti alla riduzione dell'angolo di vista³⁷, alla divergenza geometrica ed alla presenza di edifici³⁸. Per uniformità di notazione, gli aumenti saranno qui indicati con il simbolo AT relativo alle attenuazioni avendo però cura di invertirne il segno; la Tabella 4-18 riporta quindi i rispettivi valori da applicare nei calcoli. Quando il percorso stradale si allontana dalla distanza media, o è presente un ostacolo che interrompe in modo definitivo la trasmissione del rumore, come la presenza di un rilievo montuoso o di una galleria, allora occorre calcolare l'attenuazione per riduzione dell'angolo di vista AT_{va} (Figura 4-9).

³³ Ivi, Modello M.I.R.A..

³⁴ Il TGM può essere riportato sul sito www.trail.unione Camere.it.

³⁵ Cfr. § 2.2.2.

³⁶ Cfr. Appendice 2 - Modello C.E.E., Commissione Inteaziendale ANAS, Ente Ferrovie dello Stato, Società Autostrade, AISCAT, Ministero dell'ambiente, Istruzioni per l'inserimento ambientale delle infrastrutture stradali e ferroviarie con riferimento al controllo dell'inquinamento acustico, op. cit.

³⁷ Ibidem.

³⁸ Cfr. UNI ISO 9613-2, op. cit..

Manto stradale		Pendenza	
tipo	AT_{rdw}	valore	AT_{mc}
Asfalto liscio	0 dB	< 2%	0 dB
Asfalto rugoso	-4 dB	2 – 3%	-1 dB
Acciottolato	-7 dB	3 – 6%	-2 dB
		6 – 15%	-3 dB
		> 15%	-4 dB

Tabella 4-18 Incrementi dovuti alla qualità del manto stradale ed alla pendenza

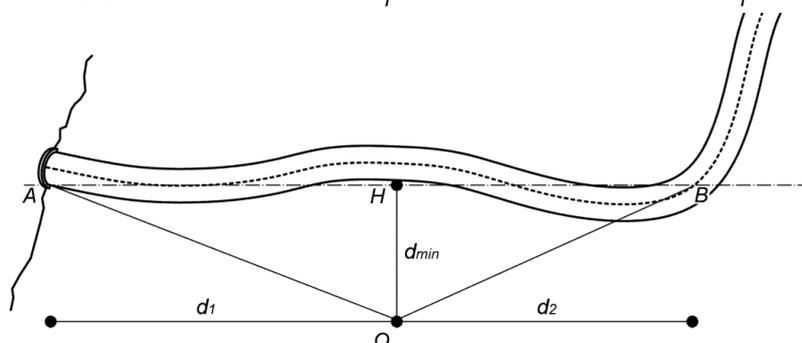


Figura 4-9 Distanze per il calcolo dell'attenuazione dovuta alla riduzione dell'angolo di vista. Dette d_1 e d_2 le distanze a sinistra e a destra del punto di ascolto oltre le quali il rumore stradale non è più udibile, e calcolati gli angoli di $A\hat{O}H$ e $B\hat{O}H$, l'attenuazione cercata è pari a:

$$AT_{va} = 10 \log \frac{\arctan[d_1/d_{\min}] + \arctan[d_2/d_{\min}]}{\pi} \quad (4.37)$$

Le attenuazioni dovute al passaggio del suono attraverso gli edifici possono essere calcolate utilizzando le (4.31); la divergenza geometrica, considerando che la fonte di rumore è di tipo lineare e che la distanza di riferimento delle (4.35) è di 7.5 metri, può essere calcolata con la relazione:

$$AT_{div,gy} = 10 \log \frac{d_{\min}}{10} \quad (4.38)$$

Ancora una volta, il livello di pressione totale può essere calcolato utilizzando la relazione (4.33), facendo variare i pedici in funzione dei livelli di attenuazione sopra descritti.

Per il flusso veicolare urbano sulle strade di collegamento principale, si considera un livello di rumore equivalente pari a³⁹:

$$L_{roa,eq} = 55.5 + 10.2 \log n_{tot} + 30 n_h / n_{tot} - 19.3 \log d_{\min} \quad (4.39)$$

In questo caso, gli unici due dati da recuperare sono il numero totale di veicoli orari n_{tot} e la percentuale di quelli pesanti espressa dal rapporto n_h/n_{tot} per determinare i quali si avanza l'ipotesi di utilizzare i dati medi riportati nella Tabella 2-9, e di moltiplicarli per dei coefficienti orari determinati in funzione delle sei classi acustiche, riportati nella Tabella 4-19. Ciò consente di ottenere per via indiretta il flusso orario per ogni corsia stradale: il numero di queste può invece determinarsi come il rapporto per difetto tra la larghezza della carreggiata diviso per 2.8 metri – che costituisce il minimo consentito per legge. Come per il traffico autostradale, occorre considerare le attenuazioni dovute al passaggio del rumore attraverso le costruzioni, calcolato con le (4.31), ed a causa della divergenza geometrica, valutato con

³⁹ Cfr. Appendice 2 – Metodo di Burgess, Commissione Inteaziendale ANAS, Ente Ferrovie dello Stato, Società Autostrade, AISCAT, Ministero dell'ambiente, Istruzioni per l'inserimento ambientale delle infrastrutture stradali e ferroviarie con riferimento al controllo dell'inquinamento acustico, op. cit.

la (4.38); gli incrementi indotti dalla pendenza sono gli stessi riportati nella Tabella 4-18, mentre per la sede stradale occorre aggiungere un incremento di 2.5 dB per gli acciottolati⁴⁰. Sempre per via sintetica, si avanza l'ipotesi di considerare un incremento dovuto all'arresto della marcia ed alla successiva ripartenza - valutabile nell'ordine di 3 dB⁴¹ - quando il coefficiente orario della precedente tabella risulta superiore all'unità. La (4.33) permette di calcolare il livello di rumore totale⁴² sommando al rumore in campo libero tutte le attenuazioni precedentemente descritte.

Cl.	Giorni feriali											
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
I-II	0.2	0.1	0.05	0.02	0.02	0.1	0.7	1.2	1.3	1.1	0.9	0.8
III-IV	0.2	0.1	0.1	0.05	0.05	0.3	0.7	1.2	1.3	1.2	1.0	1.0
V-VI	0.6	0.5	0.4	0.3	0.3	0.05	0.8	1.3	1.3	1.2	1.1	1.0
	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
I-II	0.9	1.3	1.2	1.0	0.8	0.7	0.9	1.3	1.1	0.8	0.4	0.2
III-IV	1.1	1.3	1.2	1.0	1.0	1.1	1.2	1.3	1.1	1.0	0.5	0.3
V-VI	1.1	1.3	1.3	1.1	1.0	1.1	1.3	1.3	1.1	1.0	0.8	0.6
	Giorni festivi											
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
I-II	0.2	0.1	0.05	0.02	0.02	0.02	0.02	0.05	0.4	0.6	0.6	0.8
III-IV	1.0	1.0	0.7	0.4	0.1	0.05	0.02	0.05	0.4	0.6	0.6	0.8
V-VI	0.3	0.25	0.2	0.15	0.15	0.03	0.4	0.65	0.65	0.6	0.55	0.5
	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
I-II	1.0	1.0	0.8	0.6	0.6	0.6	0.7	0.8	1.0	0.8	0.4	0.2
III-IV	1.0	1.0	0.8	0.6	0.6	0.6	0.7	0.8	1.0	1.0	1.2	1.1
V-VI	0.55	0.65	0.65	0.55	0.5	0.55	0.65	0.65	0.55	0.5	0.4	0.3

Tabella 4-19 Coefficienti orari per la determinazione del traffico urbano

La somma di tutte le aliquote, che può essere ottenuta ancora una volta con la (4.33) considerando nulle tutte le attenuazioni, restituisce il livello di pressione sonora nel luogo di calcolo a scala urbana.

Attività	Ore	Attività	Ore
Produttiva, commerciale, per l'amministrazione, giudiziaria (feriali)	9.00 13.00 18.00	Scolastica, universitaria e culturale (feriali)	8.00÷18.00
Fieristica	9.00÷18.00	Per lo spettacolo	20.00÷1.00
Sanitaria	24 h	Per la ristorazione	13.00÷15.00 20.00÷23.00

Tabella 4-20 Ore di punta per attività svolta

Strade secondarie ed altre attività umane non precedentemente prese in considerazione possono influenzare il clima acustico solo se molto prossime all'organismo edilizio nel quale si svolge la valutazione: per questo motivo si considereranno soltanto quelle sorgenti sonore contenute all'interno di ogni invaso su cui si affacciano i diversi fronti. Per le strade secondarie, sarà sufficiente considerare una sorgente di circa 60 dB nelle ore di punta, che possono considerarsi le 8.00, le 13.00 e le 19.00⁴³; per tutte le altre attività potrà considerarsi sempre un'intensità sonora di 60 dB, ma con una distribuzione oraria differente, come descritto nella Tabella 4-20.

⁴⁰ Ivi, Metodo C.E.E..

⁴¹ Ibidem.

⁴² In questo caso, il pedice j non varia - e la sommatoria degenera in un unico termine - in quanto la (4.39) restituisce già il rumore totale in campo libero dovuto tanto ai veicoli leggeri quanto a quelli pesanti.

⁴³ Le strade di tipo secondario sono spesso a servizio di unità abitative, per cui si considera che il flusso veicolare sia non particolarmente intenso e limitato alle fasce orarie di uscita e rientro dalle attività scolastiche e lavorative.

4.1.1.4 Dati demografici, sanitari e socio-economici

I dati necessari a tracciare il profilo socio-economico dei diversi fruitori sono disponibili a scala regionale direttamente dal sito dell'Istituto Nazionale di Statistica, e sono aggiornati ogni anno⁴⁴. In particolare occorre individuare, distinguendo le percentuali riferite agli uomini ed alle donne:

- la struttura demografica della popolazione, suddivisa per fasce d'età (tavola 9 - Struttura demografica);
- tasso di occupazione (tavola 13 - Occupazione e povertà);
- settore di occupazione, diviso in agricolo, industriale, terziario (tavola 13 - Occupazione e povertà);
- percentuali di persone sovrappeso e obese (tavola 4 - Stili di vita).

Questi tassi consentono, attraverso le suddivisioni riportate nella Tabella 2-10, di individuare il set di dati su cui eseguire le medie.

Per prima cosa occorre stabilire l'età media degli utenti: se il valutatore individua *Lavoratori* come gruppo di riferimento perché sta eseguendo, per esempio, una stima all'interno di locali utilizzati come uffici, determinerà l'età ponderando i gruppi che vanno da 15 a 64 anni.

Il tasso di occupazione consente di stabilire se l'utente - quando è in età da lavoro - è probabilisticamente impegnato in un'attività lavorativa o no, in quanto ciò influenza in modo significativo il suo modello di comportamento. Il settore di occupazione è invece fondamentale per determinare il tasso metabolico perché l'attività manuale comporta consumi energetici più elevati, influenzando in modo determinante la soglia di comfort igrotermico.

Le percentuali di persone sovrappeso e obese consentono di determinare - attraverso la media pesata - la corporatura degli utenti: ciò permette di stabilire i carichi termici negli ambienti dovuti all'affollamento degli stessi, funzione della superficie corporea a sua volta dipendente dall'altezza e, appunto, dal peso.

Per orientare meglio il valutatore nel non facile compito di attribuire i modelli di comportamento agli utenti, è opportuno prelevare anche altri dati, sempre disponibili negli archivi dell'ISTAT, che possono dare indicazioni qualitative anche nello stabilire le diverse tipologie di utenza, ed in particolare:

- indice di povertà riferito alla media nazionale (tavola 13 - Occupazione e povertà);
- composizione del nucleo familiare (tavola 11 - Famiglia e istruzione);
- stato civile⁴⁵;
- grado di istruzione (tavola 11 - Famiglia e istruzione);
- salute dichiarata (tavola 1 - Stato di salute).

Questi indici, come già detto, non vengono impiegati in modo diretto negli algoritmi, ma possono essere utili per stabilire la sequenza di azioni elementari nel corso della giornata, e per distinguere i periodi dell'anno in cui tali attività vengono modificate in modo sostanziale: per uno studente, ad esempio, sarà necessario differenziare la valutazione nei mesi in cui è impegnato nelle attività scolastiche rispetto a quelli di sospensione delle lezioni, che sono molto diversi rispetto alla pausa estiva di un lavoratore.

Definite le classi di utenti, il valutatore dovrà procedere alla definizione del modello di comportamento utilizzando un elenco di attività ele-

⁴⁴ Le tavole sono scaricabili nell'area *download* della pagina *Indicatori socio sanitari regionali* all'indirizzo <http://www.istat.it/sanita/sociosan/>.

⁴⁵ È possibile calcolare il dato direttamente dal sito <http://demo.istat.it/>.

mentari: queste sono già disponibili per i locali ad uso abitativo o assimilabile (Tabella 3-4), ma possono essere ampliate utilizzando analoghi criteri di definizione.

età	altezza		BMI		
	♂	♀	normale	sovrappeso	obeso
0÷1	0.50	0.50	(17.5)	(18.6)	(19.5)
1÷4	0.91	0.90	17.5	18.6	19.5
5÷9	1.24	1.22	17.9	19.1	20.3
10÷14	1.52	1.52	20.4	22.8	25.1
15÷18	1.74	1.69	24.8	27.3	29.8
19÷24			21.5	27.5	32.5
25÷34			22.5	28.0	33.0
35÷44	1.75	1.70	23.5	28.5	33.5
45÷54			24.5	29.0	34.0
55÷64			25.5	29.5	34.5
65+			26.5	30.0	35.0

Tabella 4-21 Altezze ed indice di massa corporea per fasce d'età

Le caratteristiche fisiche possono essere invece determinate tutte a partire dall'età media e dalla percentuale di persone sovrappeso e obese: impiegando i valori riportati nella Tabella 4-21, ricavati dalla letteratura medica⁴⁶, è possibile valutare con il sistema della media ponderata l'indice di massa corporea della classe di utente, e quindi il peso dalla formula:

$$W = \frac{BMI}{Z^2} \quad , \quad (4.40)$$

dove Z è l'altezza media espressa in metri. Nella tabella proposta gli indici di massa corporea degli uomini e delle donne sono stati omogeneizzati per semplicità, considerando quindi diversa soltanto la statura.

4.1.2 Scala edilizia e di unità ambientale

4.1.2.1 Variabili termo-igrometriche

Per determinare le condizioni all'interno delle singole unità ambientali è necessario stimare alcune variabili a scala di edificio; come già detto nel § 2.2.1, irradianza e ventilazione dipendono sensibilmente dalla morfologia del territorio che circonda l'edificio per cui occorre introdurre opportuni algoritmi di calcolo che permettano di valutare questi fenomeni con maggiore precisione.

Com'è noto in letteratura, per individuare le portate d'aria che entrano all'interno dei singoli ambienti attraverso gli infissi aperti è necessario stimare la pressione esercitata sulle superfici esterne causata dai flussi di vento presenti, che a loro volta dipendono - per intensità e direzione - dalla forma delle costruzioni presenti. Come proposto nel § 4.1.1.1, è necessario individuare le aree A_0 , A_1 , A_2 e A_3 , rispettivamente del fronte principale, di quello ad esso prospiciente e dei due laterali utilizzando le tecniche precedentemente descritte, ai quali si associano le distanze d_1 , d_2 e d_3 come in Figura 4-10.

⁴⁶ Le altezze sono state calcolate eseguendo le medie aritmetiche dei valori riscontrati in V. Maglietta, *Valori normali richiami diagnostici e dati clinici utili in pediatria*, CEA, Milano 1994; gli indici di massa corporea sono stati ricavati eseguendo le medie dei valori ricavati dai diagrammi messi a disposizione dal CDC - Centres for Disease Control and Prevention, scaricabili all'indirizzo <http://www.cdc.gov/growthcharts/>.

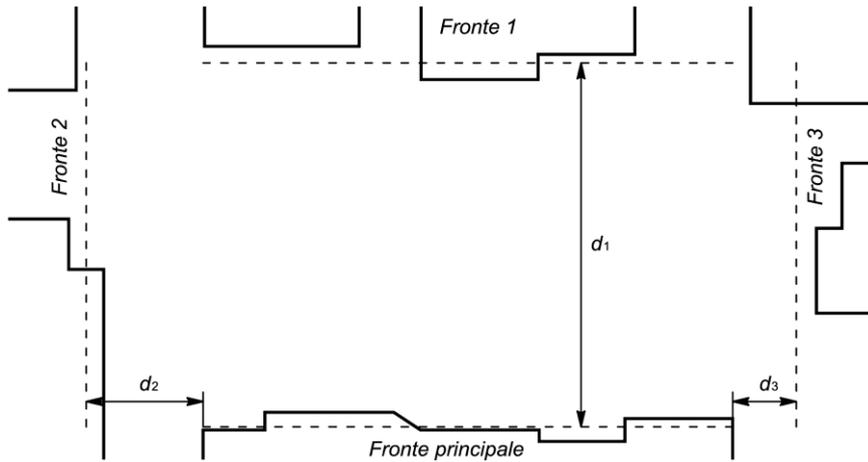


Figura 4-10 Invaso rettangolare e distanze dal fronte principale

Per ogni fronte, avendone precedentemente determinato lunghezza l e altezza Z per il calcolo dell'area, è possibile valutare la lunghezza rappresentativa, o *scaling length*, r pari a⁴⁷:

$$r = \min \{Z, l\}^{0.67} \times \min \{8 \min \{Z, l\}; \max \{Z, l\}\}^{0.33}, \quad (4.41)$$

grazie alla quale potranno ricavarsi dei coefficienti con cui saranno realizzate le interpolazioni lineari necessarie a valutare la pressione presente sulle diverse facciate dell'edificio. In particolare, si è verificato grazie a diverse simulazioni che l'effetto della presenza degli ostacoli frapposti tra l'edificio ed il flusso d'aria è pressoché trascurabile quando la distanza supera di 25 volte la lunghezza r (Figura 4-11).

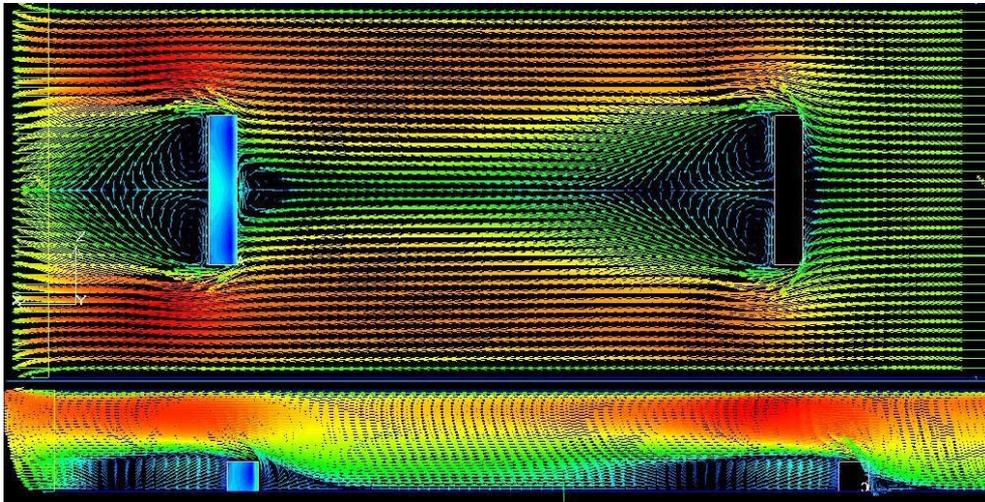


Figura 4-11 Simulazione dei flussi d'aria incidenti su un edificio posto ad una distanza superiore a 25 volte la lunghezza rappresentativa di un ostacolo ad esso antistante

Per tutti i tre fronti, dopo averne determinato il rapporto d_j/r , con $j=\{1,2,3\}$, si calcolerà il coefficiente:

$$f_d = \begin{cases} 1, & \text{se } d_j/r_j \leq 1 \\ \frac{25}{24} - \frac{d_j}{24r}, & \text{se } 1 < d_j/r_j < 25. \\ 0, & \text{se } d_j/r_j \geq 25 \end{cases} \quad (4.42)$$

⁴⁷ Cfr. Cap. 16, ASHRAE, *Handbook - Fundamentals*, op. cit.. Cfr. anche ASHRAE, *Handbook - HVAC Applications*, cap. 44.

Si valuterà poi un coefficiente rappresentativo pari a:

$$\begin{aligned} f_{r,1} &= f_{d,1} A_1 / A_0 \\ f_{r,2} &= f_{d,2} A_2 / 24r_2, \\ f_{r,3} &= f_{d,3} A_3 / 24r_3 \end{aligned} \quad (4.43)$$

che verrà usato in combinazione con un secondo coefficiente di forma per eseguire l'interpolazione lineare tra nove diversi schemi notevoli. Tale valore è funzione del rapporto tra larghezza l_0 ed altezza Z_0 del fronte principale, e vale:

$$f_0 = \begin{cases} 1, & \text{se } Z_0/l_0 \geq 3 \\ \frac{Z_0}{2.7l_0} - \frac{1}{9}, & \text{se } 1/3 < Z_0/l_0 < 3. \\ 0, & \text{se } Z_0/l_0 \leq 1/3 \end{cases} \quad (4.44)$$

Determinata la velocità dell'aria all'altezza Z nei pressi della facciata⁴⁸, la pressione esercitata su di essa è pari a⁴⁹:

$$p_a = f_{p,o} \frac{\rho_a v_a^2 [z]}{2}, \quad (4.45)$$

dove la densità dell'aria è di 1.2 kg m^{-3} , e $f_{p,o}$ rappresenta il *coefficiente di pressione*, che occorre calcolare. Si ipotizza quindi di dividere la superficie del fronte principale in nove sezioni, ognuna delle quali è caratterizzata da una diversa pressione omogenea; conoscendo l'angolo di incidenza del flusso d'aria⁵⁰, si calcola un primo valore pari a:

$$p_{000} = f_0 f_A + (1 - f_0) f_B, \quad (4.46)$$

ottenuto utilizzando la Tabella 4-22 dopo aver individuato a quale delle nove sezioni il punto di interesse appartiene; per interpolare i rimanenti schemi, bisogna preventivamente ottenere le costanti:

$$\begin{aligned} f_{000} &= 1 - f_{r,1} - f_{r,2} - f_{r,3} + f_{r,1} f_{r,2} + f_{r,1} f_{r,3} + f_{r,2} f_{r,3} - f_{111} \\ f_{001} &= f_{r,3} - f_{r,1} f_{r,3} - f_{r,2} f_{r,3} + f_{111} \\ f_{010} &= f_{r,2} - f_{r,1} f_{r,2} - f_{r,2} f_{r,3} + f_{111} \\ f_{100} &= f_{r,1} - f_{r,1} f_{r,2} - f_{r,1} f_{r,3} + f_{111} \\ f_{011} &= f_{r,2} f_{r,3} - f_{111} \\ f_{101} &= f_{r,1} f_{r,3} - f_{111} \\ f_{110} &= f_{r,1} f_{r,2} - f_{111} \\ f_{111} &= f_{r,1} f_{r,2} f_{r,3} \end{aligned}, \quad (4.47)$$

grazie alle quali è possibile ricavare il coefficiente cercato nel seguente modo:

$$f_{p,o} = \sum_j p_j f_j, \quad j = \{000, 100, 010, 001, 110, 101, 011, 111\}, \quad (4.48)$$

dove i coefficienti di pressione p_j sono ricavati dalla Tabella 4-23, dalla Tabella 4-24 e dalla Tabella 4-25.

	Schema A – edificio basso			Schema B – Edificio alto		
	R	L		R	L	
<i>Angolo di incidenza 0°</i>						
Z_0	9.8	9.8	9.8	4.0	6.7	4.0
$^{2/3} Z_0$	8.9	10.6	8.9	4.5	6.7	4.5
$^{1/3} Z_0$	12.7	14.5	12.7	5.4	6.3	5.4
<i>Angolo di incidenza 45°</i>						
Z_0	6.2	5.8	5.3	5.8	3.6	-2.2

⁴⁸ La velocità può essere determinata utilizzando la formula in nota 36 a pag.51.

⁴⁹ Cfr. Cap. 16, ASHRAE, *Handbook - Fundamentals*, op. cit..

⁵⁰ Cfr. nota 9 a pag.77: l'angolo si misura dalla normale uscente nel verso orario.

${}^2/{}_3 Z_0$	11.7	10.0	6.7	6.7	3.3	-2.8
${}^1/{}_3 Z_0$	13.6	13.6	10.9	8.1	4.5	-4.5
<i>Angolo di incidenza 90°</i>						
Z_0	-1.3	0.4	-1.3	1.8	-1.8	-0.9
${}^2/{}_3 Z_0$	-1.1	0.6	-1.7	-1.1	-4.5	-1.1
${}^1/{}_3 Z_0$	-1.8	0.9	-2.7	0.0	-2.7	-1.8
<i>Angolo di incidenza 135°</i>						
Z_0	-6.2	-0.4	1.3	0.4	-2.2	2.7
${}^2/{}_3 Z_0$	-7.8	0.0	1.7	0.6	-2.8	3.3
${}^1/{}_3 Z_0$	-12.7	0.9	2.7	0.9	-4.5	5.4
<i>Angolo di incidenza 180°</i>						
Z_0	-0.9	0.9	-0.9	-2.7	-2.7	-2.7
${}^2/{}_3 Z_0$	-1.1	1.1	-1.1	-2.8	0.0	-2.8
${}^1/{}_3 Z_0$	-1.8	1.8	1.8	-2.7	-2.7	-2.7
<i>Angolo di incidenza 225°</i>						
Z_0	1.3	-0.4	-6.2	2.7	-2.2	0.4
${}^2/{}_3 Z_0$	1.7	0.0	-7.8	3.3	-2.8	0.6
${}^1/{}_3 Z_0$	2.7	0.9	-12.7	5.4	-4.5	0.9
<i>Angolo di incidenza 270°</i>						
Z_0	-1.3	0.4	-1.3	-0.9	-1.8	1.8
${}^2/{}_3 Z_0$	-1.7	0.6	-1.1	-1.1	-4.5	-1.1
${}^1/{}_3 Z_0$	-2.7	0.9	-1.8	-1.8	-2.7	0.0
<i>Angolo di incidenza 315°</i>						
Z_0	5.3	5.8	6.2	-2.2	3.6	5.8
${}^2/{}_3 Z_0$	6.7	10.0	11.7	-2.8	3.3	6.7
${}^1/{}_3 Z_0$	10.9	13.6	13.6	-4.5	4.5	8.1
	${}^1/{}_3 l_0$	${}^2/{}_3 l_0$	l_0	${}^1/{}_3 l_0$	${}^2/{}_3 l_0$	l_0

Tabella 4-22 Coefficienti di pressione per edifici bassi e alti, senza ostacoli presenti

Schema 100			Schema 010			Schema 001		
R	L		R	L		R	L	
<i>Angolo di incidenza 0°</i>								
4.2	-0.6	4.2	1.8	-0.6	-3.0	-3.0	0.6	1.8
3.8	-1.5	3.8	1.5	0.0	-0.8	-0.8	0.0	1.5
4.9	-2.5	4.9	2.5	0.0	-1.2	-1.2	0.0	2.5
<i>Angolo di incidenza 45°</i>								
6.0	0.6	-2.4	1.8	1.2	-0.6	-0.6	1.2	1.8
6.8	-0.8	4.5	2.3	1.5	0.0	0.0	1.5	2.3
-7.4	-4.9	-11.0	2.5	1.2	1.2	1.2	1.2	1.5
<i>Angolo di incidenza 90°</i>								
0.6	-0.6	-3.0	-0.6	0.0	0.6	0.6	0.0	-0.6
0.8	-0.8	-3.0	-0.8	0.0	0.8	0.8	0.0	-0.8
1.2	-1.2	-4.9	-1.2	1.2	2.5	2.5	1.2	-1.2
<i>Angolo di incidenza 135°</i>								
-4.2	2.4	1.8	-2.4	-1.2	1.8	1.8	-1.2	-2.4
-4.5	1.5	2.3	-3.0	-1.5	2.3	2.3	-1.5	-3.0
-7.4	0.0	4.9	-3.7	-2.5	4.9	4.9	-2.5	-3.7
<i>Angolo di incidenza 180°</i>								
-3.0	0.6	-3.0	-0.6	0.6	1.8	1.8	0.6	-0.6
-1.5	0.8	-1.5	-0.8	0.8	2.3	2.3	0.8	-0.8
-1.2	1.2	-1.2	-1.2	1.2	3.7	3.7	1.2	-1.2
<i>Angolo di incidenza 225°</i>								
1.8	2.4	-4.2	1.2	0.0	-1.2	-1.2	0.0	1.2
2.3	1.5	-4.5	1.5	0.0	-1.5	-1.5	0.0	1.5
4.9	0.0	-7.4	2.5	1.2	-2.5	-2.5	1.2	2.5
<i>Angolo di incidenza 270°</i>								
-3.0	-0.6	0.6	-1.8	-0.6	0.6	0.6	-0.6	-1.8
-3.0	-0.8	0.8	-2.3	-0.8	0.8	0.8	-0.8	-2.3
-4.9	-1.2	1.2	-3.7	-1.2	1.2	1.2	-1.2	-3.7
<i>Angolo di incidenza 315°</i>								
-2.4	0.6	6.0	0.6	-0.6	-1.8	-1.8	-0.6	0.6
-4.5	-0.8	6.8	1.5	-0.8	-1.5	-1.5	-0.8	1.5
-11.0	-4.9	7.4	2.5	0.0	-2.5	-2.5	0.0	2.5

Tabella 4-23 Coefficienti di pressione per edifici alla presenza di un ostacolo

Schema 110			Schema 101			Schema 011		
R	L		R	L		R	L	
<i>Angolo di incidenza 0°</i>								
4.8	2.4	-0.6	-0.6	2.4	4.8	-3.0	1.2	-3.0
4.5	2.3	-0.8	-0.8	2.3	4.5	-2.3	1.5	-2.3
8.6	4.9	-1.2	-1.2	4.9	8.6	-2.5	1.2	-2.5
<i>Angolo di incidenza 45°</i>								
4.8	0.0	-1.2	-1.2	0.0	4.8	-3.6	0.6	1.2
6.1	0.8	0.0	0.0	0.8	6.1	-3.8	1.5	3.0
7.4	1.2	0.0	0.0	1.2	7.4	-3.7	2.5	7.4
<i>Angolo di incidenza 90°</i>								
-1.2	-0.6	-1.2	0.0	-0.6	-1.2	0.6	0.6	0.6
-1.5	-0.8	0.0	0.0	-0.8	-1.5	1.5	0.0	0.8
-2.5	-1.2	0.0	0.0	-1.2	-2.5	3.7	1.2	1.2
<i>Angolo di incidenza 135°</i>								
-1.8	-0.6	-0.6	-0.6	-0.6	-1.8	-0.6	-0.6	-0.6
-2.3	-0.8	0.0	0.0	-0.8	-2.3	-0.8	-0.8	0.0
-3.7	-1.2	2.5	2.5	-1.2	-3.7	-1.2	-1.2	0.0
<i>Angolo di incidenza 180°</i>								
-0.6	0.6	1.2	1.2	0.6	-0.6	-0.6	0.0	-0.6
-0.8	0.8	1.5	1.5	0.8	-0.8	-0.8	0.0	-0.8
-1.2	1.2	2.5	2.5	1.2	-1.2	0.0	0.0	0.0
<i>Angolo di incidenza 225°</i>								
-0.6	-1.2	-0.6	-0.6	-1.2	-0.6	-0.6	-0.6	-0.6
-0.8	-0.8	-0.8	-0.8	-0.8	-0.8	0.0	-0.8	-0.8
-1.2	-1.2	-1.2	-1.2	-1.2	-1.2	0.0	-1.2	-1.2
<i>Angolo di incidenza 270°</i>								
-1.2	-1.2	-0.6	-0.6	-1.2	-1.2	0.6	0.6	0.6
-1.5	-0.8	0.0	0.0	-0.8	-1.5	0.8	0.0	1.5
-2.5	-1.2	1.2	1.2	-1.2	-2.5	1.2	1.2	3.7
<i>Angolo di incidenza 315°</i>								
-0.6	1.8	-5.4	-5.4	1.8	-0.6	1.2	0.6	-3.6
0.0	0.0	-6.8	-6.8	0.0	0.0	3.0	1.5	-3.8
-1.2	3.7	-11.0	-11.0	3.7	-1.2	7.4	2.5	-3.7

Tabella 4-24 Coefficienti di pressione per edifici alla presenza di due ostacoli

Schema 111								
R	L		R	L		R	L	
<i>Angolo di incidenza 0°</i>			<i>Angolo di incidenza 45°</i>			<i>Angolo di incidenza 90°</i>		
0.6	0.6	0.6	-3.0	0.0	1.8	0.6	0.0	1.2
-0.8	-0.8	-0.8	-4.5	-0.8	0.8	0.8	0.0	1.5
0.0	0.0	0.0	-6.1	0.0	3.7	1.2	0.0	2.5
<i>Angolo di incidenza 135°</i>			<i>Angolo di incidenza 180°</i>			<i>Angolo di incidenza 225°</i>		
0.0	0.6	0.6	0.0	0.0	0.0	0.6	0.6	0.6
0.0	0.8	0.8	0.0	0.0	0.0	0.8	0.8	0.0
0.0	1.2	2.5	0.0	0.0	0.0	2.5	1.2	0.0
<i>Angolo di incidenza 270°</i>			<i>Angolo di incidenza 315°</i>					
1.2	0.0	0.6	1.8	0.0	-3.0			
1.5	0.0	0.8	0.8	-4.5	1.8			
2.5	0.0	1.2	3.7	0.0	-6.1			

Tabella 4-25 Coefficienti di pressione per edifici alla presenza di tre ostacoli

Per calcolare l'irradianza oraria su una chiusura – sia opaca (parete, solaio) che trasparente (infisso) – occorre determinarne lo *sky line* finale tenendo conto anche degli eventuali aggetti laterali e superiori, e delle costruzioni ad essa antistante. Occorrerà quindi prendere in considerazione:

- la linea⁵¹ dell'orizzonte geografico;

⁵¹ Per *linea* si intende la spezzata che collega tutti i punti individuati dalle altezze angolari calcolate per ogni direzione di osservazione (una ogni 15° a partire da nord); le direzioni sono limitate al campo di $\pm 90^\circ$ a partire dalla normale uscente dalla superficie nel caso di elementi verticali, mentre è esteso a tutte le 24 direzioni nel caso di elementi orizzontali.

- la linea superiore ed inferiore dello sky line determinato dalle ostruzioni a scala urbana;
- la linea superiore ed inferiore dei fronti 1, 2 e 3 – qualora esistenti;
- la linea superiore ed inferiore di eventuali sporgenze presenti sul fronte principale;
- la linea inferiore di eventuali aggetti presenti sul fronte principale.

Si calcola quindi la media delle altezze angolari:

1. dell'orizzonte geografico;
2. dell'altezza massima – per ogni angolo di osservazione – tra le linee superiori dello sky line, dei fronti 1, 2 e 3 e di eventuali sporgenze presenti sul fronte principale;
3. dell'altezza minima – per ogni angolo di osservazione – tra le linee inferiori dello sky line, dei fronti 1, 2 e 3 e di eventuali sporgenze presenti sul fronte principale.

In accordo al modello di cielo di Hay e Davies⁵², la componente direzionale della luce sarà valutata come:

$$\begin{aligned} \bar{I}_b[t] &= (\bar{I}_{b,ho}[t] + f_{H_b} \bar{I}_{d,ho}[t]) \cos \Delta\gamma[t] \\ \Delta\gamma[t] &= \begin{cases} \left| \gamma_n - \frac{t\pi}{43200} \right|, & \text{per elementi verticali} \\ 0, & \text{per elementi orizzontali} \end{cases} \end{aligned} \quad (4.49)$$

dove $t\pi/43200$ rappresenta l'azimut solare calcolato (da nord verso est) per gli elementi verticali, e γ_n è l'angolo formato dalla normale uscente dalla superficie (con la medesima convenzione). I valori di irradianza oraria diretta e diffusa corrispondono a quanto stimato nel § 4.1.1.2 se il disco solare non è coperto da nessuno degli ostacoli di cui al precedente elenco puntato, o saranno nulli altrimenti. Per determinare la parte isotropa, sarà necessario individuare la percentuale di angolo solido che sottende le fasce corrispondenti al cielo, al terreno ed agli edifici, illustrate nella Figura 2-5. Come dal modello di Hay e Davies si valutano le componenti:

$$\begin{aligned} \bar{I}_{d,sky}[t] &= \bar{I}_{d,ho}[t] (1 - f_{H_b}) \\ \bar{I}_{d,gnd}[t] &= 0.2 (\bar{I}_{b,ho}[t] + \bar{I}_{d,ho}[t]) \end{aligned} \quad (4.50)$$

dove l'irradianza diretta (pedice b) è nulla se il sole è alle spalle degli ostacoli precedentemente determinati e l'albedo del terreno è pari a 0.2. L'aliquota riflessa dagli edifici è invece:

$$\bar{I}_{d,site}[t] = 0.5 \left(\bar{I}_{d,sky}[t] + \bar{I}_{d,gnd}[t] + \bar{I}_{b,site}[t] \left(1 - \frac{\varphi_{sh}[t]}{\pi \mathcal{A}_{site}} \right) \right); \quad (4.51)$$

qui si considera che l'albedo degli edifici sia di 0.5, mentre la quantità di irraggiamento riflesso dalle costruzioni per effetto dell'illuminamento diretto del sole è stimabile come:

$$\begin{aligned} \bar{I}_{b,site,max}[t] &= \frac{(\bar{I}_{b,ho}[t] + f_{H_b} \bar{I}_{d,ho}[t])}{\tan \varphi_{sun}} \\ \bar{I}_{b,site}[t] &= \begin{cases} \frac{\bar{I}_{b,site,max}[t]}{2} \left(1 - \frac{\Delta\gamma[t]^2}{16200} \right), & \text{se } \Delta\gamma[t] \leq \frac{\pi}{2} \\ \bar{I}_{b,site,max}[t] \left(1 - \frac{\Delta\gamma[t]}{\pi} \right)^2, & \text{se } \Delta\gamma[t] > \frac{\pi}{2} \end{cases} \end{aligned} \quad (4.52)$$

⁵² Cfr. § 2.2.1.

L'altezza angolare φ_{sh} - che rappresenta l'angolo di vista di un'eventuale ombra che il fronte principale proietta sugli edifici antistanti - è funzione della distanza media delle costruzioni dal punto di calcolo, ed è pari a d_1 se è presente il fronte 1 (Figura 4-10), altrimenti è stimabile come la media delle distanze dei diversi ostacoli che formano lo sky line a scala urbana. Detta quindi d_{med} questa distanza, Z_0 l'altezza del fronte principale, Z_{bar} l'altezza del baricentro del punto di calcolo, e $\varphi_{site,min}$ la media angolare calcolata al punto 3 del precedente elenco numerato, si ottiene il valore:

$$\varphi_{sh}[t] = \begin{cases} 0, & \text{se } \frac{Z_0}{\tan\varphi_{sun}} \leq d_{med} \\ \varphi_{site,min} - \arctan\left[\frac{Z_{bar} + d_{med} \tan\varphi_{sun} - Z_0}{d_{med}}\right], & \text{se } \frac{Z_0}{\tan\varphi_{sun}} > d_{med} \end{cases} \quad (4.53)$$

Siano quindi $\varphi_{site,max}$ e φ_{sky} la medie valutate ai punti 3 e 1: l'irradianza oraria calcolata su una superficie è pari a:

$$\bar{I}_{tot}[t] = \bar{I}_b[t] + \bar{I}_{d,sky}[t]f_{sky} + \bar{I}_{d,gnd}[t]f_{gnd} + \bar{I}_{d,site}[t]f_{site} \quad (4.54)$$

i coefficienti rappresentativi degli angoli solidi sono valutati come:

$$f_{sky} = \frac{\pi/2 - \max\{\varphi_{sky}, \varphi_{site,max}\}}{\pi}$$

$$f_{site} = \begin{cases} \frac{|\varphi_{site,max} - |\varphi_{site,min}||}{\pi}, & \text{per elementiverticali} \\ \frac{|\varphi_{site,max}|}{\pi}, & \text{per elementiorizzontal} \end{cases} \quad (4.55)$$

$$f_{gnx} = \begin{cases} 1 - f_{sky} - f_{site}, & \text{per elementiverticali} \\ 0, & \text{per elementiorizzontal} \end{cases}$$

Quando non sono presenti sistemi di regolazione, la temperatura⁵³, funzione del tempo, è definita attraverso la relazione⁵⁴:

$$\theta_i[t] = \frac{\Phi_{tot}[t] + (Y_{tot} - H_{tot})\theta_{i,med}}{Y_{tot} + c_a \dot{m}_a[t]}, \quad (4.56)$$

dove H_{tot} è il coefficiente di trasmissione termico globale della struttura edilizia, Y_{tot} è l'ammittenza termica totale, c_a è il calore specifico dell'aria pari a $1000 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$, $\dot{m}_a[t]$ è la portata massica in entrata all'ora t nell'ambiente, $\Phi_{tot}[t]$ è il carico termico orario, e $\theta_{i,med}$ è la temperatura media interna dell'aria.

Il coefficiente di trasmissione è dato da:

$$H_{tot} = f_{cd} \sum_{j=1}^n U_j A_j,$$

$$f_{cd} = 1 - 0.194U_{med} + 0.021U_{med}^2 \quad (4.57)$$

$$U_{med} = \frac{\sum_{j=1}^k U_j A_j}{\sum_{j=1}^k A_j}$$

dove n è il numero delle superfici disperdenti (e cioè che separano ambienti a diversa temperatura), k è il numero totale delle superfici che limitano l'am-

⁵³ Dato che in ogni ambiente esiste sempre un gradiente spaziale, si adotta come riferimento la temperatura rilevata nel baricentro, ad un'altezza compresa tra 0.6 e 1.6 m dal pavimento. Cfr. UNI EN ISO 7726, *Ergonomia degli ambienti termici. Strumenti per la misurazione delle grandezze fisiche.*

⁵⁴ Cfr. UNI 10375, *op. cit.*

biente, A è l'area delle stesse, e U è la trasmittanza di ciascun elemento. Il calcolo di U dipende da diversi fattori, quali la tipologia di chiusura - opaca o trasparente -, il numero e tipo di ponti termici presenti, in grado di correggere anche la presupposta mono dimensionalità del flusso, e il tipo di elemento tecnico - di separazione tra due ambienti a diversa temperatura, contro terra, su ambiente aerato; per questo motivo, le norme di riferimento sono diverse, e variano anche a seconda della precisione del metodo utilizzato e della complessità di valutazione. Per elementi opachi che separano ambienti a diverse temperature, ai fini pratici di calcolo è possibile applicare la relazione⁵⁵:

$$U_{og} = \frac{1 + f_{\psi}}{R_{a,i} + R_{a,o} + \sum_n R_n + \sum_m R_{a,m}} = \frac{1 + f_{\psi}}{0.13 + 0.04 + \sum_n \frac{d_n}{\lambda_n} + \sum_m \frac{1}{h_{a,m}}}, \quad (4.58)$$

dipendente dalle diverse resistenze termiche dovute ai fenomeni convettivi e radiativi degli strati d'aria superficiali ($R_{a,i}$ e $R_{a,o}$) ed interni ($R_{a,m}$), a quelle dovute alla conduttanza dei diversi strati solidi (R_n), e ad un fattore di correzione per i ponti termici f_{ψ} . La resistenza nel caso di intercapedini si differenzia a seconda della ventilazione delle stesse, ed in particolare si distinguono in⁵⁶:

- non ventilate (senza comunicazione con l'ambiente esterno o con aperture non superiori a 500 mm² per metro lunghezza - per pareti verticali - o per metro quadro - per superfici orizzontali), per le quali si utilizzano i valori della Tabella 4-26⁵⁷; per spessori intermedi si procede per interpolazione lineare;
- debolmente ventilate (con aperture non superiori a 1500 mm²), per le quali si utilizza la metà dei valori della Tabella 4-26;
- fortemente ventilate (con aperture superiori a 1500 mm²), per le quali si utilizza lo stesso valore di $R_{a,i}$.

Spessore mm	Senso del flusso termico	
	Verticale	Orizzontale
0	0.00	0.00
5	0.11	0.11
7	0.13	0.13
10	0.15	0.15
15	0.16	0.17
25	0.18	0.18
50	0.19	0.18
100	0.19	0.18
300	0.20	0.18

Tabella 4-26 Resistenza termica di intercapedini non ventilate

Descrizione della struttura	f_{ψ}
Parete con isolamento all'esterno (a cappotto) senza aggetti/balconi e ponti termici corretti	0.05
Parete con isolamento all'esterno (a cappotto) con aggetti/balconi	0.15
Parete omogenea in mattoni pieni o in pietra (senza isolante)	0.05
Parete a cassa vuota con mattoni forati (senza isolante)	0.10
Parete a cassa vuota con isolamento nell'intercapedine (ponte termico corretto)	0.10
Parete a cassa vuota con isolamento nell'intercapedine (ponte termico non corretto)	0.20
Pannello prefabbricato in calcestruzzo con pannello isolante all'interno	0.30

Tabella 4-27 Coefficiente di maggiorazione per ponti termici

⁵⁵ Cfr. UNI/TS 11300-1, *op. cit.*

⁵⁶ *Ivi.*

⁵⁷ Non potendo determinare la direzione ascendente o discendente del flusso prima di eseguire il calcolo, la tabella è stata ottenuta eseguendo la media dei due valori riportati nella norma.

La resistenza dovuta offerta alla conduzione negli elementi solidi è funzione dello spessore d e della conduttività λ , ricavabile da apposite tabelle⁵⁸. Il coefficiente di maggiorazione f_ψ per i ponti termici è funzione del tipo di struttura, ed è ricavabile dalla Tabella 4-27.

Per gli elementi trasparenti composti da un unico pacchetto di strati vetrati (finestra singola), la trasmittanza è calcolata come⁵⁹:

$$U_{tr} = \frac{A_{gl}U_{gl} + A_{fr}U_{fr} + A_{oq}U_{oq}}{A_g + A_{fr} + A_{oq}}, \quad (4.59)$$

dove i valori di trasmittanza dei vetri (U_{gl}) e dei telai (U_{fr}) sono ricavabili direttamente da tabella⁶⁰, mentre quella di eventuali pannelli opachi presenti (U_{oq}) si ricava in base allo spessore ed alla conduttività. Per infissi a doppio pacchetto vetrato (finestre doppie), si applica la relazione⁶¹:

$$U_{tr} = \frac{1}{1/U_{tr,i} - R_{a,i} - R_{a,o} + R_m + 1/U_{tr,o}}, \quad (4.60)$$

funzione delle trasmittanze degli infissi interno ed esterno e delle resistenze superficiali $R_{a,i} = 0.13$, $R_{a,o} = 0.04$ m² K W⁻¹, mentre la resistenza R_m dell'intercapedine è riportata in un'apposita tabella⁶², funzione dello spessore e dell'emissività della superficie vetrata. Elementi a contatto con il terreno hanno una trasmittanza che può essere ottenuta sinteticamente⁶³ con la relazione⁶⁴:

$$U_{gr} = \frac{1}{1/U_{oq} + d_{gr}/2}, \quad (4.61)$$

dove la trasmittanza dell'elemento U_{oq} è ottenuta tramite la (4.58), mentre d_{gr} è pari a 1.57 volte la larghezza dell'ambiente⁶⁵, nel caso di pavimentazioni, e 0.77 volte la profondità di interramento per pareti verticali. Per sottotetti, con intercapedine superiore a 300 mm (al di sotto dei quali si applicano i valori della Tabella 4-26), questo va considerato come un ambiente a tutti gli effetti, le cui superfici disperdenti sono la pavimentazione ed il tetto vero e proprio, per il quale è disponibile un prospetto⁶⁶ con le resistenze termiche nel caso si impieghino manti di lastre o tegole su strutture inclinate (Tabella 4-28).

<i>Caratteristiche del tetto</i>	<i>Resistenza</i>
Tetto a tegole senza feltro, pannelli o equivalenti	0.06
Tetto a lastre o a tegole con feltro o pannelli o equivalenti sotto le tegole	0.2
Come sopra con rivestimento di alluminio o altro rivestimento a bassa emissività all'intradosso della copertura	0.3
Tetto rivestito con pannelli e feltri	0.3

Tabella 4-28 Resistenza termica dei tetti

⁵⁸ Cfr. UNI 10351:1994, *Materiali da costruzione. Conduttività termica e permeabilità al vapore*. Cfr. anche UNI 10355, *Murature e solai. Valori della resistenza termica e metodo di calcolo*.

⁵⁹ Cfr. UNI 10077-1:2007, *Prestazione termica di finestre, porte e chiusure oscuranti. Calcolo della trasmittanza termica. Parte 1: Generalità*.

⁶⁰ Cfr. Appendice C, UNI/TS 11300-1, *op. cit.*.

⁶¹ *Ivi*.

⁶² *Ivi*, Appendice C.

⁶³ Per il complesso calcolo esatto, cfr. UNI EN ISO 13770:2008, *Prestazione termica degli edifici. Trasferimento di calore attraverso il terreno. Metodo di calcolo*.

⁶⁴ Cfr. UNI 10375, *op. cit.*.

⁶⁵ La norma non specifica cosa intende per *larghezza* dell'ambiente; qui si considererà la lunghezza rappresentativa riportata nel § 2.2.4.

⁶⁶ Cfr. UNI EN ISO 6946, *op. cit.*.

L'ammittenza totale della struttura è data da:

$$Y_{tot} = Y_{med} \sum_{j=1}^n U_j A_j \quad (4.62)$$

$$Y_{med} = \frac{\sum_{j=1}^k Y_j A_j}{\sum_{j=1}^k A_j}$$

dove n è il numero delle superfici disperdenti, e k è quello delle superfici totali presenti nel volume di calcolo. Per componenti finestrati, è pari a:

$$Y_{tr} = \frac{1}{1/U_{tr} + 0.1} \quad (4.63)$$

Più complesso è la valutazione per componenti opachi: si determina per ogni strato j la matrice di trasferimento termico \underline{m}_j definita come⁶⁷:

$$m_{j,11} = m_{j,22} = \cosh \xi \cos \xi + i \sinh \xi \sin \xi$$

$$m_{j,12} = -\frac{\delta}{2\lambda} [\sinh \xi \cos \xi + \cosh \xi \sin \xi + i(\cosh \xi \sin \xi - \sinh \xi \cos \xi)], \quad (4.64)$$

$$m_{j,21} = -\frac{\lambda}{\delta} [\sinh \xi \cos \xi - \cosh \xi \sin \xi + i(\sinh \xi \cos \xi + \cosh \xi \sin \xi)]$$

funzione del rapporto ξ tra spessore d e la profondità di penetrazione periodica δ :

$$\delta = \sqrt{\frac{\lambda \mathcal{G}}{\pi \rho c}} \quad \xi = \frac{d}{\delta}, \quad (4.65)$$

dove λ è la conduttività termica, \mathcal{G} il periodo di osservazione (86.400 secondi, per variazioni di un giorno), ρ la densità, c la capacità termica. Per le intercapedini d'aria e gli strati esterni, la matrice di trasferimento si costruisce a partire dalla resistenza termica di calcolo R , ed è pari a:

$$\underline{m}_a = \begin{bmatrix} 1 & -R \\ 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (4.66)$$

Nel caso di componenti multistrato, numerando le singole matrici dei diversi elementi da 1 ad n (dal più interno al più esterno), e indicando con i pedici i ed o quelle relative agli strati periferici interno ed esterno, la:

$$\underline{M} = \underline{m}_i \left(\prod_{j=1}^n \underline{m}_j \right) \underline{m}_o, \quad (4.67)$$

rappresenta la matrice di trasferimento termico dell'elemento tecnico, da cui l'ammittenza cercata, sul lato j , è pari a:

$$Y_{oq,j} = \left| \frac{M_{jj} - 1}{M_{12}} \right| = \sqrt{\Re \left(\frac{M_{jj} - 1}{M_{12}} \right)^2 - \Im \left(\frac{M_{jj} - 1}{M_{12}} \right)^2}. \quad (4.68)$$

La portata massica $\dot{m}_a[t]$ nel volume di calcolo, in assenza di impianti ad aria, dipende dalla quantità che entra per infiltrazione o per libero ingresso attraverso gli infissi chiusi ed aperti, e dipende quindi dalle differenze di pressione che si sviluppano sulle differenti superfici esterne per effetto del vento. Per tale motivo occorre distinguere tre casi principali:

1. quando l'aria penetra dall'infisso chiuso per infiltrazione;
2. quando l'aria entra dall'infisso aperto, senza che si crei ventilazione in-

⁶⁷ Cfr. UNI EN ISO 13786:2008, *Prestazione termica dei componenti per l'edilizia. Caratteristiche termiche dinamiche. Metodi di calcolo*. Cfr. anche UNI 10375, *op. cit.*, Appendice A.

crociata (gli altri infissi esterni sono chiusi);

- quando l'aria entra o esce dall'infisso aperto per effetto della ventilazione incrociata (gli altri infissi esterni sono aperti).

Per la portata d'aria infiltrata (caso 1), le metodologie di calcolo sono diverse, ma tutte si basano sul ricambio d'aria espresso in funzione del volume dell'ambiente⁶⁸; la norma per la determinazione del carico termico e del FEN indicano che detta portata attraverso infissi chiusi è valutata tramite la relazione⁶⁹:

$$\dot{V}_{in,i} = V_i n_{50} f_{sh,i} f_{z,i} \quad (4.69)$$

dove V_i è il volume interno netto da ventilare, n_{50} è il tasso di ventilazione a 50 Pa, $f_{sh,i}$ è il coefficiente di schermatura e $f_{z,i}$ è il fattore di correzione per l'altezza dal suolo. In pratica, il flusso è originato dalla differenza di pressione $\Delta p_{i \leftrightarrow e}$ tra l'interno e l'esterno, che dipende dalla velocità del vento incidente sulle facciate dell'edificio. Ai fini del calcolo, si considera il tasso d'aria n_{50} generato da un $\Delta p_{i \leftrightarrow e} = 50$ Pa, funzione della qualità dell'infisso e della tipologia di costruzione (Tabella 4-29)⁷⁰.

Tipo di costruzione	Qualità dei serramenti		
	alto (elevata qualità) $10^{-3} s^{-1}$	medio (doppio vetro) $10^{-3} s^{-1}$	basso (vetro singolo) $10^{-3} s^{-1}$
Unifamiliare	< 1.1	1.1 – 2.8	> 2.8
Altri edifici	< 0.6	0.6 – 1.4	> 1.4

Tabella 4-29 Valori di trafilamento n_{50} dell'aria per l'intero edificio

Per tenere conto della presenza di ostacoli, in grado di ridurre la velocità del vento, il valore del tasso d'aria viene moltiplicato per un coefficiente di schermatura $f_{sh,i}$, funzione della morfologia del luogo (Tabella 4-30)⁷¹. In ultimo, il fattore di correzione $f_{z,i}$, funzione dell'altezza del locale rispetto al suolo, prende in considerazione l'aumento di velocità del vento dal basso verso l'alto (Tabella 4-31)⁷².

Classe di schermatura	Più aperture esposte	Una apertura esposta
Nessuna schermatura: edifici in zone ventose e/o emergenti in altezza in zone abitate	0.10	0.04
Schermatura moderata: edifici in campagna con alberi e/o altri edifici intorno ad essi; periferie	0.07	0.03
Schermatura elevata: edifici di altezza media nei centri abitati; edifici nei boschi	0.04	0.02

Tabella 4-30 Coefficiente di schermatura

Nel caso 2, la norma UNI 10375 determina il tasso di ventilazione in funzione della modalità di apertura e della direzione del flusso (Tabella 4-32); in questo caso si considera soltanto il dato relativo all'infisso aperto.

⁶⁸ Il tasso d'aria è di solito espresso come rapporto volume/ora; qui, per coerenza con il sistema di misura adottato, tutti i valori sono riportati in termine di volume/secondo.

⁶⁹ L'equazione è stata ottenuta confrontando relazioni in UNI EN 12831, pari a $\dot{V}_{in,i} = 2V_i n_{50} f_{sh,i} f_{z,i}$, e in UNI EN ISO 13790, pari a $\dot{V}_{inf,k} = V_k n_{50} f_{sh,k}$; se ne ricava che $2f_{sh,i} = f_{sh,k}$ e che nella seconda relazione $f_{z,k} = 1$.

⁷⁰ Ivi, Appendice G, e UNI EN 12831, op. cit..

⁷¹ Riscontrando nelle due norme (UNI EN 12831 e UNI EN ISO 13790) valori differenti nel caso di un'unica apertura esposta, si procede qui a calcolarne il valore medio, che viene riportato nella tabella.

⁷² Cfr. UNI EN 12831, op. cit..

Altezza del locale	Fattore di correzione
0 – 10	1.00
10 – 30	1.20
> 30	1.50

Tabella 4-31 Fattore di correzione per l'altezza

Direzione del flusso	Infisso aperto $10^{-3} s^{-1}$
Trasversale	3.33
Non trasversale	0.83

Tabella 4-32 Tasso di ventilazione attraverso gli infissi aperti e ventilazione non incrociata

Quando si verifica la ventilazione incrociata (caso 3), la determinazione della portata massica farà qui riferimento ad un unico caso, quando cioè *tutti* gli infissi esterni sono aperti, perché in questo caso il flusso d'aria è sicuramente massimo. La portata volumetrica che attraversa un'apertura di area libera A a causa della differenza di pressione $\Delta p_{i \leftrightarrow o}$ tra l'interno e l'esterno è pari a⁷³:

$$\dot{V}_{i \leftrightarrow o} = f_{pd} A \sqrt{2(p_o - p_i) / \rho_a} \quad (4.70)$$

avendo posto il coefficiente di perdita di carico f_{pd} pari a 0.65 per aperture esterne⁷⁴, p_o pari alla pressione esterna determinata con la (4.45) e p_i uguale alla pressione interna incognita; la direzione del flusso è sempre rivolta verso la pressione più bassa⁷⁵. Verticalmente, a causa della diminuzione di temperatura dell'atmosfera⁷⁶, si innescano forze di galleggiamento, per le quali la portata d'aria verso l'ambiente a temperatura più alta è dato da⁷⁷:

$$\dot{V}_{i \leftrightarrow o} = f_{pd} A \sqrt{2g\Delta z \Delta \theta / \max\{T_i; T_o\}} \quad (4.71)$$

Nei modelli multizonali a rete⁷⁸, ogni ambiente è rappresentato da un nodo di pressione, mentre i flussi sono definiti dalle (4.70) e (4.71); considerando un modello semplice ad un unico nodo interno⁷⁹ ed imponendo il bilancio di massa ($\sum_n \rho \dot{V}_j = 0$), si ottiene un'equazione radicale non lineare, la cui incognita è la pressione interna, risolta la quale diventano note tutte le portate volumetriche attraverso gli infissi esterni⁸⁰.

Le formule di cui sopra consentono di determinare le portate volumetriche; per ottenere le portate massiche, la norma indica⁸¹ che $\rho c_a = 1200 \text{ J m}^{-3} \text{ K}^{-1}$, per cui $\rho = 1.2 \text{ kg m}^{-3}$.

⁷³ Cfr. ASHRAE, *Handbook – Fundamentals*, op. cit., cap.27.

⁷⁴ Ivi, pag.27.11.

⁷⁵ La (4.70) può applicarsi anche tra due ambienti interni, per i quali il coefficiente è pari a 0.9. Cfr. Grosso M., *La simulazione del movimento dell'aria negli edifici*, in Faconti D., Piardi S., *La qualità ambientale degli edifici*, pag.552.

⁷⁶ Il gradiente verticale in condizioni standard è pari a 0.0065 K m^{-1} . Cfr. ASHRAE, *Handbook – Fundamentals*, op. cit., pag.6.1.

⁷⁷ Ivi, pag.27.11.

⁷⁸ Cfr. Grosso M., *La simulazione del movimento dell'aria negli edifici*, op. cit., pag.556.

⁷⁹ In pratica si considerano tutti gli ambienti interni ad uguale pressione o, se si vuole, come se l'unità immobiliare fosse costituita da un'unica stanza; ciò naturalmente è un'approssimazione ma rende meno complessa la valutazione della portata.

⁸⁰ Un sistema per la valutazione dell'incognita è rappresentato dal teorema degli zeri: attraverso un sistema iterativo è possibile *rifinire* la soluzione al grado di approssimazione desiderato.

⁸¹ Cfr. UNI EN ISO 13790, op. cit..

Il flusso termico orario è dato dalla relazione:

$$\Phi_{tot}[t] = f_{cd} \Phi_{cd}[t] + f_r \Phi_s[t] + \Phi_V[t] + \Phi_I[t], \quad (4.72)$$

ed è somma dei carichi termici che attraversano le chiusure e le partizioni per conduzione, dei flussi solari, dell'aria esterna che penetra nei locali, e delle generazioni interne di calore (ma potrebbe essere anche una portata frigorifera). La potenza trasmessa per conduzione, minorata del fattore f_{cd} calcolato come riportato nella (4.57), è pari alla somma delle aliquote che percorrono i componenti opachi e finestrati; le prime sono calcolate come⁸²:

$$\Phi_{oq}[t] = U_{oq} A [(\theta_{ref}[t - \phi_a] - \theta_{o,med}) f_{at} + \theta_{o,med}]; \quad (4.73)$$

il fattore di attenuazione del flusso termico f_{at} e lo sfasamento temporale ϕ_a si calcolano come⁸³:

$$f_{at} = \frac{1}{U_{oq} |M_{12}|}, \quad \phi_a = \frac{g}{2\pi} \arg(M_{12}), \quad (4.74)$$

dove il rapporto $g/2\pi$ per calcoli giornalieri vale circa 13578 secondi. La temperatura di riferimento θ_{ref} varia a seconda della tipologia di ambiente che con cui il volume di calcolo scambia termicamente, ed in particolare:

- per elementi che disperdono verso ambienti a diversa temperatura, θ_{ref} coincide con la temperatura oraria del locale confinante;
- per chiusure esterne, $\theta_{ref}[t] = \theta_o[t] + \alpha \bar{I}[t] / h_o$, dove la temperatura esterna oraria si ricava dalla (4.7), il coefficiente di assorbimento superficiale α è funzione del colore della superficie esterna (Tabella 4-33), l'irradianza oraria si desume dall'analogia della (4.12), ed $h_o = R_{a,o}^{-1}$;
- per tutti i solai a contatto con il terreno e per pareti con profondità di interrimento superiore a 0.5 m, $\theta_{ref}[t] = 22^\circ$;
- per pareti a contatto con il terreno con profondità di interrimento inferiore a 0.5 m, $\theta_{ref}[t]$ è pari alla media mensile esterna;
- per sottotetti, $\theta_{ref} = \theta_o[t] + \frac{0.05 \bar{I}_{ho}[t]}{1 + (0.35n[t]V)/(AU)}$, dove l'irradianza oraria

sul piano orizzontale \bar{I}_{ho} è desumibile dall'analogia della (4.12), il numero di ricambi orari $n[t]$ è funzione delle aperture presenti⁸⁴, V è il volume del sottotetto, e la trasmittanza termica del tetto è calcolata considerando $h_o = 8.2 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$.

Colore della superficie esterna	Coefficiente di assorbimento α
Chiaro	0.3
Medio	0.6
Scuro	0.9

Tabella 4-33 Coefficienti di assorbimento per chiusure opache

Le seconde aliquote, che attraversano i componenti finestrati, sono pari a:

$$\Phi_{tr}[t] = U_{tr} A \theta_o[t] + \alpha_{eq} \bar{AI}[t]; \quad (4.75)$$

per la quale il fattore di assorbimento solare equivalente α_{eq} (Tabella 4-35)⁸⁵

⁸² Cfr. UNI 10375, *op. cit.*.

⁸³ Cfr. UNI EN ISO 13786, *op. cit.*. Il particolare $|M_{12}| = \sqrt{\Re(M_{12})^2 - \Im(M_{12})^2}$ e $\arg(M_{12}) = \arctan[\Im(M_{12}) / \Re(M_{12})]$ per $\Re(M_{12}) > 0$, $\arg(M_{12}) = \arctan[\Im(M_{12}) / \Re(M_{12})] + \pi$ per $\Re(M_{12}) < 0$, e $\arg(M_{12}) = \pi / 2$ per $\Re(M_{12}) = 0$.

⁸⁴ Calcolato il rapporto tra l'area delle aperture diviso quella del tetto, se inferiore a 0.01, si considera un tasso orario di 1.5; per valori compresi tra 0.01 e 0.05, il tasso è di 6.0; valori superiori a 0.05 comportano un tasso di 12.0. *cfr.* UNI 10375, *op. cit.*.

⁸⁵ *Ivi.*

dipende dalla tipologia di pacchetto trasparente e dal sistema di oscuramento utilizzato (Tabella 4-34)⁸⁶.

Tipo di componente		τ_{\perp}	ζ_{\perp}
1	Vetro sodico calcico 3 mm	0.88	0.07
2	Vetro sodici calcico 6 mm	0.79	0.06
3	Vetro assorbente 6 mm	0.47	0.04
4	Vetro riflettente 24-48	0.28	0.19
5	Vetro doppio con strato selettivo	0.67	0.05
6	Triplo vetro	0.70	0.05
7	Triplo vetro, due strati selettivi	0.50	0.05
A	Veneziana chiara	0.34	0.59
B	Veneziana scura	0.34	0.31
C	Tenda leggera	0.60	0.30
D	Tenda media	0.30	0.25
E	Tenda pesante	0.07	0.08

Tabella 4-34 Coefficienti di trasmissione e riflessione perpendicolare

Tipo di vetro	Senza schermi	Tenda interna			Veneziana interna		Veneziana esterna	
		C	D	E	A	B	A	B
1	0.02	0.15	0.42	0.72	0.15	0.33	0.02	0.04
2	0.05	0.18	0.42	0.68	0.19	0.38	0.05	0.02
1+1	0.08	0.17	0.41	0.68	0.19	0.34	0.04	0.06
3	0.27	0.35	0.50	0.63	0.39	0.45		
3+1	0.18	0.27	0.40	0.53	0.29	0.36		
4	0.34	0.39	0.57	0.49	0.41	0.45		
4+1	0.23	0.26	0.34	0.41	0.28	0.32		

Tabella 4-35 Fattori di assorbimento solare equivalente

Il carico solare che entra attraverso gli elementi trasparenti si valuta come⁸⁷:

$$f_r = 1 - 0.320U_{med} + 0.030U_{med}^2, \quad (4.76)$$

$$\Phi_S[t] = f_{sm,med} \left(\Phi_{S,i \leftrightarrow o}[t] - \frac{1}{24} \sum_{t=1}^{24} \Phi_{S,i \leftrightarrow o}[t] \right) + \frac{1}{24} \sum_{t=1}^{24} \Phi_{S,i \leftrightarrow o}[t];$$

il fattore di smorzamento medio della struttura $f_{sm,med}$ è pari a:

$$f_{sm,med} = \sum_{j=1}^k [(1 - R_{a,i} Y_{oq,j}) A_{oq,j}] / \sum_{j=1}^k A_{oq,j}, \quad (4.77)$$

intendendo per k il numero delle superfici opache disperdenti, per $R_{a,i}$ la resistenza superficiale e Y_{oq} l'ammittenza dell'elemento calcolate sul lato rivolto all'interno del volume; il flusso solare è dato dalla relazione:

$$\Phi_{S,i \leftrightarrow o}[t] = \sum_{j=1}^n A_{gl,j} \bar{I}[t] \tau_{eq,j}, \quad (4.78)$$

nella quale n è il numero degli infissi, A_{gl} è l'area della sola superficie vetrata, $\bar{I}[t]$ è l'irradianza oraria e τ_{eq} il fattore di trasmissione solare equivalente, dipendente dal tipo di vetro utilizzato e dal sistema di oscuramento (Tabella 4-36)⁸⁸.

⁸⁶ La tabella è stata ottenuta sintetizzando le informazioni contenute in UNI 10375 e UNI/TS 11300-1; per i sistemi di oscuramento, si preferisce riportare le indicazioni di UNI 10375 che corrispondono ai valori medi riportati nell'Appendice D di UNI/TS 11300-1.

⁸⁷ Cfr. UNI 10375, *op. cit.*. La (4.76) non tiene conto dell'aliquota di radiazione che l'ambiente riemette verso l'infisso, che può essere stimata tra il 5 ed il 10% per area trasparente non superiore a 1/5 di quella calpestabile, e coefficiente di riflessione medio minore o uguale a 0,6.

⁸⁸ La tabella è stata ottenuta inserendo i dati contenuti in UNI 10375, e calco-

Tipo di vetro	Senza schermi	Tenda			Veneziana
		C	D	E	A, B
1	0.87	0.52	0.25	0.06	0.29
2	0.76	0.47	0.24	0.06	0.28
1+1	0.76	0.46	0.23	0.05	0.26
3	0.46	0.29	0.18	0.04	0.17
3+1	0.40	0.26	0.13	0.05	0.15
4	0.28	0.17	0.08	0.03	0.11
4+1	0.24	0.16	0.08	0.03	0.09
5	0.67	0.40	0.20	0.05	0.23
6	0.70	0.43	0.21	0.05	0.24
7	0.50	0.30	0.15	0.04	0.17

Tabella 4-36 Fattori di trasmissione solare equivalente

Il flusso termico è semplicemente determinato come:

$$\Phi_v[t] = c_a \dot{m}_a[t] \theta_o[t], \quad (4.79)$$

dove la portata massica dell'aria è determinata impiegando le relazioni precedentemente descritte. Il contributo delle sorgenti interne è invece pari a⁸⁹:

$$\Phi_i[t] = \sum_{j=1}^n \Phi_{i,j}[t], \quad (4.80)$$

intendendo per n il numero di sorgenti interne, e per $\Phi_{i,j}[t]$ la potenza emessa nell'ora di riferimento t. Questa potenza dipende dal tipo di macchinari presenti in ambiente e la simultaneità di utilizzo; questi a loro volta possono essere determinati in base alla destinazione d'uso degli ambienti, alla grandezza (valutata in funzione della superficie calpestabile) ed al livello di affollamento.

Giorni	Ore	Edifici residenziali	
		Soggiorno e cucina [W/m ²]	Altri ambienti [W/m ²]
Lunedì venerdì	07.00-17.00	8.0	1.0
	17.00-23.00	20.0	1.0
	23.00-07.00	2.0	6.0
Sabato domenica	07.00-17.00	8.0	2.0
	17.00-23.00	20.0	4.0
	23.00-07.00	2.0	6.0
Giorni	Ore	Edifici adibiti ad uffici	
		Uffici (60% della superficie) [W/m ²]	Altri ambienti (40% della superficie) [W/m ²]
Lunedì venerdì	07.00-17.00	20.0	8.0
	17.00-23.00	2.0	1.0
	23.00-07.00	2.0	1.0
Sabato domenica	07.00-17.00	2.0	1.0
	17.00-23.00	2.0	1.0
	23.00-07.00	2.0	1.0

Tabella 4-37 Flussi termici globali interni

Una prima indicazione per gli edifici residenziali divide gli ambienti in quattro categorie, per ognuna delle quali viene fornito un valore medio di flusso termico per metro quadro⁹⁰; valori parametrizzati variabili nel tempo

lando il coefficiente τ_{eq} delle componenti contenute in UNI/TS 11300-1 moltiplicando tra loro i rispettivi τ_{\perp} .

⁸⁹ Per sorgenti interne si considerano tutte quelle apparecchiature che immettono nell'ambiente energia sotto forma di calore; dal punto di vista teorico però, nulla vieta di considerare anche gli impianti di climatizzazione (in grado di fornire determinate potenze termiche o frigorifere) a patto che non siano fornite di sistema di termoregolazione, che interviene variando la potenza allo scopo di mantenere la temperatura costante.

⁹⁰ Cfr. UNI 10375, *op. cit.*. I valori sono: cucina, 5 Wm⁻²; bagni e camere da letto

sono invece riportati nella Tabella 4-37⁹¹. Per condizioni particolari, i flussi possono essere calcolati in funzione dell'affollamento (per contributi metabolici) e della categoria (apporti dovuti alla presenza di macchinari) valutabili attraverso la Tabella 4-38⁹².

Classe di densità	Apporti termici degli occupanti		Densità di flusso termico [W/m ²]
	m ² di pavimento per persona	Simultaneità	
I	1.0	0.15	15
II	2.5	0.25	10
III	5.5	0.27	5
IV	14	0.42	3
V	20	0.40	2

Categoria di edificio	Apporti termici delle apparecchiature		Densità media di flusso termico [W/m ²]
	Densità di flusso durante l'uso [W/m ²]	Simultaneità	
Uffici	15	0.20	3
Attività scolastiche	5	0.15	1
Cura della salute, attività clinica	8	0.50	4
Idem c.s., attività non clinica	15	0.20	3
Servizi di approvvigionamento	10	0.25	3
Esercizi commerciali	10	0.25	3
Luoghi di riunione	5	0.20	1
Alberghi e pensioni	4	0.50	2
Penitenziari	4	0.50	2
Attività sportive	4	0.25	1

Tabella 4-38 Flussi termici dovuto agli occupanti ed ai macchinari

La temperatura media interna dell'aria è data dalla relazione:

$$\theta_{i,med} = \frac{\sum_{t=1}^{24} \frac{\Phi_{tot}[t]}{Y_{tot} + c_a \dot{m}_a[t]}}{24 - (Y_{tot} - H_{tot}) \sum_{t=1}^{24} \frac{1}{Y_{tot} + c_a \dot{m}_a[t]}} \quad (4.81)$$

mentre la temperatura media radiante si determina come:

$$\theta_{mr}[t] = \frac{\theta_i[t] h_{i,cv} \sum_{j=1}^n A_j + c_a \dot{m}_a[t] (\theta_i[t] - \theta_o[t])}{h_{cv} \sum_{j=1}^n A_j} \quad (4.82)$$

dove il coefficiente di scambio termico superficiale per convezione $h_{i,cv}$ è pari a 2.7 W m⁻² K⁻¹, ed n è il numero di superfici che limitano l'ambiente. Occorre ora definire le condizioni iniziali di calcolo, ed in particolare il valore medio di temperatura da attribuire al locale - in luogo della (4.81) - all'inizio del processo iterativo descritto nel § 4.2.4, e l'andamento delle temperature dei locali adiacenti, che possono appartenere alla stessa unità ambientale (e quindi sono incogniti) o di una differente (e quindi sono sconosciuti). Per tale motivo, si distingueranno tre tipologie di locale, con differente profilo termico, ed in particolare:

1. locali climatizzati;
2. locali parzialmente climatizzati;
3. locali non climatizzati.

to, 2 Wm⁻²; soggiorni, 3 Wm⁻².

⁹¹ Cfr. Appendice K, UNI EN ISO 13790, e UNI EN 12831, *op. cit.*.

⁹² *Ivi.*

Al primo gruppo appartengono tutti quei locali la cui funzione rende obbligatorio per legge l'impiego, su tutte le 24 ore, di impianti di climatizzazione, la quale condizione si riscontra nell'edilizia sanitaria e ricettiva. Qui il profilo termico è bloccato alle temperature di 20°C per il periodo invernale e 26°C per quello estivo, con un'oscillazione praticamente nulla. Al secondo gruppo appartengono invece i locali che vengono utilizzati a fini lavorativi soltanto in alcuni momenti della giornata, durante i quali sono attivi gli impianti di climatizzazione. A questa categoria appartengono tutte le tipologie di attività ad esclusione di quelle sanitarie, ricettive ed abitative. Il profilo termico è quindi il medesimo della prima categoria durante le ore di impiego, ed è invece pari a quello della terza categoria nel periodo di mancato utilizzo. Alla terza categoria appartiene quindi soltanto la tipologia residenziale, nella quale si considera che gli utenti dispongano di sistemi di controllo igrotermico non particolarmente raffinati, che consentano di raggiungere le temperature medie di comfort calcolate con la (4.104), con un'escursione termica pari alla metà del $\Delta\theta$, riscontrato attraverso la stima del tempo meteorologico della zona. La variazione nel tempo della temperatura sarà quindi calcolata con la (4.7), alla quale si aggiungerà uno sfasamento temporale cautelativo di 60 minuti. Nel caso di locali non occupati, come cantine, cassa scale, sottotetti, ma anche seconde abitazioni non utilizzate, potranno essere considerate le temperature riportate nella UNI 7357:1974, utilizzando i fattori di correzione in funzione delle medie esterne e della temperatura media dei locali interni.

L'umidità relativa può essere calcolata come eseguendo il bilancio dinamico del vapor d'acqua nel volume di calcolo, dove il flusso che attraversa gli elementi tecnici è dato dalla nota relazione:

$$\dot{m}_{va} = (p_{va,i} - p_{va,o}) \left/ \sum_{j=1}^n \frac{d_j}{\delta_{va,j}} \right., \quad (4.83)$$

avendo posto per n il numero di strati che compongono l'elemento, d lo spessore e $\delta_{va,j}$ la permeabilità al vapore, i cui valori sono tabellati⁹³.

Un'iterazione di cinque giorni consente di ottenere valori sufficientemente stabili per essere considerati rappresentativi delle condizioni termo-igrometriche delle unità ambientali, e quindi impiegati per il calcolo definitivo del discomfort igrotermico per la valutazione del livello atteso di benessere.

4.1.2.2 Variabili visive

I valori di irradianza stimati nel paragrafo precedente possono essere utilizzati anche per valutare l'illuminamento naturale: assumendo che l'emissività del sole e del cielo siano per semplicità pari a quella di fonti termo dinamicamente grigie, sfruttando il metamerismo dell'occhio umano, e fissandone la temperatura di colore con le relazioni⁹⁴:

⁹³ Cfr. UNI 10351, *op. cit.*.

⁹⁴ Le relazioni proposte sono elaborate in modo da essere coerenti con i dati raccolti in letteratura; in particolare valgono i seguenti valori:

Copertura	Sole		Cielo
	Mezzogiorno $m_a = 1.5$	Alba - Tramonto $m_a = 10$	
Sereno $f_{\overline{H}} = 1$	4862 K	2734 K	13537 K

$$T_{sun} = 6668 + \arctan[10f_{\frac{2.2}{H_b}}](1081\arctan[4.833 - 0.4833m_a] - 2668)$$

$$T_{sky} = 1.0119 \times 10^4 - \frac{7.3 \times 10^3 \arctan(10 - 20f_{\frac{1}{H_d}})}{\pi}, \quad (4.84)$$

è possibile determinarne la distribuzione spettrale impiegando la nota legge di Plank in combinazione con quella di Stefan - Boltzmann:

$$\partial_{\lambda} \Phi = \frac{\bar{H}_{ho}}{5.67 \times 10^{-8} T^4} \times \frac{3.741 \times 10^8}{\lambda^5 (e^{\frac{1.439 \times 10^4}{\lambda T}} - 1)}, \quad (4.85)$$

avendo posto λ pari alla lunghezza d'onda, misurata in μm . Calcolando la potenza per le componenti rosse ($\lambda_R = 0.75 \mu\text{m}$), verdi ($\lambda_G = 0.52 \mu\text{m}$) e blu ($\lambda_B = 0.48 \mu\text{m}$) si possono valutare le percentuali RGB come:

$$f_j = \frac{\partial_{\lambda,j} \Phi}{\partial_{\lambda,R} \Phi + \partial_{\lambda,G} \Phi + \partial_{\lambda,B} \Phi}, \quad j = \{R, G, B\}, \quad (4.86)$$

per la luce proveniente dal sole e dalla volta celeste, in base alle quali può stimarsi l'illuminamento delle componenti diretta e diffusa, pari a⁹⁵:

$$E_{j,ho} = 683 \bar{I}_{j,ho} (0.02481f_R + 0.716373f_G + 0.077928f_B), \quad j = \{b, d\}; \quad (4.87)$$

sostituendo quindi nelle relazioni da (4.49) a (4.55) i valori di $E_{b,ho}$ e $E_{d,ho}$ a $\bar{I}_{b,ho}$ e $\bar{I}_{d,ho}$, si ottengono gli illuminamenti sulle chiusure dell'edificio.

Per determinare il livello di luce naturale all'interno delle singole unità ambientali fornite di aperture finestrate occorre stimare le tre diverse quantità descritte nel § 2.2.1. L'illuminamento diretto eventualmente incidente sulla superficie interna è stimabile come:

$$E_1 = \begin{cases} 0, & \text{se } \gamma_{sun} \notin [-\gamma_{wd}, \gamma_{wd}] \cap \varphi_{sun} \notin [-\varphi_{wd}, \varphi_{wd}] \\ E_{b,ho} + E_{d,ho}, & \text{se } \gamma_{sun} \in [-\gamma_{wd}, \gamma_{wd}] \cup \varphi_{sun} \in [-\varphi_{wd}, \varphi_{wd}] \end{cases}, \quad (4.88)$$

dove, avendo indicato con γ_n l'azimut della normale uscente dalla parete su cui si trova l'elemento finestrato, con $Z_{sup,wd}$ e $Z_{inf,wd}$ la quota del filo superiore ed inferiore dell'apertura calcolato rispetto al pavimento, con d_{wd} la sua larghezza, e con A_{rm} la superficie dell'ambiente, si ha:

$$\pm \gamma_{wd} = \gamma_n \pm \arctan \frac{d_{wd}}{2(\sqrt{A_{rm}} + d_{wl})}$$

$$\varphi_{wd} = \arctan \frac{Z_{sup,wd} - 1}{\sqrt{A_{rm}} + d_{wl}}, \quad (4.89)$$

$$-\varphi_{wd} = \min \left\{ 0; \arctan \frac{Z_{inf,wd} - 1}{\sqrt{A_{rm}} + d_{wl}} \right\}$$

Parziale copertura			
$f_{\frac{1}{H}} = 0.5$	5269 K	3626 K	10119 K
Molto nuvoloso			
$f_{\frac{1}{H}} = 0.1$	6590 K	6500 K	6758 K

⁹⁵ La relazione consente di calcolare la potenza irradiata in lux in quanto impiega la funzione $\bar{y}[\lambda]$ dello spazio tristimolo CIE Observer 2° che rappresenta la sensibilità spettrale dell'occhio umano standard. In particolare i tre coefficienti 0.02481, 0.716373 e 0.077928 sono stati ottenuti come media aritmetica dei tre intervalli di lunghezza d'onda [0.77, 0.64], [0.64, 0.51], [0.51, 0.38].

La quantità di luce riflessa da pareti e soffitto proveniente dalla diffusione uniforme dell'illuminamento diretto sulla pavimentazione, concentrata nel suo baricentro, è valutata come⁹⁶:

$$E_2 = \frac{0.09A_{wd}E_b}{\pi} \left(\frac{Z_{rm}(\pi - 2\varphi_{rm})}{l_{ce}^3} + \frac{\varphi_{rm}\sqrt{A_{rm}}}{l_{wl}^3} \right); \quad (4.90)$$

dove l'illuminamento E_b è calcolato impiegando la (4.49) in combinazione con la (4.87), A_{rm} è l'area dell'unità ambientale, A_{wd} l'area dell'apertura, Z_{rm} l'altezza del soffitto, mentre φ_{rm} , l_{ce} e l_{wl} sono:

$$\begin{aligned} \varphi_{rm} &= 0.5 \left(\arctan \frac{2(Z_{rm} - 1)}{\sqrt{A_{st}}} + \arctan \frac{\sqrt{2}(Z_{rm} - 1)}{\sqrt{A_{st}}} \right) \\ l_{ce} &= Z_{rm} + \frac{A_{rm}}{12Z_{rm}} - \frac{A_{rm}^2}{576Z_{rm}^3} \\ l_{wl} &= \frac{21A_{rm} + 10Z_{rm}}{36\sqrt{A_{rm}}} \end{aligned} \quad (4.91)$$

L'aliquota di illuminamento originata dalla luce diffusa dalla volta celeste e riflessa dal terreno e dagli edifici circostanti direttamente incidente sulla superficie posta al centro della stanza è pari a:

$$E_3 = \frac{(E_{tot} - E_b)(Z_{sup,wd} - \max\{1; Z_{sup,wd}\})}{\pi \sqrt{(Z_{sup,wd} - \max\{1; Z_{sup,wd}\})^2 + (d_{wl} + 0.5\sqrt{A_{rm}})^2}}, \quad (4.92)$$

avendo inteso per d_{wl} lo spessore del muro di chiusura su cui si trova l'apertura ed E_{tot} 4.53 la quantità di luce valutata con la (4.54) tenuto conto della (4.87). La quantità di luce riflessa dalle pareti, proveniente dalla volta celeste, dal terreno e dalle facciate degli edifici, è stimata come:

$$\begin{aligned} E_4 &= \frac{0.6Z_{wd}(E_{tot} - E_b)}{\pi^2 \sqrt{Z_{wd}^2 + (d_{wl} + 0.5\sqrt{A_{rm}})^2}} \left(\frac{\varphi_{rm}}{2} \left(\arctan \frac{0.5\sqrt{A_{rm}} + d_{wd}}{0.5\sqrt{A_{rm}} + 2d_{wl}} - \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - \arctan \frac{0.5\sqrt{A_{rm}} + d_{wd}}{0.5\sqrt{A_{rm}}} \right) + \frac{\varphi_{rm}}{2} \arctan \frac{d_{wd}}{\sqrt{A_{rm}} + 2d_{wl}} + \right. \\ &\quad \left. + (2\pi - 4\varphi_{rm}) \arctan \frac{d_{wd}}{0.5\sqrt{A_{rm}} + 2d_{wl}} \right); \quad (4.93) \end{aligned}$$

Naturalmente l'illuminamento totale è dato dalla somma delle quattro componenti. Nel caso in cui l'ambiente non abbia un infisso esterno, si possono verificare le seguenti possibilità:

- sono presenti aperture verso altre unità illuminate dalla luce naturale: la valutazione si effettua considerando esclusivamente le aliquote 3 e 4 nelle quali al valore $\sqrt{A_{rm}}$ va sostituito $\sqrt{A_{rm,1}} + \sqrt{A_{rm,2}}$, mentre a $0.5\sqrt{A_{rm}}$ si sostituisce $0.5\sqrt{A_{rm,1}} + \sqrt{A_{rm,2}}$, dove il pedice 1 individua l'unità ambientale in cui si stima l'illuminamento, ed il 2 quello dove si

⁹⁶ Le distanze medie l_{ce} e l_{wl} sono state valutate sviluppando in serie di Taylor (del secondo grado) le funzioni distanza dei punti del soffitto e delle pareti dal baricentro del pavimento; si è poi applicato il teorema della media: gli integrali doppi di questi sviluppi, divisi per le superfici del soffitto e delle pareti hanno restituito i valori cercati.

trova la chiusura vetrata;

- sono presenti aperture verso altre unità che non hanno superfici trasparenti rivolte verso l'esterno: l'illuminamento è pari all'aliquota E_4 dell'ambiente confinante.

Gli illuminamenti così calcolati devono poi essere moltiplicati per i coefficienti di trasmissione τ relativi agli eventuali oscuramenti utilizzati (punti da A ad E) elencati nella Tabella 4-34; se l'infisso è chiuso, occorrerà considerare un secondo fattore di cornice del valore di 0.9.

4.1.2.3 Variabili uditive

Il livello di pressione sonora in un ambiente può essere di stinto tra la quantità di rumore che dall'esterno e dagli altri ambienti si trasmette attraverso chiusure e partizioni, e quello direttamente prodotto all'interno dell'unità ambientale. Il clima acustico consente di determinare su ogni fronte - e quindi su tutti gli elementi tecnici che sono in esso contenuti - la pressione dell'inquinamento acustico, che qui, per comodità, verrà considerato sempre della frequenza di 125 Hz; per individuare le sorgenti di rumore proveniente dalle altre unità ambientali - siano esse appartenenti o meno all'unità immobiliare oggetto della valutazione - si propone di impiegare i valori riportati nella Tabella 4-39, redatta rielaborando valori noti in letteratura.

Cl. densità	Liv. son.	Attrezzatura	Liv. son.	Hz
I	65 dB	Macchinari industriali	100 dB	125
II	60 dB	Esecuzione di musica amplificata	90 dB	1000
III	55 dB	Macchinari per produzione artigianale	80 dB	125
IV	50 dB	Uso di audiovisivi	65 dB	1000
V	45 dB	Uso di macchine da ufficio	55 dB	125

Tabella 4-39 Livello di pressione sonora dovuta alla presenza di utenti e all'impiego di attrezzature nei locali adiacenti

I rumori provenienti da fonti esterne subiscono una riduzione per effetto della trasmissione attraverso un componente solido; qui si converrà che il livello di pressione sonora che attraversa un sistema costituito da elementi diversi - come avviene ad esempio per una parete sulla quale si trova un infisso - è pari al valore massimo che si riscontra; nel caso di una partizione con un foro vuoto, il suono non subirà alcuna riduzione di potenza.

L'assorbimento che subisce un rumore aereo che attraversa un oggetto solido, come tipicamente accade quando il ricevente è all'interno di un ambiente chiuso⁹⁷, è funzione del *potere fonoisolante apparente* dell'elemento⁹⁸, che può essere valutato in via teorica grazie alla legge della massa⁹⁹:

$$R_{dir} \cong 20 \log \left[\frac{m}{A} fr \right] - 42.5, \quad (4.94)$$

dove A rappresenta la superficie laterale della chiusura. Se la sorgente sonora si trova all'interno di un ambiente chiuso, allora il rumore perde di di-

⁹⁷ In questo caso, il suono non può aggirare l'ostacolo come avviene nel caso di barriere fraposte tra la sorgente ed il ricevente, per cui la sensazione uditiva che ne deriva è dovuta esclusivamente alla trasmissione del suono attraverso il mezzo solido di separazione.

⁹⁸ Cfr. Allegato A del D.P.C.M. 5 dicembre 1997, *Determinazione dei requisiti acustici passivi degli edifici* e UNI EN ISO 140-5:2000, *Acustica. Misurazione dell'isolamento acustico in edifici e di elementi di edificio. Misurazioni in opera dell'isolamento acustico per via aerea degli elementi di facciata e delle facciate*.

⁹⁹ Per valori tipici di impedenza acustica caratteristica dell'aria, ed incidenza perpendicolare del rumore alla superficie.

rezionalità per assumere le caratteristiche di un campo diffuso. In questo caso, il livello sonoro limite di pressione che si rileva è pari a:

$$L_p \cong L_w + 10 \log \frac{4}{A}, \quad (4.95)$$

dove L_w rappresenta il livello di potenza sonora ed A la superficie dell'ambiente. Il potere fonoisolante di un elemento che separa un campo sonoro uniforme dall'ambiente di ascolto, in virtù della mancanza di direzionalità della sorgente può essere valutato come:

$$R_{dif} \cong R_{dir} - 5.5. \quad (4.96)$$

Le relazioni di cui sopra consentono di stimare il livello di pressione sonora presente nei diversi ambienti e, in ultimo, di disporre dei dati necessari ad eseguire la stima del discomfort uditivo.

4.1.3 Dati relativi all'utente

4.1.3.1 Caratteristiche fisiche medie

Un parametro estremamente importante nella valutazione delle condizioni di comfort termo igrometrico è la superficie corporea che può essere determinata tramite la relazione¹⁰⁰:

$$A_{sk} = 0.202 \times W^{0.425} \times Z^{0.752}, \quad (4.97)$$

dove W è il peso determinato con la (4.40), e Z l'altezza; conoscendo quindi il peso e l'altezza medi in funzione dell'età, è possibile utilizzare la (4.97) per stabilire l'estensione media della pelle per ogni individuo.

Sempre funzione dell'età, il naturale decadimento dell'udito ed il conseguente aumento della soglia audiometrica media è dato dalla relazione¹⁰¹:

$$\Delta L_{med}[Y] = f_Y (Y - 18)^2, \quad (4.98)$$

che restituisce la variazione in dB della diminuzione del valore mediano per un'età compresa tra 18 e 70 anni, dove Y è l'età in anni e f_Y un parametro funzione dell'età, del sesso e della frequenza della sorgente sonora, tabellato per bande di un mezzo di ottava; in questo lavoro verranno considerati soltanto segnali di 125 e 1000 Hz, rappresentativi dei rumori e del parlato, per cui f_Y potrà assumere alternativamente i valori di 0.0030 e 0.0040, indifferentemente dal sesso dell'ascoltatore.

4.1.3.2 Caratteristiche metaboliche e resistenza termica dell'abbigliamento

Dall'analisi delle tabelle disponibili nella norma¹⁰², che offre quattro differenti metodologie elencate per complessità e precisione crescente, è stato possibile mettere a punto una tabella che elenca il consumo metabolico in funzione di tre principali categorie: attività mentale, fisica e postura¹⁰³, alle quali si aggiunge il valore costante del metabolismo basale (40 W m⁻²). Questo consente di attribuire ad ogni attività elementare il suo particolare consumo e-

¹⁰⁰ La norma considera le seguenti condizioni standard: età 30 anni; per un uomo, $W = 70$ kg, $Z = 1.75$ m, $A_{sk} = 1.8$ m²; per una donna, $W = 60$ kg, $Z = 1.70$, $A_{sk} = 1.6$ m². Il massimo lavoro è pari a $q_{M,max} = (f - 0.22Y)W^{0.666}$, dove è pari a 41.7 per gli uomini, e 35.0 per le donne. Cfr. UNI EN ISO 8996, *op. cit.*

¹⁰¹ Cfr. UNI EN ISO 7029, *op. cit.*

¹⁰² Cfr. UNI EN ISO 8996, *op. cit.*

¹⁰³ Per i diversi valori, cfr. Tabella 2-13.

nergetico, come riporta la Tabella 4-40. Le diverse attività – di cui è riportato solo il codice – sono descritte per esteso nella Tabella 3-4.

Cod.	Attività metabolica			Tot.	Vestiaro	
	Att. mentale	Postura	Att. fisica		min	max
001	Cosciente	In piedi	Nessuna	70	0.05	0.25
002	Cosciente	In piedi	Mani, leggero	80	0.05	0.17
003	Moderata	Seduto	Nessuna	60	0.05	0.17
004	Moderata	In piedi	Mani, medio	90	0.05	0.17
005	Moderata	In piedi	Mani, leggero	85	0.05	0.17
006	Media	In piedi	Mani, leggero	95	0.05	0.17
007	Media	In piedi	Mani, leggero	95	0.05	0.17
008	Moderata	In piedi	Mani, medio	90	0.05	0.17
009	Cosciente	Piegato	Mani, medio	90	0.05	0.17
010	Cosciente	Seduto	Mani, medio	70	0.05	0.17
011	Cosciente	Seduto	Nessuna	55	0.05	0.17
012	Moderata	Seduto	Nessuna	60	0.05	0.17
013	Moderata	Seduto	Nessuna	60	0.05	0.17
014	Moderata	Seduto	Mani, leggero	70	0.05	0.17
015	Cosciente	Seduto	Mani, leggero	65	0.05	0.17
016	Moderata	Piegato	Mani, pesante	105	0.05	0.17
017	Incosciente	Steso	Nessuna	40	0.05	0.20
018	Media	Steso	Un braccio, med.	120	0.05	0.10
019	Cosciente	In piedi	Mani, medio	85	0.00	0.17
020	Incosciente	Steso	Nessuna	40	0.05	0.17
021	Moderata	In piedi	Mani, medio	90	0.05	0.17
022	Cosciente	In piedi	Mani, leggero	80	0.00	0.00
023	Cosciente	In piedi	Mani, leggero	80	0.00	0.08
024	Moderata	Seduto	Mani, medio	75	0.05	0.17
025	Semicosc.	Seduto	Nessuna	45	0.05	0.10
026	Cosciente	Piegato	Mani, leggero	85	0.05	0.17
027	Cosciente	In piedi	Mani, medio	85	0.05	0.15
028	Cosciente	In piedi	Mani, medio	85	0.05	0.17
029	Moderata	In piedi	Mani, medio	90	0.05	0.17
030	Media	Seduto	Mani, leggero	80	0.05	0.17
031	Elevata	Seduto	Mani, leggero	90	0.05	0.17
032	Moderata	In piedi	Un braccio, legg.	105	0.05	0.17
033	Moderata	In piedi	Un braccio, med.	125	0.05	0.15
034	Elevata	Seduto	Mani, leggero	90	0.05	0.17
035	Media	Seduto	Nessuna	70	0.05	0.17

Tabella 4-40 Attività elementari, tasso metabolico e resistenza termica del vestiario

Dipendente dell'attività svolta e delle condizioni climatiche, la resistenza termica del vestiario è funzione del peso dell'abito e della percentuale di corpo coperto¹⁰⁴, mentre la qualità della stoffa entra marginalmente nella valutazione; per i capi di uso comune, è disponibile una tabella dove sono riportati i valori utili per il calcolo dei singoli elementi, considerando che la resistenza totale R_{cl} è pari alla somma di quelle parziali (Tabella 4-41). Nel caso di un sistema di valutazione adattivo, piuttosto che definire un unico valore di resistenza, si preferisce indicarne uno minimo ed uno massimo, in modo da poter simulare la possibilità da parte dell'utente di modificare il proprio abbigliamento in funzione delle caratteristiche igrotermiche

¹⁰⁴ Cfr. UNI EN ISO 9920:2007, *op. cit.*. L'isolamento termico viene spesso valutato in clo, dove sussiste la relazione $1 \text{ clo} = 0.155 \text{ m}^2 \text{ K W}^{-1}$.

dell'ambiente in cui si trova. Nella Tabella 4-40 sono riportati tali valori, stabiliti per le attività elementari note in letteratura.

<i>Capo di abbigliamento</i>	$m^2K W^{-1}$	<i>Capo di abbigliamento</i>	$m^2K W^{-1}$
Abbigliamento intimo		Abito leggero	0.031
Slip	0.005	Abito invernale	0.062
Maglia a maniche corte	0.014	Maglioni	
Maglia a maniche lunghe	0.019	Gilet	0.017
Camice		Maglione leggero	0.031
Leggera, a maniche corte	0.023	Maglione pesante	0.054
Leggera, a maniche lunghe	0.031	Giacche	
Di flanella, a maniche lunghe	0.047	Giacca estiva	0.039
Pantaloni		Giacca invernale	0.054
Corti	0.009	Accessori	
Leggeri	0.031	Calzini	0.003
Normali	0.039	Calzini pesanti lunghi	0.016
Abiti – gonne		Calze di nylon	0.005
Gonna leggera, estiva	0.023	Scarpe con suola sottile	0.003
Gonna pesante, invernale	0.039	Scarpe con suola spessa	0.006

Tabella 4-41 Resistenza termica dei singoli capi di abbigliamento

4.2 Valutazione del comfort

4.2.1 Discomfort termo-igrometrico

Numerosi studi¹⁰⁵ hanno consentito di determinare l'equazione di bilancio energetico tra uomo ed ambiente, espresso simbolicamente dalla relazione¹⁰⁶:

$$q_M - q_W = q_{sk} + q_{br} + q_{st} = (q_{sk,cv} + q_{sk,r} + q_{sk,lt}) + (q_{br,cv} + q_{br,lv}) + q_{st} \quad (4.99)$$

dove il metabolismo netto per unità di area $q_M - q_W$, pari all'energia termica prodotta dal corpo durante l'attività metabolica meno il lavoro, deve essere uguale alla somma delle potenze termiche disperse attraverso la pelle q_{sk} ed il respiro q_{br} , più una quantità accumulata o ceduta all'ambiente dal corpo q_{st} denominata *stress termico*. Le aliquote di potenza dispersa sono a loro volta somma delle quantità scambiate sotto forma di calore sensibile (pedici *cv* ed *r* per convezione e irraggiamento) e latente (pedice *lt* per scambio evaporativo).

Partendo da studi precedenti¹⁰⁷, Fanger ha verificato che, in condizioni non lontane dall'annullamento dello stress termico (*omoterma*), la sensazione *generale* di comfort si raggiunge per determinati valori di temperatura della pelle e di flusso termico per unità di area, dovuto all'evaporazione del sudore secreto dal sistema di regolazione del corpo, indicati rispettivamente dalle relazioni¹⁰⁸:

$$\theta_{sk,req} = 35.7 - 0.0275(q_M - q_W) \quad (4.100)$$

$$\dot{q}_{rsw,req} = 0.42(q_M - q_W - 58.15) \quad (4.101)$$

per le quali, all'aumentare dell'attività metabolica netta per unità di area, le $\theta_{sk,req}$ e $\dot{q}_{rsw,req}$ diminuiscono e crescono rispettivamente. Inserendo le (4.100) e

¹⁰⁵ Cfr. ASHRAE, *Handbook - Fundamentals*, 2005, pag. 8.2

¹⁰⁶ Ivi pag. 8.3.

¹⁰⁷ Già nel 1927 Yaglou individuò la relazione esistente tra temperatura della pelle e sensazione di comfort, successivamente confermati da altri studi più completi, che ne fissarono il valore "ottimale" a 33÷34°C, per qualsiasi tipologia di vestiario ed in condizioni di riposo.

¹⁰⁸ Cfr. P. Fanger, *Calculation of thermal comfort: Introduction of a basic equation*, ASHRAE Transaction, 1967).

(4.101) nella (4.99), è possibile calcolare lo stress termico q_{st} in funzione di quattro variabili ambientali (temperatura dell'aria, temperatura media radiante, pressione parziale del vapore d'acqua, velocità dell'aria) e due soggettive (attività metabolica e resistenza termica dell'abbigliamento). Se il bilancio energetico è omotermo, il soggetto è in condizioni neutre, in caso contrario, è in uno stato di ipotermia ($q_{st} < 0$) o ipertermia ($q_{st} > 0$). Fanger ha determinato il rapporto esistente tra la percezione più probabile avvertita dai soggetti, espressa attraverso una *scala di sensazione termica* a sette punti¹⁰⁹, e lo stress termico q_{st} calcolato per $\theta_{sk} = \theta_{sk,req}$ e $q_{rsw} = q_{rsw,req}$ tramite la relazione¹¹⁰:

$$PMV = (0.303e^{-0.036q_M} + 0.028)q_{st} \quad (4.102)$$

dove PMV è la specificazione di prestazione detta *voto medio previsto*¹¹¹. L'indice è adottato dalla norma europea¹¹² ed americana¹¹³ per la valutazione del comfort termo igrometrico negli ambienti interni, dove sussistono le condizioni di stazionarietà e di prossimità all'omotermia¹¹⁴. Per poter eseguire la valutazione del PMV la norma mette a disposizione una routine in basic che, applicata ad un foglio di calcolo - e riscritta per VBATM - viene proposta nella versione sottostante¹¹⁵.

```
' PMV Macro
Sub PMV ()
'-----Input dei dati-----
CLO = Worksheets ("inp").Range ("c4")
MET = Worksheets ("inp").Range ("c5")
WME = Worksheets ("inp").Range ("c6")
```

¹⁰⁹ I punti sono: +3, molto caldo; +2, caldo; +1, leggermente caldo; 0, neutro; -1, leggermente freddo, -2, freddo; -3, molto freddo.

¹¹⁰ Studi condotti su circa 1300 individui hanno consentito a Fanger l'elaborazione del suo modello di comportamento, stimato statisticamente (cfr. P. Fanger, *Thermal Comfort*, Technical Press, Copenhagen 1970). Le sensazioni di caldo e freddo sono sostanzialmente invariabili nel tempo (deviazione standard di soli 0.6°C), per distribuzione di età (studi condotti dal 1967 al 1972 su 1252 individui di età compresa tra 21 ed 84 anni, con una deviazione standard di 0.5°C), per tipo di clima (studi dal 1967 al 1972 su 1056 individui in diverse zone climatiche del mondo, con una deviazione standard di 0.5°C), sesso (studi dal 1966 al 1972 su 1008 individui, la metà di ogni sesso, con scarto massimo di 0.2°C), ritmo circadiano (cfr. O. Östberg e A. Nicholl, *The preferred thermal conditions for 'morning' and 'evening' types of subjects during day and night*, Build International, 1973) e stagionale (cfr. P. McNall et al., *Seasonal variation in comfort conditions for college-age persons in the Middle West*, ASHRAE Transactions, 1968). Per un approfondimento, cfr. P. Fanger, *Assessment of man's thermal comfort in practice*, *British Journal of Industrial Medicine*, London 1973, e ASHRAE, *Handbook - Fundamentals*, op. cit., cap. 8.

¹¹¹ L'indice PPD è la specificazione che consente di calcolare la *percentuale prevista di insoddisfatti* grazie alla distribuzione: $PPD = 100 - 95e^{-(0.003353 \times PMV^4 + 0.2179 \times PMV^2)}$.

¹¹² Cfr. UNI EN ISO 7730:2006, op. cit..

¹¹³ Cfr. ASHRAE Standard 55, op. cit..

¹¹⁴ Il limite di applicabilità è: attività metabolica compresa tra 46 e 232 W/m², temperatura dell'aria tra 10 e 30°C; temperatura media radiante tra 10 e 40°C, resistenza termica degli abiti tra 0 e 0.310 m²K/W, pressione parziale del vapore d'acqua tra 0 e 2700 Pa, umidità relativa tra 30 e 70%, velocità dell'aria tra 0 e 1 m/s. Cfr. UNI EN ISO 7730, op. cit..

¹¹⁵ La routine è contenuta in UNI EN ISO 7730, op. cit.; purtroppo nella versione in stampa sono presenti diversi errori di trascrizione: la versione qui proposta ne è priva. In particolare le celle C4-8 contengono i valori di resistenza termica del vestiario [clo], tasso metabolico totale e lavoro meccanico [met], temperatura dell'aria e radiante [°C], velocità dell'aria [m s⁻¹], umidità relativa [%].

```

TA = Worksheets("inp").Range("c7")
TR = Worksheets("inp").Range("c8")
VEL = Worksheets("inp").Range("c9")
RH = Worksheets("inp").Range("c10")
'---Pressione di saturazione del vapore-----
FNSP = Exp(16.6536 - 4030.183 / (TA + 235))
'-----Pressione parziale del vapore-----
PA = RH * 10 * FNSP
Sheets("inp").Range("e10") = PA
'-----Conversione delle variabili-----
ICL = 0.155 * CLO
Sheets("inp").Range("e4") = ICL
M = 58.15 * MET
Sheets("inp").Range("e5") = M
W = 68.15 * WME
Sheets("inp").Range("e6") = W
'-----Calcolo del metabolismo netto-----
MW = M - W
    If ICL < 0.078 Then
        FCL = 1 + 1.29 * ICL
    Else
        FCL = 1.05 + 0.645 * ICL
    End If
'--Coefficiente di trasferimento per convez. forzata-----
HCF = 12.1 * VEL ^ 0.5
'-----Temperature in Kelvin-----
TAA = TA + 273
Sheets("inp").Range("e7") = TAA
TRA = TR + 273
Sheets("inp").Range("e8") = TRA
'----Calcolo della temperatura degli abiti TCLA-----
TCLA = TAA + (35.5 - TA) / (3.5 * (6.45 * ICL + 0.1))
P1 = ICL * FCL
P2 = P1 * 3.96
P3 = P1 * 100
P4 = P1 * TAA
P5 = 308.7 - 0.028 * MW + P2 * (TRA / 100) ^ 4
XN = TCLA / 100
XF = XN
N = 0
EPS = 0.0015
For N = 1 To 150
    XF = (XF + XN) / 2
    HCN = 2.38 * Abs(100 * XF - TAA) ^ 0.25
        If HCF > HCN Then
            HC = HCF
        Else
            HC = HCN
        End If
    XN = (P5 + P4 * HC - P2 * (XF ^ 4)) / (100 + P3 * HC)
Next N
TCL = 100 * XN - 273
Sheets("inp").Range("e11") = TCL
'---Scambio della pelle per diffusione-----
HL1 = 3.05 * 0.001 * (5733 - 6.99 * MW - PA)
Sheets("inp").Range("h7") = HL1
'----qsk,lt---Scambio della pelle per evaporazione sudore----
If MW > 58.15 Then
    HL2 = 0.42 * (MW - 58.15)
Else
    HL2 = 0
End If
Sheets("inp").Range("h6") = HL2
'----qbr,lt---Scambio termico per evaporazione del respiro---
HL3 = 1.7 * 0.00001 * M * (5867 - PA)
Sheets("inp").Range("h9") = HL3
'----qbr,cv---Scambio termico per convezione del respiro----
HL4 = 0.0014 * M * (34 - TA)
Sheets("inp").Range("h8") = HL4
'----qsk,r---Scambio attraverso la pelle per irraggiamento--
HL5 = 3.96 * FCL * (XN ^ 4 - (TRA / 100) ^ 4)
Sheets("inp").Range("h5") = HL5
'----qsk,cv---Scambio attraverso la pelle per convezione----
HL6 = FCL * HC * (TCL - TA)
Sheets("inp").Range("h4") = HL6
'-----Thermal sensation to skin tran coef-----
TS = 0.303 * Exp(-0.036 * M) + 0.028
Sheets("inp").Range("h10") = MW - HL1 - HL2 - HL3 - HL4 - HL5
- HL6

```

```

PMVval = TS * (MW - HL1 - HL2 - HL3 - HL4 - HL5 - HL6)
PPDval = 100 - 95 * Exp(-0.3353 * PMVval ^ 4 - 0.2179 *
PMVval ^ 2)
Sheets("inp").Range("C14") = PMVval
End Sub

```

In ambienti freddi¹¹⁶, risolvendo la (4.99), in condizioni di omotermia e imponendo le (4.100) e (4.101), in funzione della resistenza termica degli abiti, è possibile determinare l'indice di isolamento del vestiario richiesto, o I_{req} ; ponendo infatti $q_{sk,cv} + q_{sk,r} = R_{cl} (\theta_{sk} - \theta_{cl})$, dove R_{cl} e θ_{cl} sono la resistenza termica e la temperatura superficiale del vestiario, è possibile ottenere¹¹⁷:

$$I_{req} = \frac{\theta_{sk,req} - \theta_{cl}}{q_M - q_W - q_{sk,lt} - q_{res,lt} - q_{res,cv}}$$

Nel caso in cui la resistenza degli abiti non sia adeguata alle condizioni (ipotermia), si calcola la *durata limite di esposizione*, o *DLE*, tramite la relazione:

$$DLE = \frac{q_{lim}}{\dot{q}_S}, \quad (4.103)$$

dove il valore q_{lim} rappresenta la massima quantità di energia per unità di superficie che può essere dispersa da un soggetto, ed è pari a 40 W h/m², da cui si ricava che l'indicatore *DLE* esprime il tempo massimo in ore. Anche qui la norma mette a disposizione una routine di calcolo in basic che consente di risolvere le equazioni non lineari che sottendono il problema, e che può facilmente essere convertita in altri linguaggi di programmazione.

```

PROGRAM IREQ_1_4;
{ Sviluppato da Ingvar Holm.r ed H.kan Nilsson, 1990 Le ultime
modifiche sono state apportate da Ingvar Holm.r ed H.kan
Nilsson, 28-07-1992}
USES SANE,MemTypes,QuickDraw,OSIntf; { USES Crt; If compiled
on a PC }
VAR answer:Char;
stop:Boolean;
choice:Integer;
dummy:LongInt;
PROCEDURE RequiredInsulation;
VAR M,Ta,Tr,va,rh,Tsk,wetness.Tex,Pex,
Psk,fcl,W,vares,vp,Icl,Iclr,Pa,Tcl,hc,hr,
IREQ,Ia,Rt,factor,Balance,R,C,Hres,
E,S,DI,E,ArAdu,Ic.lCorr: Real;
slask,worktype:Char;
calculation:Integer;
BEGIN
answer:='Y';
WHILE (answer='Y') OR (answer='y') DO BEGIN
Write(Chr(12));
WriteLn(CALCOLO DELL'ISOLAMENTO RICHIESTO, IREQ'); WriteLn;
Write(Metabolismo energetico (W/m2) '); ReadLn(M);
Write('Potenza meccanica (W/m2) '); ReadLn(W);
Write('Temperatura dell'aria (jC); ReadLn(Ta);
Write('Temperatura media radiante (jC); ReadLn(Tr);
Write('Velocit. dell'aria (m/s); ReadLn(va);
Write('Umidit. relativa (%)''); ReadLn(rh);
Write('Isolamento intrinseco dell'abbigliamento disponibile,
Icl (clo)
ReadLn(Icl);WriteLn;

```

¹¹⁶ Valori di temperatura compresi tra 0 e 10°C individuano gli *ambienti freddi*; valori inferiori caratterizzano gli *ambienti severi freddi*. Cfr. UNI EN ISO 11079, *op. cit.*.

¹¹⁷ *Ivi.*

```

WriteLn('IN ELABORAZIONE !'); WriteLn;
{ Calcolo di Iclr (m2K/W) da Icl (clo) }
Icl:=Icl*0.155;
IclCorr:=1;
IF (M>58) AND (M<=100) THEN
IclCorr:=0.9;
IF M>100 THEN
IclCorr:=0.8;
Iclr:=Icl*IclCorr;
calculation:=0;
REPEAT
calculation:=calculation+1;
{Calcolo di Tsk (*C) e della percentuale di pelle bagnata
(%)}
CASE calculation OF
1:BEGIN( For IREQneutral, DLEneutral ! )
Tsk:=35.7-0.0285*M;
wetness:=0.001*M;
END;
2:BEGIN( For IREQminimal, DLEminimal ! )
Tsk:=30;
wetness:=0.06;
END;
END;
{Calcolo di Tex (;C) e Pex, Psks, Pa (Pa) }
Tex:=29+0.2*Ta;
Pex:=0.1333*Exp(18.6686-4030.183/(Tex+235));
Psks:=0.1333*Exp(18.6686-4030.183/(Tsk+235));
Pa:=(rh/100)*0.1333*Exp(18.6686-4030.183/(Ta+235));
{Calcolo della velocit. relativa (vares = var(es)) (m/s)}
{Stazionario}
vares:= va+0.0052*(M-58);
{Calcolo di hc (W/m2;C)}
IF (vares<=1) THEN
hc:=3.5+5.2*vares
ELSE
hc:=8.7*Exp(0.6*Ln(vares));
{Calcolo di IREQ (m2;C/W), Rt (m2kPa/W), fcl (n.d.), hr W/m2;C
with stepwise iteration}
IREQ:=0; hr:=0; ArAdu:=0.77; factor:=1; ( Initial values! )
REPEAT
Ia:=1/(hc+hr);
fcl:=1+1.97*IREQ;
Rt:=(0.06/0.38)*(Ia/fcl+IREQ);
E:=wetness*(Psks-Pa)/Rt;
Hres:=1.73E-2*M*(Pex-Pa)+1.4E-3*M*(Tex-Ta);
Tcl:=Tsk-IREQ*(M-W-E-Hres);
hr:=5.67E-8*0.95*ArAdu*
(Exp(4*Ln(273+Tcl)-Exp(4*Ln(273+Tr)))/(Tcl-Tr);
R:=fcl*hr*(Tcl-Tr);
C:=fcl*hc*(Tcl-Ta);
Balance:=M-W-E-Hres-R-C;
IF (Balance>0) THEN BEGIN
IREQ:=IREQ-factor;
factor:=factor/2;
END
ELSE BEGIN
IREQ:=IREQ+factor;
END;
UNTIL (Abs(Balance)<0.1);
IREQ:=(Tsk-Tcl)/(R+C);
{*** Calcolo dei DLEneutro e DLEminimo *** }
{Calcolo di S (W/m2), Rt (m2kPa/W), fcl (n.d.), hr W/m2;C

```

```

per iterazione }
Tcl:=Ta; hr:=0; S:=0.01; ArAdu:=0.77; factor:=100; ( Valori
iniziali !}
REPEAT
Ia:=1/(hc+hr);
fcl:=1+1.97*Iclr;
Rt:=(0.06/0.38)*(Ia/fcl+Iclr);
E:=wetness*(Psks-Pa)/Rt;
Hres:=1.73E-2*M*(Pex-Pa)+1.4E-3*M*(Tex-Ta);
Tcl:=Tsk-Iclr*(M-W-E-Hres-S);
hr:=5.67E-8*0.95*ArAdu*
(Exp(4*Ln(273+Tcl)-Exp(4*Ln(273+Tr))/(Tcl-Tr));
R:=fcl*hr*(Tcl-Tr);
C:=fcl*hc*(Tcl-Ta);
Balance:=M-W-E-Hres-R-C-S;
IF (Balance>0) THEN BEGIN
S:=S+factor;
factor:=factor/2;
END
ELSE BEGIN
S:=S-factor;
END;
UNTIL (Abs(Balance)<0.1);
DLE:=-40/S;
CASE calculation OF
1:BEGIN
WriteLn('Isolamento Richiesto, IREQneutro (clo)',
(IREQ/0.155):4:2);
WriteLn('Isolamento intrinseco raccomandato da tabelle, Icl
(clo)',
(IREQ/IclCorr/0.155):3:1);
IF (S>-5) TREN BEGIN
WriteLn('Durata limite di esposizione, DLEneutro > 8 ore !');
WriteLn('ELABORAZIONE ERRATA ! Iclr ^3 IREQ');
END
ELSE
WriteLn('Durata limite di esposizione, DLEneutro (ore)
DLE:4:2);
WriteLn;
END;
2: BEGIN
WriteLn('Isolamento Richiesto, IREQminimo (clo)
(IREQ/0.155):4.2);
WriteLn('Isolamento intrinseco raccomandato da tabelle, Icl
(clo)
(IREQ/0.155):3:1);
IF (S>-5) THEN BEGIN
WriteLn(Durata limite di esposizione, DLEminimo > 8 ore !');
WriteLn('ELABORAZIONE ERRATA ! Iclr ^3 IREQ');
END
ELSE
WriteLn('Durata limite di esposizione, DLEminimo (ore)
DLE:4:2);
WriteLn;
END;
END;
UNTIL (calculation>1);
Write('Altra elaborazione (Y/N) ? '); ReadLn(answer); END;
END;
END;
END;
PROCEDURE DurationLimitedExposure;

```

```

VAR M,Ta,Tr,va,rh,Tsk,wetness,Tex,Pex,
Psk,fc1,W,vares,vp,Pa,Tcl,
hc,hr,Iclr,Icl,Ia,Rt,factor,Balance,R,C,Hres,
E,S,DLE,ArAdu,IclCorr: Real;
slask,worktype:Char;
calculation:Integer;
BEGIN
answer:='tyl';
WHILE(answer='Y') OR (answer='y') DO BEGIN
calculation:=0;
REPEAT
calculation:=calculated+1;
IF (calculation=1) OR (calculation=3) THEN BEGIN
Write(Chr(12));
CASE calculation OF
1:WriteLn('CALCOLO DELLA DURATA LIMITE DI ESPOSIZIONE,
DLE');
3:WriteLn('CALCOLO DEL TEMPO DI RECUPERO, RT);
END;
WriteLn;
Write('Metabolismo energetico (W/m2) '); ReadLn(M);
Write('Potenza meccanica (W/m2) '); ReadLn(W);
Write('Temperatura dell'aria (°C); ReadLn(Ta);
Write('Temperatura media radiante (°C); ReadLn(Tr);
Write('Velocit. dell'aria (m/s); ReadLn(va);
Write('Umidit. relativa'); ReadLn(rh);
Write('Isolamento intrinseco dell'abbigliamento disponibile,
Icl (clo)
ReadLn(Icl);WriteLn;
WriteLn('IN ELABORAZIONE !'); WriteLn;
{Calcolo di Iclr (m2K/W) da Icl (clo)}
Icl:=Icl*0.155;
IclCorr:=1;
IF (M>58) AND (M<=100) THEN
IclCorr:=0.9;
IF M>100 THEN
IclCorr:=0.8;
Iclr:=Icl*IclCorr;
END;
{ Calcolo di Tsk (°C) e della percentuale di pelle bagnata
(%) }
CASE calculation OF
1,3:BEGIN{ For DLEneutral, RTneutral! }
Tsk:=35.7-0.0285*M;
wetness:=0.001*M;
END;
2,4:BEGIN( For DLEminimal, RTminimal ! )
Tsk:=30;
wetness:=0.06;
END;
END;
{Calcolo di Tex (°C) e Pex,Psk,Pa (Pa) }
Tex:=29+0.2*Ta;
Pex:=0.1333*Exp(18.6686-4030.183/(Tex+235));
Psk:=0.1333*Exp(18.6686-4030.183/(Tsk+235));
Pa:=(rh/100)*0.1333*Exp(18.6686-4030.183/(Ta+235));
{ Calcolo della velocit. relativa (vares = var(es)) (m/s) }
{Stazionario}
vares:=va+0.0052*(M-58);
{Calcolo di hc (W/m2°C)}
IF (vares<=1) THEN
hc:=3.5+5.2*vares
ELSE

```

```

hc:=8.7*Exp(0.6*Ln(vares));
{Calcolo di S (W/m2), Rt (m2kPa/W), fcl (n.d.), hr W/m2;C
per iterazione }
Tcl:=Ta; hr:=0; S:=0.01; ArAdu:=0.77; factor:=100; ( Valori
iniziali !}
REPEAT
Ia:=1/(hc+hr);
fcl:=1+1.97*Iclr;
Rt:=(0.06/0.38)*(Ia/fcl+Iclr);
E:=wetness*(Psks-Pa)/Rt;
Hres:=1.73E-2*M*(Pex-Pa)+1.4E-3*M*(Tex-Ta);
Tcl:=Tsk-Iclr*(M-W-E-Hres-S);
hr:=5.67E-8*0.95*ArAdu*
(Exp(4*Ln(273+Tcl))-Exp(4*Ln(273+Tr)))/(Tcl-Tr);
R:=fcl*hr*(Tcl-Tr);
C:=fcl*hc*(Tcl-Ta);
Balance:=M-W-E-Hres-R-C-S;
IF (Balance>0) THEN BEGIN
S:=S+factor;
factor:=factor/2;
END
ELSE BEGIN
S:=S-factor;
END;
UNTIL (Abs(Balance)<0.1);
DLE:=-40/S;
CASEcalculation OF
1:BEGIN
IF (S>-5) THEN BEGIN
WriteLn('Durata limite di esposizione, DLEneutro > 8 ore !');
WriteLn('ELABORAZIONE ERRATA ! Iclr ^3 IREQ');
END
ELSE
WriteLn('Durata limite di esposizione, DLEneutro (ore)
DLE:4:2);
END;
2:BEGIN
IF (S>-5) THEN BEGIN
WriteLn('Durata limite di esposizione,DLEminimo > 8 ore !');
WriteLn('ELABORAZIONE ERRATA ! Iclr ^3 IREQ');
END
ELSE
WriteLn('Durata limite di esposizione,DLEminimo (ore)
DLE:4:2);
Write(Vuoi calcolare il tempo di recupero, RT (Y/N) ?');
ReadLn(answer);
END;
3:BEGIN
IF (DLE>0) THEN BEGIN
WriteLn('ELABORAZIONE ERRATA ! (RTneutro)');
WriteLn('Il recupero non □ possibile. ');
WriteLn('Il valore dell'accumulo nel corpo □ negativo. ');
END
ELSE
WriteLn('Tempo di recupero (in',Ta:4:1,', 'iC), RTneutro (ore),
Abs(DLE):4:2);
END;
4:BEGIN
WriteLn;
IF (DLE>0) THEN BEGIN
WriteLn('ELABORAZIONE ERRATA ! (RTminimo)');
WriteLn('Il recupero non □ possibile. ');

```

```

WriteLn('Il valore dell'accumulo nel corpo □ negativo. ');
END
ELSE
WriteLn('Tempo di recupero (in',Ta:4:1,';C), RTminimo (ore),
Abs(DLE):4:2);
END;
END;
UNTIL (calculation>3) OR (answer='N') OR (answer='n');
WriteLn;
Write('Altra elaborazione (Y/N) ?
ReadLn (answer);
END;
END;
PROCEDURE WindChillIndex;
VAR vares,Ta,WCI,Tch:Real;
BEGIN
answer:='y'
WHILE (answer='Y') OR (answer='y') DO BEGIN
Write(Chr(12));
WriteLn('CALCOLO DEL WIND CHILL INDEX, WCI'); WriteLn;
Write('Velocit. relativa dell'aria (m/s); ReadLn(vares);
Write('Temperatura dell'aria (;C)'); ReadLn(Ta); WriteLn;
WCI:=(10.45+10*sqrt(vares)-vares)*(33-Ta);
Tch:=33-WCI/22;
WriteLn('WCI ',WCI:4:0);
WriteLn('Temperatura di chilling,Tch (OC) ',Tch:4:0); Wri-
teLn;
Write('Altra elaborazione (Y/N) ? ');
ReadLn(answer);
END;
END;
{ Main program}
BEGIN
Stop:=False;
REPEAT
Write(Chr(12)) { Clears the screen on both PC and Mac }
GoToXY(10,1);
Write (' CODICE PER IL CALCOLO DELL'ISOLAMENTO
DELL'ABBIGLIAMENTO RICHIESTO
(IREQ), ');
GoToXY(10,2);
Write('DURATA LIMITE DI ESPOSIZIONE (DLE),TEMPO DI RECUPERO
(RT) AND');
GoToXY(30,3);
Write('WIND CHILL INDEX (WCI)');
GoToXY(18,5);
Write('(920117 INGVAR HOLM.R HÖKAN NILSSON, v 1.04)');
GoToXY(37,8); WriteLn('MENU')
GoToXY(16,10); WriteLn('1. CALCOLO DELL'ISOLAMENTO RICHIESTO,
IREQ E');
GoToXY(16,11); WriteLn(' DELLA DURATA LIMITE DI ESPOSIZIONE,
DLE');
GoToXY(16,12); WriteLn('2. CALCOLO DELLA DURATA LIMITE DI E-
SPOSIZIONE, DLE
AND');
GoToXY(16,13); WriteLn('* DEL TEMPO DI RECUPERO, RT);
GoToXY(16,14); WriteLn('3. CALCOLO DEL WIND CHILL INDEX,
WCI);
GoToXY(16,15); WriteLn('4. CHIUDI');
GoToXY(16,17); Write('la TUA SCELTA PER FAVORE (1,2...):');
ReadLn(choice);
CASE choice OF
1: RequiredInsulation;

```

```

2: DurationLimitedExposure;
3: WindChillIndex;
4: stop:=True;
OTHERWISE {ELSE on a PC}
BEGIN
GoToXY(46,17); WriteLn('Scelta non valida');
Delay(100,dummy); {Delay(1000) on a PC}
END;
END;
UNTIL stop;
END.

```

Negli ambienti caldi dove la sensazione di comfort è direttamente collegabile alla sudorazione ed ai meccanismi di dispersione termica ad essa legati, l'indice di stress di calore, o *HSI*, è la percentuale espressa dal rapporto tra la potenza termica dispersa dalla pelle q_{sk} , in condizioni di omotermia e con $\theta_{sk} = 35^\circ\text{C}$, e la quantità massima erogabile $q_{sk,max} = 700 \text{ W/m}^2$, corrispondente ad una sudorazione di $280 \text{ mg/m}^2\text{s}$ circa¹¹⁸. Per esposizioni di 8 ore (in ambienti di lavoro), la Tabella 4-42 fornisce la sensazione termica corrispondente in funzione del valore dell'indice ottenuto.

<i>HSI</i>	<i>Effetti</i>
0	Nessuno
10÷30	Stress da lieve a moderato
40÷60	Stress severo
70÷90	Stress molto severo
100	Stress massimo sopportabile solo da persone giovani ed acclimatate al caldo

Tabella 4-42 Indice di stress di calore *HSI*

Dalle analisi statistiche, il modello di Humphreys e Nicol¹¹⁹ ha sviluppato una relazione che determina la temperatura dell'aria ottimale in funzione della temperatura media mensile esterna:

$$\theta_{i,req} = 24.2 + 0.43(\theta_{o,med} - 22)e^{-\left(\frac{\theta_{o,med} - 22}{24\sqrt{2}}\right)^2} \quad (4.104)$$

Questa temperatura sarà utilizzata per determinare la quantità di stress termico da sottrarre - come descritto nel § 2.3.1 - allo scopo di considerare nel PMV la parte adattiva nella valutazione del discomfort termo igrometrico.

4.2.2 *Discomfort visivo*

Tramite la somma delle quantità E_1 , E_2 , E_3 ed E_4 determinate nel § 4.1.2.2 è possibile valutare l'illuminamento totale rappresentativo delle condizioni riscontrabili nell'unità ambientale. La determinazione degli EV può essere eseguita tramite la relazione:

$$EV = \log_2 \frac{E_{tot}}{2.5} \quad (4.105)$$

Grazie ai valori stabiliti nella Tabella 2-20 è possibile associare ad ogni azione elementare la sua soglia di sensazione visiva, grazie alla quale determinare, per interpolazione lineare, la relativa sensazione come indicata nella Tabella 2-19; in particolare, per le attività elementari individuate nel caso di tipologie abitative, è possibile utilizzare direttamente la Tabella 4-43 per la determinazione del discomfort diacronico e sincronico, come definito nel § 2.3.2.

¹¹⁸ Cfr. ASHRAE, *Handbook – Fundamentals*, op. cit., pag.8.20.

¹¹⁹ Cfr. Humphreys M. A. e Nicol J. F., *Understanding the adaptive approach to thermal comfort*, ASHRAE Transactions, pp.991-1004.

Cod.	Attività visiva	Soglie di sensazione visiva							
		-3	-2	-1	0	+1	+2	+3	
001	Scorgere i colori	2.5	3.5	4.0	4.5	13.0	14.0	15.0	16.0
002	Vedere piccoli oggetti	4.5	5.5	6.0	6.5	13.0	14.0	15.0	16.0
003	Vedere ostacoli di medie dim.	1.5	2.5	3.0	3.5	13.0	14.0	15.0	16.0
004	Vedere piccoli oggetti	4.5	5.5	6.0	6.5	13.0	14.0	15.0	16.0
005	Vedere piccoli oggetti	4.5	5.5	6.0	6.5	13.0	14.0	15.0	16.0
006	Vedere segni grafici	5.0	6.0	6.5	7.0	13.0	14.0	15.0	16.0
007	Vedere piccoli oggetti	4.5	5.5	6.0	6.5	13.0	14.0	15.0	16.0
008	Vedere piccoli oggetti	4.5	5.5	6.0	6.5	13.0	14.0	15.0	16.0
009	Scorgere piccoli oggetti	4.0	5.0	5.5	6.0	13.0	14.0	15.0	16.0
010	Scorgere piccoli oggetti	4.0	5.0	5.5	6.0	13.0	14.0	15.0	16.0
011	Scorgere i colori	2.5	3.5	4.0	4.5	13.0	14.0	15.0	16.0
012	Scorgere sagome	-1.0	0.0	0.5	1.0	13.0	14.0	15.0	16.0
013	Vedere ostacoli di medie dim.	1.5	2.5	3.0	3.5	13.0	14.0	15.0	16.0
014	Vedere ostacoli in movimento	3.5	4.5	5.0	5.5	13.0	14.0	15.0	16.0
015	Vedere ostacoli in movimento	3.5	4.5	5.0	5.5	13.0	14.0	15.0	16.0
016	Vedere piccoli oggetti	4.5	5.5	6.0	6.5	13.0	14.0	15.0	16.0
017	Isolarsi dalla luce	n.c.	n.c.	n.c.	-∞	0.0	2.0	3.0	4.0
018	Scorgere i colori	2.5	3.5	4.0	4.5	13.0	14.0	15.0	16.0
019	Vedere piccoli oggetti	4.5	5.5	6.0	6.5	13.0	14.0	15.0	16.0
020	Isolarsi dalla luce	n.c.	n.c.	n.c.	-∞	0.0	2.0	3.0	4.0
021	Vedere ostacoli in movimento	3.5	4.5	5.0	5.5	13.0	14.0	15.0	16.0
022	Scorgere piccoli oggetti	4.0	5.0	5.5	6.0	13.0	14.0	15.0	16.0
023	Scorgere piccoli oggetti	4.0	5.0	5.5	6.0	13.0	14.0	15.0	16.0
024	Vedere piccoli oggetti	4.5	5.5	6.0	6.5	13.0	14.0	15.0	16.0
025	Vedere ostacoli in movimento	3.5	4.5	5.0	5.5	13.0	14.0	15.0	16.0
026	Vedere ostacoli in movimento	3.5	4.5	5.0	5.5	13.0	14.0	15.0	16.0
027	Vedere piccoli oggetti	4.5	5.5	6.0	6.5	13.0	14.0	15.0	16.0
028	Vedere piccoli oggetti	4.5	5.5	6.0	6.5	13.0	14.0	15.0	16.0
029	Vedere segni grafici	5.0	6.0	6.5	7.0	13.0	14.0	15.0	16.0
030	Vedere piccoli dettagli	6.5	7.5	8.0	8.5	12.0	13.0	14.0	15.0
031	Leggere a lungo	6.0	7.0	7.5	8.0	12.0	13.0	14.0	15.0
032	Vedere piccoli oggetti	4.5	5.5	6.0	6.5	13.0	14.0	15.0	16.0
033	Scorgere piccoli oggetti	4.0	5.0	5.5	6.0	13.0	14.0	15.0	16.0
034	Scorgere i colori	2.5	3.5	4.0	4.5	13.0	14.0	15.0	16.0
035	Leggere a lungo	6.0	7.0	7.5	8.0	12.0	13.0	14.0	15.0

Tabella 4-43 Attività elementari e soglie di discomfort visivo

4.2.3 Discomfort uditivo

Per inquinamento acustico si intende¹²⁰ «l'introduzione di rumore nell'ambiente abitativo o nell'ambiente esterno tale da provocare fastidio o disturbo al riposo e alle attività umane, pericolo per la salute umana, deterioramento degli ecosistemi, dei beni materiali, dei monumenti, dell'ambiente abitativo o dell'ambiente esterno o tale da interferire con le legittime fruizioni degli ambienti stessi»; grazie alle relazioni stabilite nel § 4.1.2.3, è possibile stabilire il livello di pressione sonora all'interno di ogni ambiente e la provenienza e la frequenza (125 o 1000 Hz) della sorgente. In base all'età ed al sesso¹²¹ è invece determinabile lo spostamento della soglia di sensibilità uditiva, per cui sono noti tutti i valori per poter stimare il discomfort in funzione dell'attività elementare in cui l'utente è impegnato. Infatti, tenendo conto dei valori stabiliti nella Tabella 2-22 sono stati determinati i valori soglia per ogni azione, come mostrato nella Tabella 4-44.

¹²⁰ Cfr. art.2 Legge 26 ottobre 1995 n.447, *op. cit.*.

¹²¹ Cfr. § 4.1.3.1.

Cod.	Descrizione	Segnale			ΔL					L_{tot}		
		LA_{eq}	Freq.	Var.	-3	-2	-1	0	0	1	2	3
001	Nessuno	no			no	no	no	no	50	60	65	80
002	Nessuno	no			no	no	no	no	50	60	65	80
003	Ascoltare un discorso	60	Cost	no	63	60	57	55	60	65	70	75
004	Ascoltare un segnale	no			no	no	no	no	60	70	75	80
005	Udire un segnale	55	Salt	no	60	58	55	52	60	70	75	80
006	Udire un segnale	55	Salt	no	60	58	55	52	55	65	70	75
007	Udire un segnale	55	Salt	no	60	58	55	52	55	65	70	75
008	Nessuno	no			no	no	no	no	60	70	75	80
009	Nessuno	no			no	no	no	no	50	60	65	80
010	Ascoltare un segnale	55	Salt	no	58	55	52	50	50	60	65	70
011	Nessuno	no			no	no	no	no	50	60	65	80
012	Ascoltare parlato e musica	55	Cost	sì	0	-3	-5	-7	60	65	70	80
013	Ascoltare musica	60	Cost	sì	-3	-5	-7	-10	60	65	70	80
014	Ascoltare un discorso	55	Cost	sì	3	0	-3	-5	60	65	70	75
015	Nessuno	no			no	no	no	no	50	60	65	80
016	Udire un segnale	55	Salt	no	60	58	55	52	60	70	75	80
017	Isolarsi dai rumori	no			no	no	no	no	35	40	45	75
018	Udire un segnale	55	Salt	no	60	58	55	52	55	65	70	75
019	Nessuno	no			no	no	no	no	50	60	65	80
020	Isolarsi dai rumori	no		no	no	no	no	no	35	40	45	75
021	Ascoltare un segnale	55	Salt	no	58	55	52	50	60	70	75	80
022	Udire un segnale	55	Salt	no	60	58	55	52	50	60	65	70
023	Udire un segnale	55	Salt	no	60	58	55	52	50	60	65	70
024	Udire un segnale	55	Salt	no	60	58	55	52	60	70	75	80
025	Nessuno	no			no	no	no	no	45	55	60	75
026	Nessuno	no			no	no	no	no	50	60	65	80
027	Ascoltare un segnale	55	Salt	no	58	55	52	50	50	60	65	70
028	Nessuno	no			no	no	no	no	50	60	65	80
029	Nessuno	no			no	no	no	no	60	70	75	80
030	Udire un segnale	55	Salt	no	60	58	55	52	55	65	70	75
031	Isolarsi dai rumori	no			no	no	no	no	50	55	60	80
032	Ascoltare un segnale	55	Salt	no	58	55	52	50	60	70	75	80
033	Nessuno	no			no	no	no	no	60	70	75	80
034	Ascoltare un discorso	55	Cost	sì	3	0	-3	-5	50	55	60	65
035	Isolarsi dai rumori	no			no	no	no	no	55	60	65	80

Tabella 4-44 Valori soglia per ogni azione elementare

Qui si è provveduto a classificare la potenza del segnale sonoro prodotto durante l'azione, la sua frequenza (saltuaria o costante) e l'eventuale variabilità, e cioè la possibilità da parte dell'utente di modificarne l'intensità per superare eventualmente il rumore di fondo. Le colonne relative al valore ΔL al discomfort prodotto dall'eventuale eccesso di inquinamento acustico: se il segnale da udire è variabile, allora i valori di ΔL si riferiscono alla differenza tra la pressione sonora del segnale e quella del rumore di fondo; altrimenti, vengono direttamente riportati i livelli soglia di pressione sonora del rumore tali da provocare quel particolare valore di discomfort, valutato come indice di disturbo dell'ascolto¹²². Nel caso in cui l'azione non produce segnali, il valore del discomfort è automaticamente pari a zero. Nella colonna L_{tot} sono invece riportati i valori soglia della pressione sonora totale, e quindi del livello di inquinamento acustico esistente all'interno dell'ambiente. Questo

¹²² Cfr. Tabella 2-23.

valore viene sia nella valutazione del disturbo da inquinamento acustico¹²³ - che concorre con il precedente indice a misurare il discomfort sincronico, che per determinare il livello di esposizione quotidiana al rumore.

Si definisce il *livello sonoro continuo equivalente ponderato* A^{124} il valore:

$$L_{Aeq,\Delta t} = 10 \ln \left[\frac{1}{\Delta t} \int_0^{\Delta t} \left(\frac{p_A[t]}{p_0} \right)^2 dt \right], \quad (4.106)$$

dove la pressione di riferimento p_0 è pari a 20 μPa , p_A è il livello di pressione sonora istantanea ponderata A in Pa, e Δt è il periodo di osservazione, grazie al quale è possibile determinare l'*esposizione personale quotidiana al rumore*:

$$L_{EP,day} = L_{Aeq,\Delta t} + 10 \ln \frac{\Delta t}{\Delta t_0}, \quad (4.107)$$

dove Δt_0 è il periodo di riferimento pari a 28800 s, che rappresenta il livello medio di pressione sonora equivalente ad un'esposizione della durata di otto ore. Questo deve essere inferiore al valore inferiore di azione¹²⁵, pari a 80dB(A). Per i valori soglia di riferimento si utilizzeranno quelli massimi espressi nella Tabella 2-24.

4.2.4 Valutazione integrale del comfort

Come descritto nel § 2.3.5, la determinazione del livello atteso di benessere è un'operazione che avviene attraverso successive iterazioni che consentono di *rifinire* la soluzione partendo da condizioni iniziali. Stabilito quindi un tempo zero dal quale far partire l'interazione, e posizionato tale tempo al momento del risveglio, quando quasi tutti gli indicatori di discomfort sono nulli, è possibile eseguire la simulazione dell'interazione utente/spazio fisico utilizzando l'indice LaB come criterio di scelta nella determinazione delle diverse opportunità che il protocollo mette a disposizione, che sono elencate - per quanto riguarda la movimentazione degli infissi interni ed esterni - nella Tabella 2-29. A ciò si può aggiungere la valutazione del tasso di aria minima n_{min} ; questo valore è fissato dalle norme in funzione dell'attività svolta e del grado di affollamento del locale, ed è espresso o per unità di volume o per persona (Tabella 4-45)¹²⁶: quando la portata d'aria (infiltrata o in ingresso/uscita per l'apertura degli infissi) è inferiore al valore stabilito dalla norma, si può considerare che l'utente senta la necessità di aprire le finestre allo scopo di garantire il necessario ricambio.

Come già detto per la determinazione della temperatura di bulbo asciutto, un ciclo di interazioni che copre la durata di 4-5 giorni consecutivi consente di stabilizzare il dato, e quindi di giungere ad una valutazione sufficientemente precisa sia dei valori relativi ai parametri ambientali che a quelli consequenziali di discomfort - e quindi in ultima analisi del livello atteso di benessere.

¹²³ Cfr. Tabella 2-24.

¹²⁴ Cfr. UNI EN ISO 9432:2008, *Acustica. Determinazione del livello di esposizione personale al rumore nell'ambiente di lavoro*.

¹²⁵ Cfr. art.198 D. Lgs. 9 aprile 2008 n°81.

¹²⁶ I valori tra parentesi sono ottenuti per analogia con altre funzioni; valori negativi si riferiscono a portate d'aria estratte. Si riportano locali per i quali è consentita la sola aerazione naturale. Cfr. UNI EN 12831 e UNI EN ISO 13790, *op. cit.*. Cfr. anche UNI 10339:1995, *Impianti aeraulici ai fini di benessere. Generalità, classificazione e requisiti. Regole per la richiesta d'offerta, l'offerta, l'ordine e la fornitura*.

Tipologia	UNI EN 12831 10 ⁻³ m ³ /s	UNI 10339 10 ⁻³ m ³ /s	UNI EN ISO 13790 10 ⁻³ m ³ /s	Affoll. pers/ m ²
Edifici adibiti a residenza e assimilabili				
<i>- abitazioni civili:</i>				
soggiorni e camere da letto	0.14 / m ³	11/pers	0.08 / m ³	0.04
cucine	0.42 / m ³	-0.0011/m ³	0.08 / m ³	
bagni, servizi	0.56 / m ³	-0.0011/m ³	0.08 / m ³	
<i>- collegi, luoghi di ricovero, case di pena, caserme, conventi</i>				
sale riunioni	(0.56/m ³)	9/pers	(4/pers)	0.60
dormitori	(0.14/m ³)	11/pers		0.10
camere da letto	(0.14/m ³)	11/pers		0.05
cucina		16.5/m ²		
bagni, servizi	(0.56/m ³)	-0.0011/m ³		
<i>- alberghi, pensioni</i>				
ingresso, soggiorni	(0.14/m ³)	11/pers		0.20
sale conferenze, auditori	(0.56/m ³)	5.5/pers	(4/pers)	0.60
sale da pranzo	(0.14/m ³)	10/pers		
camere da letto	(0.14/m ³)	11/pers		0.05
bagni, servizi	(0.56/m ³)	-0.0011/m ³		
Edifici per uffici e assimilabili				
uffici singoli	0.28 / m ³	11/pers	4/pers	0.06
uffici open space	0.28 / m ³	11/pers	4/pers	0.12
locali riunione	0.56 / m ³	10/pers	4/pers	0.60
centri elaborazione dati	0.28 / m ³	7/pers	4/pers	0.08
servizi	(0.56/m ³)	-0.0011/m ³		
Ospedali, cliniche, case di cura ed assimilabili				
degenze	(0.14/m ³)	11/pers		0.08
corsie	(0.14/m ³)	11/pers		0.12
sale mediche / soggiorni	(0.14/m ³)	8.5 / pers		0.20
terapie fisiche		11/pers		0.20
servizi	(0.56/m ³)	-0.0022/m ³		
Attività associative, ricreative, di culto e assimilabili				
<i>- cinema, teatri, sale congressi</i>				
platee, loggioni, sale con pubblico	(0.56/m ³)	5.5/pers		1.50
<i>- mostre, musei, biblioteche e assimilabili</i>				
sale mostre, pinacoteche	(0.56/m ³)	6/pers	(4/pers)	0.30
sale lettura	(0.56/m ³)	5.5/pers	(4/pers)	0.30
luoghi di culto		6/pers	(4/pers)	0.80
servizi	(0.56/m ³)	-0.0022/m ³		
<i>- bar, ristoranti</i>				
bar		11/pers		0.80
pasticcerie		6/pers		0.80
sale da pranzo	(0.14/m ³)	10/pers		0.60
servizi	(0.56/m ³)	-0.0022/m ³		
Attività commerciali				
barbieri, saloni di bellezza		14/pers	(4/pers)	0.20
abbigliamento, foto, mobili, fiori		11.5/pers	(4/pers)	0.10
alimentari, farmacie		9/pers	(4/pers)	0.20
Attività scolastiche				
asili nido, scuole materne		4/pers	(4/pers)	0.40
aule elementari		5/pers	(4/pers)	0.45
aule medie inferiori		6/pers	(4/pers)	0.45
aule medie superiori		7/pers	(4/pers)	0.45
aule universitarie	(0.14/m ³)	7/pers	(4/pers)	0.60
biblioteche, sale lettura	(0.56/m ³)	6/pers	(4/pers)	(0.30)
aule musica e lingue		7/pers	(4/pers)	0.50
laboratori	(0.14/m ³)	7/pers	(4/pers)	0.30
aule insegnanti	(0.14/m ³)	6/pers	(4/pers)	0.30
servizi	(0.56/m ³)	-0.0011/m ³		

Tabella 4-45 Tasso minimo orario di ventilazione

È importante sottolineare ai fini del calcolo che nelle prime interazioni non venga fatto ricorso a sistemi di climatizzazione durante la simulazione in quanto in queste fasi le temperature sono ancora lontane dalle condizioni che si

riscontrano nella realtà, e l'uso di impianti attivi porterebbe a risultati non affidabili. Realizzando i calcoli in assenza di riscaldamento/raffrescamento e trovando le temperature medie degli ambienti si può successivamente eseguire la valutazione sugli ultimi due cicli verificando il livello di discomfort termo igrometrico e considerare l'eventuale accensione degli impianti. Questo tenderà a *forzare* la stima del LaB - e quindi la simulazione del comportamento degli utenti - verso un impiego virtuoso dei sistemi passivi di controllo e ad esaltare eventuali soluzioni progettuali di bioarchitettura.

Diverso è il caso dell'illuminamento, in quanto le attività visive sarebbero impossibili da portare a termine dopo il tramonto, per cui il livello atteso di benessere si stabilizzerebbe sul valore -3, rendendo impossibile la simulazione della movimentazione degli infissi che di notte non hanno alcuna influenza sul discomfort visivo.

Termini e definizioni

A

agente entità che provoca un determinato effetto mediante la propria azione. [UNI 8290 parte 3]
Gli agenti vengono considerati secondo le seguenti categorie: naturale, artificiale, dovuto alla concezione degli edifici, dovuto alla utilizzazione degli edifici. [UNI 8290 parte 3]

agente naturale agente dovuto alle condizioni ambientali esterne al sistema edilizio e non legate all'intervento dell'uomo. [UNI 8290 parte 3]

agente artificiale agente dovuto alle condizioni ambientali esterne al sistema edilizio e non legate all'intervento dell'uomo. [UNI 8290 parte 3]

agente dovuto alla concezione (progettazione) degli edifici agente indotto da scelte tipologiche e/o tecnologiche operate per ottenere determinati comportamenti di ambienti ed oggetti edilizi. [UNI 8290 parte 3]

agente dovuto alla utilizzazione (utenza) degli edifici agente indotto dalle attività svolte nell'ambito degli organismi edilizi. [UNI 8290 parte 3]

ammettanza termica ampiezza complessa della densità di flusso termico attraverso la superficie del componente adiacente ad una zona termica diviso l'ampiezza complessa della temperatura della medesima zona. [UNI EN ISO 13786]

asimmetria termica differenza tra la temperatura radiante planare tra due lati opposti di un elemento piano. [UNI EN ISO 7726]

attività elementare elemento di base del sistema di attività specifiche [...]; essa richiede per il suo svolgimento uno spazio definito e costante per la necessità di usare attrezzature [...] più lo spazio necessario allo o agli operatori che la svolgono. [Zaffagnini, 1994]

attributo carattere non misurabile, o che si preferisce non misurare, di un requisito sul quale è dato unicamente un giudizio espresso in termini qualitativi di appartenenza ad una categoria o a più categorie alternative. [UNI 10838]

azione mediatore fisico e/o chimico, capace di modificare l'ambiente e gli oggetti edilizi, nonché il loro comportamento. [UNI 8290 parte 3]

B

benessere insieme delle condizioni relative a stati del sistema edilizio adeguati alla vita, alla salute ed allo svolgimento delle attività degli utenti. [UNI 8289]

C

classe di esigenza esplicitazione di bisogni dell'utenza finale tenuto conto dei vincoli che l'ambiente naturale pone all'ambiente costruito. [UNI 8289]

La loro individuazione passa attraverso l'analisi dei bisogni da soddisfare confrontati con fattori di tipo ambientale, culturale ed economico. [UNI 8289]

clima acustico andamento spaziale e temporale del rumore presente in un determinato sito. [UNI 11143-1]

clima meteorologico funzione di distribuzione della probabilità nello spazio-tempo del tempo meteorologico, intendendo con questo ultimo lo stato fisico dell'atmosfera nello spazio-tempo. [Atlante Meteorologico d'Italia]

coefficiente di dispersione termica di progetto dispersione termica di progetto per unità di differenza di temperatura. [UNI EN 12831]

comfort atteggiamento mentale di soddisfazione per l'ambiente. – **igrotmico** o **termo igrometrico** atteggiamento mentale di soddisfazione per l'ambiente dal punto di vista termico. [ASHRAE Standard 55]

capacità termica capacità di ciascun componente edilizio di immagazzinare energia da ciascun lato, quando la corrispondente temperatura varia periodicamente. [UNI EN ISO 13786]

capacità termica aerica capacità termica per unità di superficie. [UNI EN ISO 13786]

compito visivo insieme degli elementi visivi del lavoro effettuato. [UNI EN 12464-1]

D

dispersione termica di progetto quantità di calore per unità di tempo rilasciata dall'edificio all'ambiente esterno nelle condizioni di progetto specificate. [UNI EN 12831]

E

effetto modificazione del comportamento dell'ambiente e/o degli oggetti edilizi, conseguente ad un'azione determinata. [UNI 8290 parte 3]

esigenza ciò che di necessità si richiede per il corretto svolgimento di un'attività dell'utente o di una funzione tecnologica. [UNI 8290 parte 3]

F

fattore campo disciplinare di riferimento, utilizzato per conoscere ed interpretare la natura di azioni ed effetti, nonché per strumentarne il controllo. I fattori prevalentemente utilizzati in edilizia sono: acustici, atmosferici, biologici, chimici, elettrici ed elettromagnetici, idrici, ignei, luminosi, meccanici, termici. [UNI 8290 parte 3]

fattore di luce diurna rapporto tra il valore di illuminamento puntuale interno e l'illuminamento di una superficie orizzontale esterna completamente illuminata dalla volta celeste, in assenza di ostacoli. **fattore medio di luce diurna** rapporto tra la media dei valori di illuminamento interni ed esterni al locale considerato. [UNI 10840]

I

illuminamento medio mantenuto valore al di sotto del quale l'illuminamento medio non può mai scendere. [UNI EN 12464-1]

inquinamento acustico l'introduzione di rumore nell'ambiente abitativo o nell'ambiente esterno tale da provocare fastidio o disturbo al riposo e alle attività u-

mane, pericolo per la salute umana, deterioramento degli ecosistemi, dei beni materiali, dei monumenti, dell'ambiente abitativo o dell'ambiente esterno o tale da interferire con le legittime fruizioni degli ambienti stessi. [Legge 26 ottobre 1995 n.447]

L

livello di pressione sonora istantanea di picco livello di pressione sonora con tempo di risalita non maggiore di 100 μ s. [UNI EN ISO 9432]

livello di rumore ambientale livello continuo equivalente di pressione sonora ponderato "A" prodotto da tutte le sorgenti di rumore esistenti in un dato luogo e durante un determinato tempo. Il rumore ambientale é costituito dall' insieme del rumore residuo (come definito al punto 3) e da quello prodotto dalle specifiche sorgenti disturbanti. [D.P.C.M. 01 marzo 1991]

livello di rumore di calpestio di solai livello medio di pressione sonora misurato [...] nell'ambiente ricevente quando il solaio sottoposto a prova è sollecitato dal generatore di rumore di calpestio normalizzato; è espresso in decibel. — **normalizzato** livello aumentato di un fattore di correzione espresso in decibel, dato da dieci volte il logaritmo in base dieci del rapporto tra l'area di assorbimento equivalente misurata, dell'ambiente ricevente e l'area di assorbimento equivalente di riferimento, pari a 10m²; è espresso in decibel. [UNI EN ISO 140-6]

livello di rumore residuo livello continuo equivalente di pressione sonora ponderato "A" che si rileva quando si escludono le specifiche sorgenti disturbanti. [D.P.C.M. 01 marzo 1991]

M

matrice di trasferimento termico

matrice che mette in relazione le ampiezze complesse delle temperature e del flusso termico su un lato del componente con le omologhe ampiezze sull'altro lato. [UNI EN ISO 13786]

mentale, carico di lavoro insieme di stati cerebrali che mediano la prestazione umana in compiti percettivi, cognitivi e motori. [Parasuraman & Caggiano, 2002]

mentale, fatica alterazione mentale e fisica, condizionata da intensità, durata e andamento temporale dello strain mentale precedente. [UNI EN ISO 10075-1]

modello di comportamento è il modo di fruire l'organismo edilizio [...] da parte del nucleo di utenza letto attraverso la collocazione delle attività [...] negli spazi elementari. [Zaffagnini, 1994]

P

PMV o voto medio previsto indice che predice il valore medio dei voti di un consistente gruppo di persone sulla scala di sensazione termica a sette punti. [UNI EN ISO 7730]

potere fonoisolante apparente dieci volte il logaritmo in base dieci del rapporto tra la potenza sonora incidente [...] e la potenza sonora totale trasmessa all'ambiente ricevente se, in aggiunta alla potenza sonora trasmessa attraverso il provino la potenza sonora trasmessa dagli elementi laterali o da altri componenti è significativa. [UNI EN ISO 140-5]

PPD o percentuale prevista di insoddisfatti indice che predice il voto di una percentuale di persone, in un gruppo numeroso, secondo la scala termica a sette punti. [UNI EN ISO 7730]

prestazione (edilizia) comportamento reale dell'organismo edilizio e/o delle sue parti nelle effet-

tive condizioni di uso e di sollecitazione. Le prestazioni edilizie vengono normalmente classificate in: a) prestazioni ambientali; b) prestazioni tecnologiche. [UNI 10838]

profondità di penetrazione periodica profondità alla quale l'ampiezza delle variazioni di temperatura è ridotta di un fattore *e* (numero di Napier) in un materiale omogeneo di spessore infinito soggetto a variazioni sinusoidali di temperatura sulla sua superficie. [UNI EN ISO 13786]

R

rapporto di copertura rapporto percentuale tra la superficie coperta riferita a tutte le opere edificate e la superficie fondiaria.

requisito traduzione di un'esigenza in fattori atti a individuare le condizioni di soddisfacimento da parte di un organismo edilizio o di sue parti spaziali o tecniche, in determinate condizioni di uso e/o di sollecitazione. I requisiti vengono normalmente classificati in: a) requisiti funzionali spaziali; b) requisiti ambientali; c) requisiti tecnologici; d) requisiti tecnici; e) requisiti operativi; f) requisiti di durabilità; g) requisiti di manutenibilità. — **ambientale** traduzione di un'esigenza in fattori fisico-ambientali e in richieste di servizi tecnologici, atti a individuarne le condizioni di soddisfacimento da parte di una unità ambientale. — **di durabilità** traduzione di un requisito tecnologico nelle caratteristiche funzionali alla durata e alla sua affidabilità che connotano un elemento tecnico per il soddisfacimento del requisito stesso. — **funzionale spaziale** traduzione di un'esigenza in fattori geometrico dimensionali e di organizzazione degli spazi, atti a individuarne le condizioni di soddisfacimento da parte di un elemento

spaziale. — **di durabilità** traduzione di un requisito tecnico nelle caratteristiche di operabilità manutentiva che connotano un elemento tecnico per il soddisfacimento del requisito stesso. — **operativo** traduzione di un requisito tecnico in caratteristiche tecnico-dimensionali e di relazione che connotano un elemento tecnico per il soddisfacimento del requisito stesso. — **tecnico** traduzione di un requisito tecnologico nelle caratteristiche intrinseche (chimiche, fisiche, meccaniche, ecc.) che devono connotare le parti componenti di un elemento tecnico per il soddisfacimento del requisito stesso. — **tecnologico** traduzione di un'esigenza in fattori tecnico-scientifici atti a individuarne le condizioni di soddisfacimento da parte di un subsistema tecnologico e/o di un elemento tecnico. [UNI 10838]

rumore ciclico rumore che si ripete avente sempre le stesse caratteristiche di emissione ad intervalli di tempo uguali. [UNI EN ISO 9432]

rumore costante rumore con variabilità massima di 3 dB(A). [UNI EN ISO 9432]

rumore fluttuante rumore avente durata superiore ad 1 s con variabilità superiore a 3 dB(A). [UNI EN ISO 9432]

rumore impulsivo rumore avente durata inferiore ad 1 s. [UNI EN ISO 9432]

S

salute insieme delle condizioni atte a garantire l'assenza di malattie o danni, anche temporanei, all'organismo di tipo fisico, psicologico e sociale.

scala di sensazione termica scala di sensazione a sette punti: +3 molto caldo; +2 caldo; +1 leggermente caldo; 0 neutro; -1 leggermente freddo; -2 freddo; -3 molto freddo. [UNI EN ISO 7730]

sistema esperto programma di computer indirizzato a dare le prestazioni normalmente fornite da un esperto umano. [Gillies D., *Intelligenza artificiale e metodo scientifico*, Raffaello Cortina Editore, Milano 1998]

specifica di prestazione valore di variabili o di attributi, univocamente individuati, che definisce e delimita la risposta progettuale a una o più specificazioni di prestazione. [UNI 10838]

specificazione di prestazione espressione del requisito secondo valori di variabili e/o attributi univocamente determinati che definiscono l'obiettivo di qualità da perseguire attraverso il progetto. L'insieme delle specificazioni di prestazione di un intervento edilizio, opportunamente strutturato, è spesso designato con il nome di "programma prestazionale". [UNI 10838]

stress termico condizione di squilibrio energetico nell'individuo, tale da creare sensazioni di freddo (ipotermia) o caldo (ipertermia); se lo stress termico è nullo (omotermita), l'individuo è ragionevolmente in condizioni di comfort.

T

temperatura (di bulbo asciutto o secco) dell'aria temperatura misurata a mezzo di un termometro di bulbo asciutto e protetto contro l'irradiazione. — **esterna** [il termometro andrà posizionato, ndr] discosto dalla superficie esterna di qualsiasi parete dell'edificio. [UNI 12831] — **all'interno di un locale** [il termometro andrà posizionato, ndr] all'altezza di 1,50 m dal pavimento ed al centro del locale considerato. [UNI 12831]

temperatura equivalente o effettiva ET temperatura di bulbo secco di un ambiente mantenuto in condizioni uniformi ed avente umidità relativa pari al 50%, nel

quale i soggetti scambiano globalmente la stessa quantità di calore; le persone sono in attività sedentaria, la velocità dell'aria è di 0,2 m/s e l'esposizione è di un'ora. [ASHRAE Standard 55]

temperatura equivalente o effettiva corretta ET* temperatura operante di una camera nera mantenuta in condizioni uniformi ed avente umidità relativa pari al 50%, nel quale i soggetti scambiano globalmente la stessa quantità di calore. [ASHRAE Standard 55]

temperatura media radiante temperatura uniforme immaginaria di un corpo nero che scambia termicamente per irraggiamento con un corpo considerato la stessa quantità di calore che viene scambiata dal corpo con l'ambiente reale. [UNI EN ISO 7726]

temperatura operativa approssimata media aritmetica tra la temperatura di bulbo asciutto dell'aria e la temperatura media radiante. [UNI EN ISO 7726]

temperatura radiante planare temperatura di una camera nera a temperatura uniforme il cui scambio termico radiativo sul lato di una superficie piana è uguale a quello registrato nell'ambiente non uniforme. [UNI EN ISO 7726]

tempo di riverberazione tempo, espresso in secondi, necessario affinché il livello di pressione sonora diminuisca di 60 dB. [UNI EN ISO 3328-2]

U

unità ambientale Raggruppamento di attività dell'utente, derivanti da una determinata destinazione d'uso dell'organismo edilizio, compatibili spazialmente e temporalmente fra loro. [UNI 10838]

unità immobiliare una unità ambientale suscettibile di autonomo godimento ovvero un insieme di unità ambientali funzionalmente

connesse, suscettibile di autonomo godimento. [D.M. 14 giugno 1989 n.236]

uno-a-molti, relazione relazione tra due tabelle secondo la quale ad ogni riga della prima possono corrispondere molte righe della seconda, ma ad ogni riga della seconda corrisponde una sola riga della prima.

V

valore di qualità valore di rumore da conseguire nel breve, medio e lungo periodo [...] per realizzare gli obiettivi di tutela previsti dalla [...] legge. [Legge 26 ottobre 1995 n.447]

valore inferiore di azione limite di livello di pressione sonora al di sopra del quale si rende necessario l'impiego di dispositivi di protezione delle vie uditive. [Legge 26 ottobre 1995 n.447]

valore limite di emissione valore massimo di rumore che può essere emesso da una sorgente sonora, misurato in prossimità della sorgente stessa. [Legge 26 ottobre 1995 n.447]

valore limite di immissione valore massimo di rumore che può essere immesso da una o più sorgenti sonore nell'ambiente abitativo [...] misurato in prossimità dei ricettori determinato. — **assoluto** con riferimento al livello equivalente di rumore ambientale. — **attenzione** che segnala la presenza di un potenziale rischio per la salute umana o per l'ambiente — **di qualità** da conseguire [...] per realizzare gli obiettivi di tutela — **differenziale** con riferimento alla differenza tra il livello equivalente di rumore ambientale ed il rumore residuo. [Legge 26 ottobre 1995 n.447]

variabile Carattere di un requisito, misurabile rispetto ad una scala continua e suscettibile di assumere valori diversi. [UNI 10838]

Leggi e norme

- ASHRAE, *Handbook – Fundamentals*, 2005
- ASHRAE, *Handbook –HVAC Applications*, 2007
- ASHRAE Standard 55/2004, *Thermal environmental conditions for human occupancy*, 2004
- CIE 16, *Daylight*, 1970
- UNI EN ISO 140-5:2000, *Acustica. Misurazione dell'isolamento acustico in edifici e di elementi di edificio. Misurazioni in opera dell'isolamento acustico per via aerea degli elementi di facciata e delle facciate*, 2000
- UNI EN ISO 140-6:2000, *Acustica. Misurazione dell'isolamento acustico in edifici e di elementi di edificio. Misurazioni in laboratorio dell'isolamento dal rumore di calpestio di solai*, 2000
- UNI ISO 226:2007, *Acustica. Curve normalizzate di egual livello di sensazione sonora*, 2007
- UNI EN ISO 3882-2:2008, *Acustica. Misurazione dei parametri acustici negli ambienti. Parte 2: tempo di riverberazione negli ambienti ordinari*, 2008
- UNI 5364:1976, *Impianti di riscaldamento ad acqua calda. Regole per la presentazione dell'offerta e per il collaudo*, 1976
- UNI EN ISO 6946:2008, *Componenti ed elementi per edilizia. Resistenza termica e trasmittanza termica. Metodo di calcolo*, 2008
- UNI EN ISO 7029:2002, *Acustica. Distribuzione statistica della soglia audiometrica in funzione all'età*, 2002
- UNI 7726:2002, *Ergonomia degli ambienti termici. Strumenti per la misurazione delle grandezze fisiche*, 2002
- UNI EN ISO 7730:2006, *Ergonomia degli ambienti termici. Determinazione analitica e interpretazione del benessere termico mediante il calcolo degli indici PMV e PPD e dei criteri di benessere termico locale*, 2006
- UNI 8289:1981, *Edilizia. Esigenze dell'utenza finale. Classificazione*, 1981
- UNI 8290:1987 parte 3, *Edilizia residenziale. Sistema tecnologico. Analisi degli agenti*, 1987
- UNI 8477-1:1983, *Energia solare. Calcolo degli apporti per applicazioni in edilizia. Valutazione dell'energia raggiante ricevuta (Norma ritirata senza sostituzione)*, 1983

- UNI EN ISO 8996:2005, *Ergonomia degli ambienti termici. Determinazione del metabolismo energetico*, 2005
- UNI EN ISO 9432:2008, *Acustica. Determinazione del livello di esposizione personale al rumore nell'ambiente di lavoro*, 2008
- UNI ISO 9613-2:2006, *Acustica. Attenuazione sonora nella propagazione all'aperto. Parte 2: Metodo generale di calcolo*
- UNI EN ISO 9920:2007, *Ergonomia degli ambienti termici. Valutazione dell'isolamento termico e della resistenza evaporativa dell'abbigliamento*, 2007
- UNI EN ISO 10073-1:2003, *Principi ergonomici relativi al carico di lavoro mentale – Termini generali e definizioni.*
- UNI EN ISO 10077-1:2007, *Prestazione termica di finestre, porte e chiusure oscuranti. Calcolo della trasmittanza termica. Parte 1: Generalità*, 2007
- UNI EN ISO 10211:2008, *Ponti termici in edilizia. Flussi termici e temperature superficiali. Calcoli dettagliati*, 2008
- UNI 10339:1995, *Impianti aeraulici a fini di benessere. Generalità, classificazione e requisiti. Regole per la richiesta d'offerta, l'offerta, l'ordine e la fornitura*, 1995
- UNI 10349:1994, *Riscaldamento e raffrescamento degli edifici. Dati climatici*, 1994
- UNI 10351:1994, *Materiali da costruzione. Conduttività termica e permeabilità al vapore*, 1994
- UNI 10355:1994, *Murature e solai. Valori della resistenza termica e metodo di calcolo*, 1995
- UNI 10375:1995, *Metodo di calcolo della temperatura interna estiva degli ambienti*, 1995
- UNI 10380:1994, *Illuminotecnica. Illuminazione di interni con luce artificiale (Norma ritirata con sostituzione)*, 1994
- UNI 10838:1999, *Edilizia. Terminologia riferita all'utenza, alle prestazioni, al processo edilizio e alla qualità edilizia*, 1999
- UNI 10840:2007, *Luci e illuminazione. Locali scolastici. Criteri generali per l'illuminazione artificiale e naturale*, 2007
- UNI EN ISO 11079:2008, *Ergonomia degli ambienti termici. Determinazione e interpretazione dello stress termico da freddo con l'utilizzo dell'isolamento termico dell'abbigliamento richiesto (IREQ) e degli effetti del raffreddamento locale*, 2008
- UNI 11143-1:2005, *Acustica. Metodo per la stima dell'impatto e del clima acustico per tipologia di sorgenti. Generalità*
- UNI/TS 11300-1:2008, *Prestazioni energetiche degli edifici. Parte 1: Determinazione del fabbisogno di energia termica dell'edificio per la climatizzazione estiva ed invernale*, 2008
- UNI EN 12354-2:2002, *Acustica in edilizia. Valutazioni delle prestazioni acustiche di edifici a partire dalle prestazioni di prodotti. Isolamento acustico al calpestio tra ambienti*, 2002
- UNI EN 12464-1:2004, *Luce e illuminazione. Illuminazione dei posti di lavoro. Parte 1: Posti di lavoro in interni*, 2004
- UNI EN 12831:2006, *Impianti di riscaldamento negli edifici. Metodo di calcolo del carico termico di progetto*, 2006
- UNI EN ISO 13370:2008, *Prestazione termica degli edifici. Trasferimento di calore attraverso il terreno. Metodi di calcolo*, 2008
- UNI EN 13465:2004, *Ventilazione degli edifici. Metodi di calcolo per la determinazione delle portate d'aria negli edifici residenziali*, 2004
- UNI EN ISO 13370:2008, *Prestazione termica degli edifici. Trasferimento di calo-*

- re attraverso il terreno. Metodi di calcolo, 2008*
- UNI EN 13779:2008, *Ventilazione degli edifici non residenziali. Requisiti di prestazione per i sistemi di ventilazione e di climatizzazione, 2008*
- UNI EN ISO 13786:2008, *Prestazione termica dei componenti per l'edilizia. Caratteristiche termiche dinamiche. Metodo di calcolo, 2008*
- UNI EN ISO 13789:2008, *Prestazione termica degli edifici. Coefficienti di trasferimento del calore per trasmissione e ventilazione. Metodo di calcolo, 2008*
- UNI EN ISO 13790:2008, *Prestazione energetica degli edifici. Calcolo del fabbisogno di energia per il riscaldamento e il raffrescamento, 2008*
- UNI EN ISO 14683:2008, *Ponti termici in edilizia. Coefficiente di trasmissione termica lineica. Metodi semplificati e valori di riferimento, 2008*
- UNI EN 27243:1996, *Ambienti caldi. Valutazione dello stress termico per l'uomo negli ambienti di lavoro, basata sull'indice WBGT (temperatura a bulbo umido e del globotermometro), 1996*
- UNI EN 29052-1:1993, *Acustica. Determinazione della rigidità dinamica. Materiali utilizzati sotto i pavimenti galleggianti negli edifici residenziali, 1993*
- D. M. 18 dicembre 1975, *Norme tecniche aggiornate relative all'edilizia scolastica, ivi compresi gli indici minimi di funzionalità didattica, edilizia ed urbanistica da osservarsi nella esecuzione di opere di edilizia scolastica*
- Legge 9 gennaio 1991 n°10, *Norme per l'attuazione del Piano Energetico Nazionale in materia di uso razionale dell'energia, di risparmio energetico e di sviluppo delle fonti rinnovabili di energia*
- D.P.C.M. 1 marzo 1991, *Limiti massimi di esposizione al rumore negli ambienti abitativi e nell'ambiente esterno*
- D.P.R. 26 agosto 1993 n°412, *Regolamento recante norme per la progettazione, l'installazione, l'esercizio e la manutenzione degli impianti termici degli edifici ai fini del contenimento dei consumi di energia, in attuazione dell'art.4 comma 4, della legge 9 gennaio 1991, n°10*
- Legge 26 ottobre 1995 n.447, *Legge quadro sull'inquinamento acustico*
- D.P.C.M. 14 novembre 1997, *Determinazione dei valori limite delle sorgenti sonore*
- D.P.C.M. 5 dicembre 1997, *Determinazione dei requisiti acustici passivi degli edifici*
- D. Lgs. 9 aprile 2008 n°81, *Attuazione dell'art.1 della legge 3 agosto 2007, n.123, in materia di tutela della salute e della sicurezza nei luoghi di lavoro*

Bibliografia

- ABRAMOWITZ Milton e STEGUN Irene, *Handbook of Mathematical Functions with Formulas, Graphs, and Mathematical Tables*, Dover, New York 1972
- AKINS R. E. et al., *Average pressure coefficient for rectangular buildings*. In *Wind engineering: Proceedings of the Fifth International Conference*, 1979
- ANAS e SOC. AUTOSTRADE, *Istruzioni per l'inserimento ambientale delle infrastrutture stradali e ferroviarie con riferimento al controllo dell'inquinamento acustico*, Roma 1992
- BISEGNA Paolo, *La stima dell'ora della morte mediante il metodo termometrico*, Roma 2005
- BURATTI Cinzia, *Impianti di climatizzazione e condizionamento*, Morlacchi, Perugia 2003
- DAVENPORT A. G. e HUY H. Y. L., *External and internal wind pressures on cladding of buildings*, University of West Ontario, Canada 1982
- DE DEAR R. J. e BRAGER G. S., *Developing an adaptive model of thermal comfort and preference*, ASHRAE Transactions, 1998
- FANGER Povl, *Calculation of thermal comfort: Introduction of a basic equation*, ASHRAE Transaction, 1967
- FANGER Povl, *Thermal comfort*, Danish Technical Press, Copenhagen 1970
- FANGER Povl, *The variability of man's preferred ambient temperature from day to day*, Proceeding of symposium on "Quantitative prediction of the physiological and psychological effects of the thermal environment on man", Centre d'Etudes Bioclimatiques, Strasbourg 1973
- FANGER Povl, *Assessment of man's thermal comfort in practice*, *British Journal of Industrial Medicine*, London 1973
- FRANCESE Dora, *Architettura e vivibilità. Modelli di verifica, principi di biocompatibilità, esempi di opera per il rispetto ambientale*, FrancoAngeli, Milano 2007
- FRANCESE Dora, *Il benessere negli interventi di recupero edilizio*, Diade, Padova 2002
- GAGGE A. P., STOLWIJK J. A. J. e NISHI Y., *An effective temperature scale based on a simple model of human physiological regulatory response*. ASHRAE Transactions 1971

- GILLIES Donald, *Intelligenza artificiale e metodo scientifico*, Raffaello Cortina Editore, Milano 1998
- GROSSO Mario, *La simulazione del movimento dell'aria negli edifici*, in FACONTI Daniela, PIARDI Silvia, *La qualità ambientale degli edifici*, Maggioli, Rimini 1998
- HAY J. E., DAVIES J. A., *Calculation of Solar Radiation Incident on an Inclined Surface*, in *Proc. First Canadian Solar Radiation Data Workshop*, Ministry of Supply and Services, Canada 1990
- HAUSLADEN Gerhard, SAGER Christina, *Climate Design: Solution for Buildings that can do more with less Technology*, Birkhauser, Heidelberg 2006
- HOLMES J. D., *Wind loads on low-rise buildings: The structural and environmental effect of wind on buildings and structures*, Monash University, Melbourne 1986
- HUMPHREYS M. A. e NICOL J. F., *Understanding the adaptive approach to thermal comfort*, ASHRAE Transactions, 1998
- IRIS - ISTITUTO RICERCHE E INTERVENTI SOCIALI, *Politiche economiche e per la competitività di città e reti urbane nella futura programmazione comunitaria*, Roma, 2006
- ISTAT, *La misura della povertà assoluta*, Istat, 2009
- ISTAT, *La povertà relativa in Italia nel 2007*, Istat, 2003
- ISTAT, *La povertà e l'esclusione sociale nelle regioni italiane*, Istat, 2008
- KYLE W. J., *Summer and winter patterns of human thermal stress in Hong Kong*. In KYLE W. J. e CHANG C. P., *Proc. Of the 2nd Int. Conference on East Asia and Western Pacific Meteorology and Climate*, Hong Kong, World Scientific, Hong Kong 1992
- KYLE W. J., *The human bioclimate of Hong Kong*. In BRAZDIL R. e KOLÁŘ, M., *Proceedings of the Contemporary Climatology Conference*, Tisk Litera, Brno 1994
- LUCINI D. et al., *Impact of chronic psychological stress on autonomic cardiovascular regulation in otherwise healthy subject*, in *Hypertension*, American Health Association Journals, USA 2005
- MAGLIETTA V., *Valori normali richiami diagnostici e dati clinici utili in pediatria*, CEA, Milano 1994
- MASTERTON J. M e RICHARDSON F. A., *Humidex, a method of quantifying human discomfort due to excessive heat and humidity*, Environment Canada, Atmospheric Environment Service, Downsview, Ontario 1979
- MECCA Saverio, *Il progetto edilizio esecutivo*, NIS, Roma 1991
- MILNE-THOMSON Louis Melville, *The Calculus of Finite Differences*, MacMillan, Londra 1933
- Ministero dello Sviluppo Economico, *Rapporto annuale del 2006 del Dipartimento per le Politiche di sviluppo e Coesione sugli interventi nelle aree sottoutilizzate*, Roma 2006
- MCCULLOCH Colin, TOURNOUR Michel, GUISET Pierre, *Modal Acoustic Transfer Vectors make Acoustic Radiation Models Practical for Engines and Rotating Machinery*, LMS International, Leuven (Belgium) 2002
- MCNALL P. et al., *Seasonal variation in comfort conditions for college-age persons in the Middle West*, ASHRAE Transactions, 1968
- ÖSTBERG O. e NICHOLL A., *The preferred thermal conditions for 'morning' and 'evening' types of subjects during day and night*, Build International, 1973
- PEPI John W., *The Summer Simmer Index*, Weatherwise, vol.40, n°3, June 1987
- PEPI John W., *The New Summer Simmer Index. International audience at the 80th annual meeting of AMS at Long Beach, California on January 11 2000*, Cal-

- ifornia 2000
- QUARTERONI Alfio, *Modellistica numerica per problemi differenziali*, Springer Verlag Italia, Milano 2008
- SCHARLAU Kurt, *Einführung eines Schwülemasstabes und Abgrenzung von Schwülezeiten durch Isohygrothermen*, Erdkunde, 1950
- THOM E. C. e BOSEN J. F., *The discomfort index*, Weatherwise, 1959
- VOOGD, Hans, *Multicriteria Evaluation for Urban and Regional Planning*, Pion, London 1993
- ZAFFAGNINI Franco, *Per una progettazione esigenziale*, in *Architettura a misura d'uomo*, Pitagora Editrice, Bologna 1994
- ZAFFAGNINI Franco, *Indice Analitico Vol.1*, in *Manuale di Progettazione Edilizia*, Hoepli, Milano 1992
- ZIENKIEWICZ Olgierd, *The finite element method*, Mc Graw Hill, New York 1979

Simboli e abbreviazioni

Simboli generali

<i>Simbolo</i>	<i>Descrizione</i>	<i>Unità</i>
A	Area	m ²
BMI	Body Mass Index	kg m ⁻²
d	Spessore, larghezza, distanza	m
e	Numero di Napier	<i>adim.</i>
F_R	Funzione di ripartizione	%
g	Accelerazione gravitazionale	m s ⁻²
i	Base dei numeri immaginari	<i>adim. cmplx</i>
\Im	Parte immaginaria di un numero complesso	<i>adim.</i>
l	Lunghezza	m
m	Massa	kg
p	Pressione	Pa
P	Percentile	-
p_D	Funzione di densità di probabilità	-
\Re	Parte reale di un numero complesso	<i>adim.</i>
S	Spessore	m
SD	Deviazione standard	<i>adim.</i>
t	Tempo	s
V	Volume	m ³
v	Velocità	m s ⁻¹
W	Peso	kg
Y	Età, anno	anno
z	Altitudine	m
Z	Altezza	m
β	Inclinazione angolare	rad
γ	Azimut	rad
ϑ	Periodo	s
π	Pi greco	<i>adim.</i>
ρ	Massa volumica	kg m ⁻³
φ	Altezza angolare	rad

Pedici generali

<i>ant</i>	Antropizzato	<i>bar</i>	Baricentrico
<i>alt</i>	Altitudine	<i>ce</i>	Del soffitto

<i>cnv</i>	Convenzionale
<i>eq</i>	Equivalentente
<i>fl</i>	Pavimento
<i>gnd</i>	Del suolo
<i>inf</i>	Inferiore
<i>la</i>	Latitudine
<i>lim</i>	Limite
<i>lo</i>	Longitudine
<i>max</i>	Massimo
<i>med</i>	Medio
<i>min</i>	minimo
<i>req</i>	Richiesto, desiderato
<i>ref</i>	Riferimento

<i>rm</i>	Della stanza, unità ambientale
<i>sea</i>	Marino
<i>site</i>	Sito edificato
<i>sky</i>	Cielo
<i>sun</i>	Solare
<i>sup</i>	Superiore
<i>t</i>	Orario
<i>tot</i>	Totale
<i>wd</i>	Della finestra, finestrato
<i>wl</i>	Della parete
\leftrightarrow	Scambiato
\perp	Perpendicolare

Simboli termo igrometrici

<i>a</i>	Diffusività termica	$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$
<i>C</i>	Capacità termica	J K^{-1}
\bar{c}	Capacità termica aerea	J m^{-2}
<i>c</i>	Capacità termica specifica	$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$
<i>c_p</i>	Capacità termica specifica a pressione costante	$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$
<i>c_v</i>	Capacità termica specifica a volume costante	$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$
<i>DI</i>	Indice di discomfort	$^{\circ}\text{C}$
<i>DLE</i>	Durata limite di esposizione	h
<i>DR</i>	Rischio da correnti d'aria	%
<i>E.T.</i>	Equazione del tempo	min
<i>f</i>	Generico coefficiente	<i>adim.</i>
<i>H</i>	Coefficiente di scambio termico	W K^{-1}
<i>h</i>	Coefficiente di scambio termico superficiale	$\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$
\bar{H}	Irradiazione	J m^{-2}
<i>HSI</i>	Indice di stress di calore	%
<i>i_m</i>	Indice di permeabilità totale degli abiti	<i>adim.</i>
\bar{I}	Irradianza	W m^{-2}
<i>I_{req}</i>	Indice di isolamento del vestiario richiesto	$\text{m}^2 \text{K W}^{-1}$
<i>LR</i>	Rapporto di Lewis	K Pa^{-1}
<i>m_j</i>	Matrice di trasferimento termico di un componente monostrato	<i>adim. cmplx</i>
<i>M</i>	Matrice di trasferimento termico di un elemento multistrato	<i>adim. cmplx</i>
<i>n</i>	Tasso di ventilazione	s^{-1}
<i>n₅₀</i>	Tasso di ventilazione a 50 Pa	s^{-1}
<i>PD</i>	Percentuale di insoddisfatti	%
<i>PMV</i>	Voto medio previsto	<i>adim.</i>
<i>PPD</i>	Percentuale prevista di insoddisfatti	%
<i>Q</i>	Quantità di calore	J
<i>q</i>	Densità di flusso termico	W m^{-2}
<i>R</i>	Resistenza termica	$\text{m}^2 \text{K W}^{-1}$
<i>r</i>	Lunghezza rappresentativa	m
<i>RH</i>	Umidità relativa	%
<i>RN</i>	Precipitazioni	mm
<i>RN₀</i>	Giorni di assenza di pioggia	%
<i>T</i>	Temperatura termodinamica	K
<i>U</i>	Trasmittanza termica	$\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$
\dot{V}	Portata volumetrica	$\text{m}^3 \text{s}^{-1}$
<i>w</i>	Percentuale di superficie corporea bagnata	%
<i>WGBT</i>	Indice di temperatura a bulbo umido e globotermometro	$^{\circ}\text{C}$
<i>Z</i>	Matrice di trasferimento termico tra due ambienti attraverso un componente multistrato	<i>adim. cmplx</i>
α	Assorbimento superficiale	<i>adim.</i>
δ	Profondità di penetrazione periodica dell'onda termica	m
δ_{va}	Permeabilità al vapore	$\text{Kg s}^{-1} \text{m}^{-1} \text{Pa}^{-1}$

ε	Emissività superficiale	<i>adim.</i>
ζ	Riflessione	<i>adim.</i>
η	Dimensione dello strato d'aria	m
θ	Temperatura Celsius	°C
θ_{bh}	Indice di temperatura umida	°C
θ_{wci}	Temperatura equivalente di Will Chill	°C
λ	Conduttività termica	W m ⁻¹ K ⁻¹
μ	Esponente per la velocità dell'aria	<i>adim.</i>
ξ	Rapporto tra lo spessore dello strato e la profondità δ	<i>adim.</i>
τ	Trasmissione	<i>adim.</i>
Φ	Flusso termico	W
ϕ	Sfasamento temporale	s
χ	Trasmittanza termica puntuale	W K ⁻¹
Ψ	Trasmittanza termica lineica	W m ⁻¹ K ⁻¹
ω	Frequenza angolare	s ⁻¹

Pedici termo igrometrici

<i>a</i>	Aria, bulbo asciutto	<i>m</i>	Indice di sommatoria
<i>ab</i>	Addome	<i>mr</i>	Medio radiante
<i>an</i>	Caviglia	<i>n</i>	Indice di sommatoria
<i>at</i>	Attenuazione	<i>o</i>	Esterno
<i>b</i>	Diretto	<i>op</i>	Operativo, operante
<i>br</i>	Respiro	<i>oq</i>	Opaco
<i>cd</i>	Conduttivo	<i>ov</i>	Aggetto orizzontale
<i>cv</i>	Convettivo	<i>pd</i>	Perdita di pressione
<i>cl</i>	Vestiario	<i>pr</i>	Asimmetria radiante
<i>cu</i>	Tendaggio, oscuramento	<i>r</i>	Radiativo, radiante
<i>d</i>	Diffuso	<i>rsw</i>	Sudore
<i>ex</i>	Esposizione	<i>S</i>	Solare
<i>Ext</i>	Extraterrestre	<i>SC</i>	Di Scharlau
<i>fin</i>	Aggetto verticale	<i>sh</i>	Schermatura, ombra
<i>fr</i>	Cornice	<i>sk</i>	Pelle
<i>G</i>	Guadagnato	<i>sm</i>	Smorzamento
<i>gl</i>	Vetro	<i>smr</i>	Estivo
<i>gr</i>	Terreno	<i>st</i>	Stress termico
<i>gt</i>	Globotermometro	<i>T</i>	Trasmissione
<i>h</i>	Testa	<i>tr</i>	Trasparente
<i>ho</i>	Orizzontale	<i>U</i>	Trasmittanza
<i>I</i>	Internamente generato	<i>V</i>	Ventilazione
<i>i</i>	Interno	<i>va</i>	Vapore parziale
<i>in</i>	Infiltrato	<i>vs</i>	Vapore di saturazione
<i>j</i>	Indice di sommatoria	<i>W</i>	Lavoro meccanico
<i>k</i>	Indice di sommatoria	<i>wb</i>	Bulbo umido
<i>L</i>	Disperso	<i>wci</i>	Indice Will Chill
<i>lt</i>	Latente	<i>wnt</i>	Invernale
<i>M</i>	Metabolico		

Simboli illuminotecnici

<i>DGI</i>	Indice di abbagliamento	<i>adim.</i>
<i>E</i>	Illuminamento	lx
<i>L</i>	Luminanza	cd m ⁻²
ζ	Riflessione	<i>adim.</i>
η	Fattore di luce diurna	<i>adim.</i>
λ	Lunghezza d'onda	μm
τ	Trasmissione	<i>adim.</i>
Ω	Angolo solido	sr

Pedici illuminotecnici

<i>B</i>	Blu
<i>b</i>	Diretto
<i>d</i>	Diffuso
<i>G</i>	Verde
<i>m</i>	Medio mantenuto
<i>o</i>	Esterno

<i>oq</i>	Opaco
<i>R</i>	Rosso
<i>s</i>	Sorgente luminosa
<i>tr</i>	Trasparente
<i>z</i>	Zenit

Simboli acustici

<i>AT</i>	Attenuazione	dB
<i>D</i>	Correzione direzionale	dB
<i>E</i>	Modulo di Young	MN m ⁻²
<i>fr</i>	Frequenza	Hz
<i>L</i>	Livello di pressione sonora	dB
<i>R</i>	Potere fonoisolante	dB
<i>s'</i>	Rigidità dinamica	MN m ⁻³
<i>α</i>	Coefficiente di assorbimento acustico apparente	<i>adim.</i>
<i>λ</i>	Lunghezza d'onda	m

Pedici acustici

<i>A</i>	Filtro A
<i>atm</i>	Atmosferico
<i>bar</i>	Barriera
<i>cn</i>	Calpestio normalizzato
<i>cy</i>	Cilindrico
<i>day</i>	Giornaliero
<i>dc</i>	Correzione della direzionalità
<i>dif</i>	Diffuso
<i>dir</i>	Diretto
<i>div</i>	Divergenza geometrica
<i>EP</i>	Esposizione personale
<i>fol</i>	Fogliame
<i>gdn</i>	Di fondo (<i>ground noise</i>)
<i>h</i>	Pesante (traffico stradale)
<i>hgw</i>	Autostradale, a scorrimento veloce
<i>hou</i>	Edifici
<i>inc</i>	Pendenza
<i>jet</i>	Aereo
<i>l</i>	Leggero (traffico stradale)
<i>met</i>	Meteorologico
<i>p</i>	Pressione sonora
<i>r</i>	Ricevitore
<i>rdw</i>	Manto stradale
<i>roa</i>	Stradale urbano
<i>s</i>	Sorgente
<i>sp</i>	Sferico
<i>tra</i>	Ferroviario
<i>va</i>	Angolo di vista
<i>w</i>	Potenza sonora

Immagini

Tutte le immagini sono realizzate dall'A., ad eccezione delle seguenti:

Figura 1-2, Figura 1-4 - Immagini tratte dal sito di Ansys Fluent™.

Figura 1-5, Figura 1-6, Figura 1-7 - Lightscape™ 3.2 User Guide, pagg. 188, 189, 193.

Figura 1-10 - Immagini tratte LMS International Sysnoise™ Rev.5.5 User Manual.

Figura 4-5 - UNI 10349, *op. cit.*.

Figura 4-8 - UNI ISO 9613-2, *op. cit.*.

Ringraziamenti

Come tutte le ricerche, anche questo lavoro non potrebbe essere stato portato a termine senza la collaborazione, diretta o indiretta, di tante persone, a cui vanno i miei più sentiti ringraziamenti.

In particolare la Prof. Dora Francese, tutor in questo ciclo di Dottorato, mi ha concesso grande libertà nella scelta e nello sviluppo dell'opera, intervenendo attraverso ponderate e preziose osservazioni che mi hanno consentito di inquadrare il problema in un senso più ampio del termine, allargando i miei orizzonti di conoscenza e cultura, e stimolando la mia attenzione verso problematiche delle quali non avevo tenuto conto.

La Prof. Laura Bellia, co-tutor, mi ha consentito di trovare quel fondamentale aiuto per venire a capo dei problemi legati alla stima dei parametri ambientali, grazie ad un acuto processo di semplificazione e sintesi nella ricerca dei processi di valutazione.

L'Ing. Angelo Bronzino ha permesso, attraverso un paziente lavoro di raccolta, la consultazione della vasta normativa tecnica sulla quale sono state elaborate numerose considerazioni, senza le quali il lavoro sarebbe risultato povero di contenuti e riferimenti scientifici.

La mia famiglia ha ancora una volta dimostrato di condividere ed appoggiare le mie scelte, rendendomi la quotidianità più semplice, permettendomi conseguentemente di poter dedicare più tempo alla ricerca.

Ed infine ringrazio mia moglie che, con la sua dedizione, ha saputo regalarmi la serenità necessaria ad affrontare il lavoro e le difficoltà della vita, offrendomi nuovi e più importanti motivi per migliorare professionalmente e culturalmente.

Grazie a tutti.

