

dei rilievi strumentali dei VOC totali, si può fare riferimento alle linee guida dell'OSHA che fissano un livello di esposizione permissibile (PEL) a 750 ppb (parti per miliardo) e un livello di comfort compreso tra 70 e 450 ppb. Alcuni lavori di letteratura evidenziano che le concentrazioni indoor di VOC possono variare entro un ampio range anche in funzione dell'età degli edifici. In riferimento agli edifici scolastici Il *Nordic Committee on Building Regulations* indica che i VOC totali riscontrati in tali ambienti variano tra 0.05 e 0.3 mg/m<sup>3</sup>. Studi condotti in scuole del Canada e degli USA riportano valori misurati compresi tra 0 e 1,295 mg/m<sup>3</sup> (valore medio: 1.56 ppm corrispondenti a circa 390 µg/m<sup>3</sup>).

#### **Correlazione tra TVOC e CO<sub>2</sub>**

Considerando una tipica velocità di generazione di bioeffluenti, i VOC totali raggiungono il livello di 200 µg/m<sup>3</sup> quando la CO<sub>2</sub> raggiunge le 755 ppm (*di cui 390 ppm come contributo di bioeffluenti e 365 dell'ambiente*). In modo equivalente una concentrazione di 100 ppm per la CO<sub>2</sub> corrisponderebbe a 330 µg/m<sup>3</sup> di bioeffluenti. Un approccio più razionale ma più difficile da realizzare potrebbe focalizzarsi su quei VOC che causano irritazione delle mucose, cancro ed altri effetti avversi.

#### **Monitoraggi ambientali**

Le indagini ambientali sono state svolte all'interno di aule, laboratori, uffici e palestre tenendo conto della localizzazione delle sorgenti di inquinamento outdoor situate nelle vicinanze degli edifici scolastici, con particolare riferimento all'incidenza del traffico veicolare. Gli ambienti sono risultati caratterizzati esclusivamente da ventilazione naturale. Ai fini dell'indagine sono state acquisite informazioni sul numero di ricambi d'aria per aula nei diversi periodi e stagioni dell'anno.

Per i vari ambienti è stato inoltre calcolato il rapporto cubatura/numero di occupanti poiché tale fattore è spesso responsabile del peggioramento della qualità dell'aria a causa della prolungata permanenza degli studenti nelle aule, in mancanza di una adeguata aerazione dei locali. In ragione delle modalità di svolgimento delle lezioni, nelle quali il movimento degli occupanti è fortemente limitato, si è preferito effettuare rilievi d'area piuttosto che di tipo personale. Le misure sono state eseguite con il rilevatore portatile Monitor Multi gas PGM-50 della Rae Systems, che fornisce un monitoraggio continuo di:

- composti organici (VOC) attraverso un detector a foto-ionizzazione (PID);
- anidride carbonica (CO<sub>2</sub>) attraverso un sensore a infrarossi non dispersivo (NDIR).

I valori di concentrazione dei gas rilevati sono aggiornati dallo strumento in tempo reale ed espressi in ppm. La Tabella 4.1.2.5 riporta il campo di misura, la risoluzione ed il tempo di risposta dello strumento per gli analiti indagati, mentre la Tabella 4.1.2.6 contiene la sintesi delle condizioni operative dello strumento nella sua configurazione di base.

**Tabella 4.1.2.5** - Campo di misura, risoluzione e tempo di risposta dei sensori disponibili

Analita	Campo di misura (ppm)	Risoluzione	Tempo di risposta (sec)
CO <sub>2</sub>	0÷50.000	10	60
VOC	0÷200	0,1	10
	200÷2000	1	10
O <sub>2</sub>	0÷30%	0,1%	15

**Tabella 4.1.2.6** - Specifiche del Monitor Multi gas PGM-50 nella configurazione base

misura concentrazione VOC	misura contemporanea di 3 gas con pompa di campionamento e datalogging
misura concentrazione CO <sub>2</sub> CO <sub>2</sub> misura di gas tossico	sensore PID (10,6 eV) a banda aperta sensore NDIR (a infrarossi non dispersivo) sensore elettrochimico selettivo
flusso pompa di campionamento	150 cc/min
intervallo di datalog	programmabile da 1 a 3600 sec
calibrazione	due punti di calibrazione (aria pulita e gas standard di riferimento)

Il sensore PID, di tipo “a banda aperta”, effettua la misura dei VOC totali, comprendendo una vasta serie di analiti contraddistinti da un potenziale di ionizzazione inferiore o uguale a 10,6 eV. Livelli significativi di VOC totali aerodispersi, come pure la presenza di particolari sorgenti inquinanti ineliminabili, potrebbero giustificare campionamenti “mirati”, da condurre con metodi più selettivi e più sensibili (per esempio di tipo cromatografico) in grado di individuare e quantificare sostanze chimiche appartenenti a classi diverse.

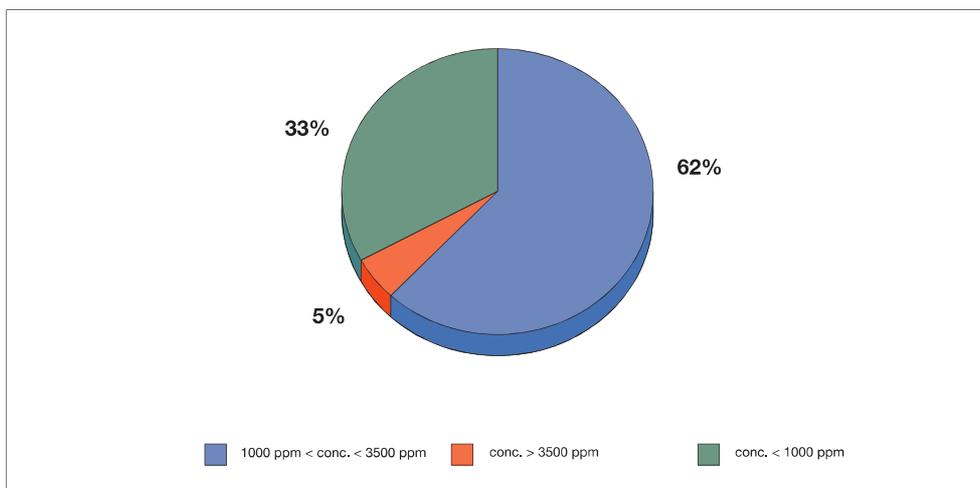
### **Risultati**

I risultati dei rilievi di CO<sub>2</sub> (per un numero totale di 87) sono stati raggruppati in tre intervalli di concentrazione e riportati nel diagramma di Figura 4.1.2.2

che mostra la distribuzione percentuale di tali livelli di concentrazione media riscontrata negli ambienti oggetto di indagine.

Tutti i valori di concentrazione superiori a 3500 ppm sono stati riscontrati nel corso di monitoraggi condotti nel periodo freddo così come la maggior parte dei livelli di concentrazione compresi tra 1000 e 3500 ppm. Tale evidenza è da mettere in relazione con il minor numero di ricambi d'aria normalmente effettuati d'inverno, che determinano l'aumento della concentrazione della CO<sub>2</sub> dell'aria negli ambienti oggetto di monitoraggio. Non sono state osservate correlazioni dei dati raccolti né con la tipologia di ambiente (aula, laboratorio, palestra, ufficio) né con l'indice di affollamento, laddove è stato possibile calcolarlo.

I livelli di TVOC sono risultati sempre prossimi al limite di rivelabilità dello strumento. Sul totale dei rilievi effettuati (in numero di 87), una quota pari all'84% è risultata inferiore a 0,1 ppm ed una pari al 16% è risultata compresa tra 0,1 e 0,5 ppm. Ciò attesta che i livelli riscontrati sono al di sotto dei valori medi riportati negli studi di letteratura.



**Figura 4.1.2.2** - Distribuzione percentuale dei livelli di concentrazione media di CO<sub>2</sub> rilevati.

### 4.1.3 Il rischio radon

#### *La radioattività*

Alcuni elementi chimici, detti radionuclidi o radioisotopi<sup>21</sup>, sono instabili: in virtù di un processo detto “decadimento radioattivo”, questi tendono infatti a trasformarsi in atomi di altri elementi emettendo particelle subatomiche e radiazioni ad alta energia, quali i raggi X o  $\gamma$ . Le particelle e i raggi emessi vengono definiti “radiazioni ionizzanti”, in virtù della loro capacità di ionizzare e modificare gli atomi della materia circostante. Il processo citato può avere origine artificiale o naturale: in quest’ultimo caso, estremamente frequente e molto più diffuso di quanto si pensi, le radiazioni ionizzanti possono provenire dal cosmo o essere generate dai radioisotopi primordiali, presenti sulla Terra fin dalla sua formazione, o dai loro prodotti di decadimento.

Le radiazioni ionizzanti hanno la capacità di modificare i tessuti cellulari che ne vengono colpiti. In particolare, gli effetti possono essere rilevanti quando modificano la struttura del DNA. Il contatto tra le radiazioni ionizzanti e i tessuti umani avviene per semplice esposizione esterna, per ingestione di sostanze contaminate o per inalazione. Tra tutte le sorgenti naturali di radiazioni, quella che ha la maggiore rilevanza dal punto di vista sanitario è il radon (Rn).

#### *Il radon*

Il radon è un gas nobile, inodore, insapore, incolore e chimicamente inerte. Il suo isotopo  $^{222}\text{Rn}$ , il più rilevante dal punto di vista sanitario, deriva dal decadimento radioattivo dell’Uranio 238 ( $^{238}\text{U}$ ), un radioisotopo primordiale presente nelle varie rocce della crosta terrestre. Come per tutti i radionuclidi, la distribuzione di  $^{238}\text{U}$  non è uniforme: esso può essere più o meno abbondante in funzione della natura delle rocce e dei minerali presenti nelle diverse aree geografiche. I valori di concentrazione più elevati si riscontrano nelle zone caratterizzate dalla presenza di formazioni geologiche di origine intrusiva o effusiva<sup>22</sup>. Il territorio laziale è interessato dalla presenza diffusa di coltri laviche e piroclastiche e quindi da alte concentrazioni di  $^{238}\text{U}$ , dal cui decadimento si origina una serie di “figli”, anch’essi radioattivi, tra cui il  $^{222}\text{Rn}$ . Questo, attraverso una serie di decadimenti radioattivi  $\alpha$  e  $\beta$ , si trasforma in elementi metallici, anch’essi radioattivi e caratterizzati da brevi periodi di decadimento.

21 Gli isotopi sono atomi dello stesso elemento chimico aventi uguale numero atomico e differente numero di massa per effetto di un diverso numero di neutroni nel nucleo.

22 Le rocce magmatiche si distinguono in diverse tipologie in funzione della loro genesi: si definiscono intrusive quelle originate da magmi solidificati all’interno della crosta terrestre; le rocce effusive si formano per solidificazione di magmi sulla superficie terrestre; tra queste le rocce piroclastiche sono costituite dall’insieme dei prodotti esplosivi di un’eruzione vulcanica (piroclasti) che cadono sul suolo per costituire depositi incoerenti (es. pozzolane) o compatti (es. tufi).

Lo stato gassoso del radon rende possibile la sua inalazione; anche gli ioni metallici radioattivi che vengono prodotti a seguito del suo decadimento, legati al particolato aerodisperso, possono essere introdotti nei polmoni.

Alcuni di questi ioni, come il polonio 218 ( $^{218}\text{Po}$ ), il piombo 214 ( $^{214}\text{Pb}$ ), il bismuto 214 ( $^{214}\text{Bi}$ ) ed il polonio 214 ( $^{214}\text{Po}$ ), hanno vita brevissima (figura 4.1.3.1): una volta introdotti nei polmoni, essi si depositano negli alveoli dove, per effetto del rapido decadimento, iniziano a irradiare con alta energia i tessuti circostanti, innescando processi di modificazione del DNA cellulare e, in tal modo, aumentando il potenziale rischio di insorgenza di tumori.

Il radon prodotto nelle rocce della crosta terrestre può fuoriuscirne per diluirsi nell'atmosfera: la sua concentrazione in aria risulta generalmente molto bassa, tale da non costituire un rischio per la salute della popolazione. Esso può invece costituire un rischio rilevante dal punto di vista sanitario negli ambienti confinati (*radon indoor*) dove, in determinate condizioni, può raggiungere concentrazioni tali da risultare pericoloso per la salute.

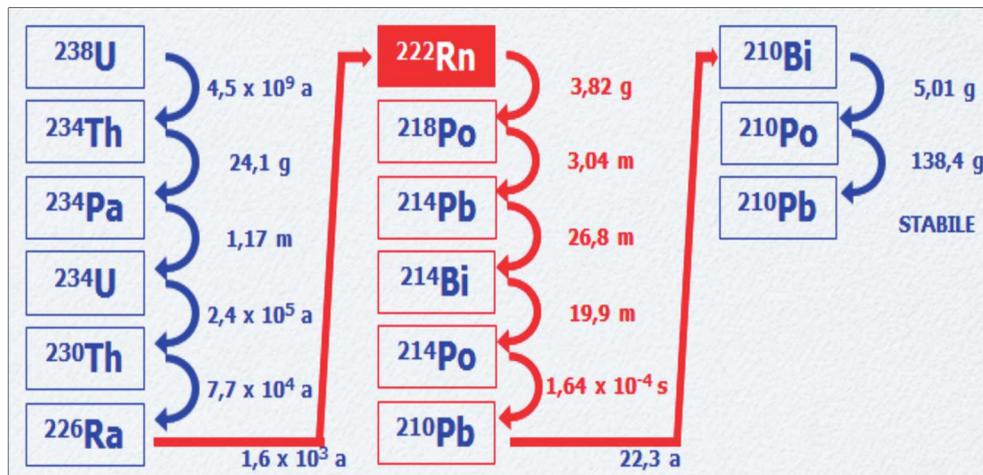


Figura 4.1.3.1 - Catena di decadimento del  $^{238}\text{U}$ . Sono riportati i periodi di dimezzamento dei diversi isotopi.

Il radon, trasportato dai fluidi sotterranei, tende a migrare dalle rocce in cui si è formato per risalire verso la superficie e penetrare nella parte inferiore degli edifici attraverso discontinuità strutturali, quali piccole crepe, fessure o pori. Di conseguenza, il principale apporto di radon in un edificio può provenire dalla zona delle fondazioni, in particolar modo se le rocce sottostanti sono caratterizzate da alte concentrazioni di  $^{238}\text{U}$ . In questo caso il radon

tende ad accumularsi nei piani più bassi dell'edificio: in particolare, saranno interessati da questo fenomeno i piani interrati e seminterrati.

Un apporto ulteriore, a volte non secondario, è rappresentato dai materiali con i quali vengono realizzati gli elementi strutturali degli edifici (muri, tamponature e intonaci) che, in virtù della loro natura, possono emettere quantità di radon non trascurabili.

Nel caso del Lazio, la disponibilità di rocce di natura effusiva e piroclastica ha favorito il loro diffuso impiego come materiali da costruzione. Soprattutto nel caso di edifici meno recenti, per i quali l'impiego del cemento armato è stato limitato o nullo, la concentrazione di radon proveniente da tali materiali può essere maggiore di quella imputabile alla risalita dei fluidi sotterranei. In questi casi la concentrazione di radon tende a essere elevata tanto nei piani alti quanto in quelli bassi degli edifici.

Un contributo aggiuntivo alla concentrazione di radon negli ambienti chiusi, nella maggior parte dei casi non superiore all'1%, può derivare dall'acqua, nella quale tale gas è solubile.

La concentrazione del radon indoor è soggetta a variazioni temporali (giorno e notte, stagione calda e fredda); inoltre essa può essere diversa nei vari locali di un edificio, in particolar modo se situati su piani differenti. La concentrazione è influenzata poi da alcuni parametri:

- differenza di temperatura: può determinare migrazioni di radon verso l'interno di un edificio. Se al suo interno la temperatura risulta maggiore di quella esterna (cosa che avviene durante la notte o nei mesi invernali), si crea una situazione di depressione che favorisce la risalita dei gas (e quindi del radon) dal sottosuolo attraverso piccole crepe, fessure e pori (*effetto camino*);
- differenza di pressione: può determinare la migrazione del radon verso l'interno o l'esterno di un fabbricato. In particolare un abbassamento di pressione all'interno di un edificio può determinare l'ingresso del radon nello stesso;
- ventilazione: in assenza o scarsità di scambio d'aria con l'esterno, la concentrazione di radon può essere significativa.

Lo stato di conservazione del fabbricato può essere determinante nella dinamica di propagazione del radon: in condizioni strutturali non ottimali, la presenza di piccole fessure nelle opere murarie favorisce la diffusione di questo gas nei diversi locali, compresi quelli situati ai piani più alti.

Anche l'umidità e la polverosità dell'aria sono parametri rilevanti per quanto riguarda il rischio: in presenza di pulviscolo aerodisperso e di particelle di acqua, i prodotti del decadimento del radon vi possono aderire per essere poi veicolati all'interno delle vie respiratorie.

Per quanto il rischio imputabile al radon sia da annoverare tra quelli meno noti, esso è conosciuto da tempo come responsabile di un gran numero di casi di tumori polmonari. Nel 1977 l'UNSCEAR (Comitato Scientifico delle Nazioni Unite sugli Effetti della Radiazione Atomica) ha riconosciuto nel radon la principale sorgente di radiazioni ionizzanti a cui risulta esposta la popolazione; nel 1988 la IARC (Agenzia Internazionale per la Ricerca sul Cancro) ha classificato il radon come cancerogeno di gruppo 1, collocandolo al secondo posto quale causa di tumori ai polmoni dopo il fumo di tabacco.

### ***Il radon nelle scuole***

Per conoscere l'entità del rischio di esposizione al radon all'interno di un edificio è necessario misurare la sua concentrazione nei vari ambienti, al fine di individuare ed attuare le eventuali misure di prevenzione. Le scuole rientrano a tutti gli effetti tra gli ambienti in cui la concentrazione del radon può raggiungere, in determinate situazioni, livelli tali da rappresentare un rischio.

Il Capo III-bis del D.Lgs. 241 del 31.10.2000, in attuazione della direttiva 96/29/Euratom in materia di protezione sanitaria della popolazione e dei lavoratori contro i rischi derivanti dalle radiazioni ionizzanti, tratta l'esposizione dei lavoratori alle radiazioni ionizzanti di origine naturale. In esso vengono riportate le attività per le quali deve essere valutata ed eventualmente ridotta l'esposizione dei lavoratori alle sorgenti naturali di radiazioni ionizzanti, con particolare riguardo al radon.

In particolare, il citato decreto puntualizza che le deroghe previste dall'art. 10 *quinquies* comma 5 (obbligo di valutare il rischio radon), non possono essere applicate alle attività svolte negli asili nido, nelle scuole dell'infanzia e in quelle dell'obbligo, in ragione della giovane età della popolazione studentesca, particolarmente sensibile agli effetti del radon.

Anche se le scuole superiori, oggetto della presente indagine, non vengono citate nel suddetto decreto, si è ritenuto opportuno approfondire la conoscenza dell'inquinamento da radon nei loro ambienti, in virtù della suscettibilità dei giovani ai danni provocati dalle radiazioni ionizzanti.

Al fine di disporre di un quadro esaustivo della situazione di rischio da radon nelle scuole, si è ritenuto opportuno effettuare alcuni sopralluoghi volti all'individuazione degli ambienti in cui, per effetto della loro ubicazione, fosse presumibile riscontrare elevate concentrazioni di radon. I criteri di scelta dei suddetti ambienti hanno tenuto conto delle seguenti caratteristiche:

- posizione dei locali rispetto al piano terra;
- natura dei materiali da costruzione;
- ventilazione;
- stato di conservazione dell'edificio.

In linea generale le misure, eseguite nel corso delle normali attività didattiche o di lavoro, hanno riguardato in prevalenza i locali situati nei piani interrati, seminterrati e al piano terra. Nei luoghi in cui sono state effettuate le misure, la ventilazione era naturale.

### **Strumentazione e strategia di indagine**

Per tenere conto delle variazioni giornaliere della concentrazione nei diversi ambienti, le misure sono state protratte per un periodo di circa un mese; per evidenziare la fluttuazione stagionale della concentrazione di attività del radon, le misure hanno riguardato sia il periodo "freddo" che quello "caldo"<sup>23</sup>. La scelta della strumentazione si è quindi orientata su dispositivi passivi, nei quali il radon penetra per diffusione fino a quando la concentrazione al loro interno diviene pari a quella dell'ambiente in cui vengono effettuate le misure. Si ottiene così una misura integrata nel periodo di campionamento, che rende conto della concentrazione media di radon che caratterizza l'ambiente in esame.

A tale scopo sono stati utilizzati dei dosimetri a elettrete, consistenti in camere di materiale plastico aventi volume noto, in ciascuna delle quali viene inserito un disco in teflon (elettrete) elettrostaticamente carico. Il radon penetrato nella camera, decadendo, determina la diminuzione del potenziale dell'elettrete. Misurando i valori del potenziale con un voltmetro prima e dopo il periodo di esposizione nell'ambiente, si può risalire, per mezzo di un algoritmo, alla concentrazione del radon. Il sistema ad elettreti consente di adottare diverse configurazioni (tipologie di camere e di elettreti utilizzati) in funzione della durata della misura. Nel presente studio, la configurazione scelta per i dosimetri è stata quella di tipo LST (*camera Long Term - elettrete Short Term*), idonea per misure di durata compresa tra 15 e 30 giorni.

La riduzione del potenziale dell'elettrete risente tuttavia, oltre che della presenza del radon, anche del fondo  $\gamma$ . Per conoscere la sola radioattività imputabile al radon, è necessario misurare la caduta totale del potenziale imputabile al fondo  $\gamma$ , da sottrarre alla differenza di potenziale rilevata. A tal fine sono stati impiegati dei dosimetri chiusi in una busta impermeabile al radon. Laddove non è stato possibile effettuare la misura del fondo  $\gamma$ , si è fatto ricorso ai dati di bibliografia.

La *performance* del voltmetro è stata verificata, in occasione di ciascun impiego, per mezzo di tre elettreti di riferimento aventi potenziale noto.

---

<sup>23</sup> Ai fini del confronto con il livello di azione (500 Bq/m<sup>3</sup>) indicato dal D.Lgs. 241/2000, le misure dovrebbero essere protratte per un anno

## Risultati

I dati relativi alla concentrazione di Radon nei vari ambienti indagati sono riportati nella tabella 4.1.3.1. I valori rilevati, sebbene non trascurabili, denotano concentrazioni di radon generalmente inferiori al livello di azione, inteso come concentrazione di attività media annua, di 500 Bq/m<sup>3</sup>.

**Tabella 4.1.3.1** - Valori di concentrazione di <sup>222</sup>Rn (Bq/m<sup>3</sup>) nei locali degli Istituti monitorati. In grassetto sono evidenziati i valori di concentrazione superiori al livello di azione, fissato dal D.Lgs. 241/2000 nella misura di 500 Bq/m<sup>3</sup>. A tale proposito si ricorda comunque che i valori misurati non sono relativi al periodo di un anno indicato dal suddetto decreto.

ISTITUTO	LOCALE	Livello	Concentrazione <sup>222</sup> Rn (Bq/m <sup>3</sup> )	
			Periodo freddo	Periodo caldo
B	Archivio	seminterrato		148±22
	Archivio didattica	seminterrato	103±19	
	Palestra	piano terra	138±21	
C	Archivio	seminterrato		275±28
	Biblioteca	seminterrato	206±24	158±22
	Aula professori	piano terra	203±24	
D	Laboratorio di chimica 1	seminterrato	<b>625±49</b>	274±28
	Ripostiglio laboratorio di chimica	seminterrato	<b>621±49</b>	
	Laboratorio di microbiologia	piano terra	265±27	232±26
E	Laboratorio di cucina 1	seminterrato	266±34	
	Laboratorio di pasticceria	seminterrato	256±33	
	Sala da pranzo	seminterrato	217±32	
H	Aula di musica	interrato	229±24	
	Aula magna	interrato	<b>682±66</b>	
	Laboratorio di fisica	interrato	173±22	

I dati relativi al periodo freddo risultano più elevati rispetto a quelli rilevati nella stagione calda e, in alcuni casi, testimoniano un inquinamento da Radon superiore al livello di azione. I valori superiori al livello di azione sono probabilmente imputabili a un ridotto ricambio d'aria, dovuto alla mancanza di sistemi di ventilazione; questa condizione favorisce nei mesi freddi una maggiore concentrazione del gas, poiché le condizioni climatiche avverse non favoriscono l'apertura delle finestre. In buona parte dei casi, le misure hanno interessato edifici di fattura relativamente recente, i cui materiali da costruzione sono costituiti da calcestruzzo e intonaci a base di gesso, calce

e cemento. Tale condizione fa supporre che il radon misurato all'interno degli edifici abbia origine nel sottosuolo e penetri all'interno degli ambienti, risalendo attraverso le discontinuità degli elementi murari.

I dati ottenuti risultano solo indicativi della situazione in atto e non hanno valore rappresentativo della reale concentrazione del radon all'interno dell'edificio che, a norma di legge, devono essere misurati su base annua. Ai fini del presente studio, si è ritenuto utile evidenziare le variazioni stagionali della concentrazione di attività del radon.

#### 4.1.4 Microclima

##### *Introduzione*

Nell'accezione generale il termine "microclima" comprende una gamma di parametri fisici che influenzano e caratterizzano il clima di un ambiente lavorativo. In senso più stretto questo termine, oltre a descrivere le condizioni climatiche di un ambiente, serve a definire il grado di benessere degli occupanti. Le condizioni microclimatiche degli ambienti di lavoro possono variare in funzione di:

- *ciclo produttivo (attività lavorative svolte in condizioni di temperatura particolari, come ad esempio: fonderie, industrie di conservazione di alimenti ecc.);*
- *caratteristiche ambientali (lavori in sotterraneo, in altura ecc.);*
- *caratteristiche dei luoghi di lavoro (posizione geografica, orientamento degli edifici, caratteristiche architettoniche, natura dei materiali costruttivi ecc.);*
- *presenza di impianti di condizionamento dell'aria (ventilatori, condizionatori ecc.).*

Nella maggior parte dei casi, le condizioni microclimatiche rappresentano un fattore di tipo ergonomico che influisce sul senso di benessere e di comfort percepito. In casi estremi, al contrario, queste possono determinare condizioni di vero e proprio rischio per la salute. Gli attuali obblighi di legge, proseguendo il percorso di tutela globale del benessere del lavoratore intrapreso da più di un decennio, pongono particolare attenzione ai fattori "ergonomici" che, pur non costituendo causa di patologie professionali invalidanti, come nel caso di agenti di rischio più "tradizionali" (rumore, vibrazioni, agenti chimici,...), influiscono sul grado di benessere psicofisico del lavoratore.

Le attività didattiche, svolte per la maggior parte all'interno di ambienti confinati, richiedono adeguate condizioni di benessere microclimatico, poiché questo influenza il livello di attenzione e di concentrazione degli studenti e, in ultima analisi, il loro grado di apprendimento: in tal senso va sottolineato

come spesso gli occupanti, come è emerso dai questionari conoscitivi compilati dagli studenti, lamentano situazioni di disagio più o meno evidente anche a causa delle condizioni climatiche.

Negli Istituti scolastici interessati dal progetto sono stati effettuati rilievi microclimatici e analizzati i valori degli indici di benessere calcolati per gli studenti, i docenti e per gli addetti all'area amministrativa, durante il normale svolgimento della loro attività.

I parametri misurati, oltre a descrivere il microclima delle diverse scuole, hanno costituito un ulteriore elemento di valutazione per l'analisi dei dati di contaminazione microbiologica (funghi, batteri, muffe,...) presente all'interno degli ambienti visitati, essendo i microorganismi sensibili ai valori di temperatura e umidità ambientale. Per verificare la variabilità climatica legata al ciclo delle stagioni, le misure sono state eseguite nel periodo "freddo" (gennaio-marzo) e replicate nel periodo "caldo" (maggio-giugno).

### ***Benessere termico***

Con la definizione microclima si fa qui riferimento ai valori di temperatura dell'aria, umidità relativa, temperatura radiante e velocità dell'aria che, integrati dai parametri individuali rappresentati dal dispendio metabolico e dall'isolamento termico prodotto dal vestiario, condizionano l'entità dello scambio termico che si instaura tra uomo e ambiente. Lo stato di **benessere termico** descrive la condizione in cui il soggetto non avverte né caldo né freddo (neutralità termica o omeotermia): un microclima confortevole è quello che, in definitiva, suscita nella maggior parte degli individui presenti una sensazione di gradimento (o comfort termico) sia relativa alla situazione in generale (*comfort globale*) sia in riferimento a specifiche parti del corpo (*comfort localizzato*). Riguardo quest'ultimo aspetto è infatti possibile che, pur in presenza di valori ottimali dei parametri climatici coesistano, localmente, situazioni meno soddisfacenti causate dalla presenza di correnti d'aria o da una distribuzione delle temperature non omogenea all'interno degli ambienti. La situazione ottimale è rappresentata quindi dalla condizione in cui nessuna causa (generale o locale) induce *discomfort* nel soggetto.

Analizzare il microclima equivale quindi a valutare lo scostamento delle condizioni microclimatiche reali dagli *standard* di benessere definiti dalle norme tecniche che, oltre certi limiti, può arrecare un notevole disagio; meno frequentemente riguarda la possibilità che i parametri ambientali generino un vero e proprio rischio per la salute.

### ***Bilancio termico dell'organismo***

Il nucleo del corpo (organi vitali), circondato dal suo rivestimento di tessuti (*muscoli, pelle, ecc*) che lo isolano dall'ambiente esterno, produce calore.

L'organismo umano, grazie all'ipotalamo<sup>24</sup>, è in grado di regolare la temperatura interna intorno ai 37 °C ( $\pm 0,5$  °C), limitandone le oscillazioni. In questa situazione le varie funzioni e i processi biochimici vitali sono in grado di attivarsi con la massima efficienza. Modificazioni della temperatura interna possono comunque verificarsi per limitati periodi o in condizioni particolari, come ad esempio durante lo svolgimento di *esercizio fisico* o *per effetto della digestione*.

L'organismo scambia energia termica con l'ambiente circostante, emettendo (o assorbendo) calore. Il bilanciamento tra il contributo di calore prodotto a seguito dei processi metabolici e quello disperso (o assorbito) per convezione, irraggiamento, contatto o per effetto della sudorazione viene definito con il termine omeotermia<sup>25</sup>. L'organismo tende a conservare e preservare questa condizione di equilibrio: nel caso in cui questo viene alterato dalla variazione dei parametri ambientali e/o soggettivi, l'organismo attiva specifici processi di termoregolazione per limitare la dispersione di calore, in caso di raffreddamento (vasocostrizione, effetto indotto dai brividi), o incrementarla (vasodilatazione, sudorazione) in caso di riscaldamento.

---

24 L'ipotalamo è una struttura del sistema nervoso centrale nel quale vengono attivate e regolate alcune funzioni vitali come l'attività endocrina, la termoregolazione e le fasi di veglia e di sonno.

25 Una frazione minima di calore viene scambiata attraverso la respirazione.

### Leggi e norme di riferimento

L'art. 180 del D.Lgs. 81/08, pur inserendo il microclima tra gli agenti fisici per i quali il datore di lavoro ha l'obbligo di effettuare la relativa valutazione, non dedica un capo specifico a questo rischio. Indicazioni di massima riguardo l'adeguatezza dell'aerazione, della temperatura e dell'umidità da considerare per i luoghi di lavoro sono contenute nell'allegato IV del suddetto decreto, dedicato agli ambienti di lavoro in generale; in esso tuttavia non vengono fornite indicazioni di tipo quantitativo sui valori dei parametri microclimatici da rispettare. Riferimenti normativi specifici per la valutazione del rischio microclimatico, sono riportati nella tabella:

<b>UNI EN ISO 7726: 2002</b>	Ergonomia degli ambienti termici: Strumenti per la misurazione delle grandezze fisiche
<b>UNI EN ISO 7730: 2006</b>	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
<b>UNI EN ISO 8996: 2005</b>	Ergonomia dell'ambiente termico: Determinazione del metabolismo energetico
<b>UNI EN ISO 9920: 2009</b>	Ergonomia dell'ambiente termico: Valutazione dell'isolamento termico e della resistenza evaporativa dell'abbigliamento
<b>UNI EN ISO 10551: 2002</b>	Ergonomia degli ambienti termici: Valutazione dell'influenza dell'ambiente termico mediante scale di giudizio soggettivo
<b>UNI EN ISO 11399: 2001</b>	Ergonomia degli ambienti termici: Principi e applicazione delle relative norme internazionali
<b>UNI EN ISO 13731: 2004</b>	Ergonomia degli ambienti termici: Vocabolario e simboli
<b>UNI EN ISO 14505-2: 2006</b>	Ergonomia degli ambienti termici: Valutazione dell'ambiente termico nei veicoli - Parte 2: Determinazione della temperatura equivalente
<b>UNI EN ISO 14505-3: 2007</b>	Ergonomia degli ambienti termici: Valutazione dell'ambiente termico nei veicoli - Parte 3: Valutazione del benessere termico mediante l'utilizzo di soggetti umani
<b>UNI EN 15251: 2008</b>	Criteri per la progettazione dell'ambiente interno e per la valutazione della prestazione energetica degli edifici, in relazione alla qualità dell'aria interna, all'ambiente termico, all'illuminazione e all'acustica

### Valutazione del comfort termico

Gli ambienti termici si classificano convenzionalmente in **severi**, caldi o freddi, dove le condizioni ambientali estreme costituiscono un fattore di rischio vero e proprio, e **moderati**, nei quali lo stress indotto dalla situazione climatica è ridotto per l'assenza di importanti scambi termici fra soggetto e ambiente, in presenza quindi di condizioni termo-igrometriche in cui gene-

ralmente le condizioni termo-igrometriche non subiscono eccessive fluttuazioni temporali dei parametri. Ogni ambiente termico richiede modalità di valutazione diverse, basate su specifici indici di riferimento.

Gli ambienti scolastici, al pari di quelli d'ufficio, possono essere classificati tra quelli di tipo "moderato". In essi le condizioni climatiche non compromettono l'incolumità degli occupanti, ma possono alterare il loro benessere psicofisico, condizionando l'efficacia dell'apprendimento. In queste condizioni occorre analizzare lo scostamento della situazione reale da quella di benessere (omeotermia) mediante il calcolo di indici di *comfort* climatico, per determinare i quali è necessario misurare i parametri ambientali e definire i valori del *dispendio metabolico M*, ovvero la quantità totale di energia prodotta dall'organismo, dell'*isolamento termico Icl* dovuto al vestiario e del *rendimento meccanico h*, che misura la percentuale di energia metabolica effettivamente trasformata in lavoro ( $h = W/M$ )<sup>26</sup>.

A partire dai valori delle grandezze fondamentali e di quelle personali, si calcola una coppia di indici di benessere specifici, denominati **PMV** (*Predicted Mean Vote -Voto Medio Previsto*) e **PPD** (*Percentage of Person Dissatisfied -percentuale prevedibile di insoddisfatti*), entrambi ideati da Fanger<sup>27</sup>. Gli indici consentono di valutare le condizioni di *comfort* globale per un soggetto che si trovi in un ambiente confinato. Oltre al grado di *comfort* globale occorre valutare anche i fattori di disagio localizzati determinati ad esempio dalla presenza di correnti d'aria, da una temperatura del pavimento inadeguata (troppo alta o troppo bassa), o dalla distribuzione non omogenea delle temperature interne (condizioni di asimmetria).<sup>28</sup>

26 La loro corretta determinazione è fondamentale per ottenere risultati descrittivi del rischio reale da stress legato al microclima. Il metabolismo rappresenta uno dei parametri basilari della valutazione. Può essere calcolato sia con *metodi diretti* (misurando ad esempio il quantitativo di ossigeno consumato) o con metodi indiretti, derivando i valori da tabelle della norma UNI EN ISO 8996 in funzione del tipo di attività lavorativa. Per stimare il grado di isolamento offerto dall'abbigliamento si utilizzano le tabelle riportate dalla norma UNI EN ISO 9920, che forniscono i valori di resistenza termica sia dei singoli capi di vestiario (quotidiani o da lavoro) sia di quelli relativi a specifici "set". Per quanto riguarda infine il valore del rendimento meccanico, va rilevato che, in linea generale, gran parte dell'energia metabolica prodotta durante un'attività lavorativa viene trasformata in calore e solo una frazione minima viene convertita in energia meccanica (lavoro utile). Nella maggior parte delle lavorazioni il rendimento meccanico può essere ritenuto inferiore al 5%.

27 Entrambi gli indici sono basati sull'equazione del bilancio termico dell'organismo secondo un approccio di tipo psicofisiologico che tiene conto dei parametri ambientali e del tipo di attività svolta dal soggetto. Secondo la norma ISO 7730 gli ambienti termici moderati sono caratterizzati da parametri fisici variabili entro intervalli ben definiti e cioè: temperatura dell'aria secca ( $T_a$ ) compresa tra 10 e 30°C; temperatura media radiante ( $T_r$ ) compresa tra 10 e 40 °C; umidità relativa ( $U_r$ ) compresa tra 30 e 70 %; velocità dell'aria ( $V_a$ ) compresa tra 0 e 1 m/s. La norma UNI 7730 utilizza l'indice PPD per giudicare il comfort di un ambiente di lavoro moderato, raccomandando che esso sia inferiore al 10%: ciò corrisponde ad un valore di PMV compreso tra -0,5 e + 0,5.

28 Si tratta di differenze di temperatura eccessive tra il livello della testa e quello delle caviglie (gradienti verticali di temperatura) o dovute alla presenza di sorgenti radianti nell'ambiente.

### **Strumentazione per la misura analitica e metodologia di misura**

Per la rilevazione dei dati microclimatici è stata impiegata una centralina di acquisizione dati LSI modello Babuc A, dotata di memoria residente alla quale vengono collegati sensori per la misura delle grandezze fondamentali conformi alla norma ISO 7726. Mentre per la misura di temperatura dell'aria ( $T_a$ ) viene utilizzato un termometro a bulbo secco, i dati di temperatura media radiante ( $T_r$ ) si ricavano indirettamente elaborando i valori rilevati dal **globotermometro**, semisfera in rame nero opaco conforme alla norma ISO 7726. Il dato consente di ricavare la temperatura media radiante utile sia ai fini dell'analisi degli ambienti moderati che degli ambienti caldi.

Per la misura dell'umidità relativa (**RH%**) ci si avvale di una **sonda psicrometrica** con la quale si eseguono le misure di temperatura a bulbo secco ( $t_a$ ) e umido con ventilazione forzata ( $t_w$ ). Dalla differenza dei valori di questi due parametri, attraverso una relazione di tipo lineare, si ricava il dato di **RH%**.

Il rilievo dei dati di velocità dell'aria ( $v_a$ ) si esegue utilizzando un **anemometro a filo caldo**, in grado di misurare anche l'intensità della **turbolenza** prodotta dalle correnti d'aria, utile per il calcolo dell'insoddisfazione legata alla presenza di correnti d'aria.

In riferimento alla valutazione del discomfort localizzato, considerando la tipologia di attività svolte negli ambienti scolastici, si è ritenuto di effettuare esclusivamente misure di asimmetria radiante per verificare l'incidenza della radiazione solare negli ambienti. Inoltre, viste le dimensioni ridotte degli ambienti monitorati (uffici, aule), si è ritenuto di eseguire una sola misura a centro ambiente.

Prima di effettuare ogni singola misura si è atteso un tempo non inferiore ai 20' con la stazione microclimatica in postazione, a causa dell'inerzia del globotermometro.

L'elaborazione dei dati è stata condotta utilizzando i moduli del pacchetto *software* INFOGAP, commercializzato dalla LSI e operativo in ambiente *Windows*®, grazie al quale è stato possibile archiviare i dati acquisiti, definire il valore delle grandezze personali ( $M$ ,  $I_{cl}^{29}$ ,  $\eta$  e) e, infine, elaborare gli indici.

---

29 Il valore di isolamento prodotto dal vestiario indossato dall'operatore è stato calcolato sulla base delle informazioni raccolte durante le singole sessioni di misura, relative alla tipologia dei capi di vestiario indossati dalle persone presenti nell'ambiente oggetto della misurazione. L'insieme dei dati raccolti, inseriti in un apposita sezione di INFOGAP, permette di calcolare il valore dell'isolamento complessivo prodotto dal vestiario.

## Risultati

### **Analisi d'insieme delle grandezze microclimatiche fondamentali**

Complessivamente sono state eseguite, ad attività didattica in corso, 123 misurazioni ubicate all'interno dei locali del complesso scolastico, rappresentative di ambienti adibiti ad aerea amministrativa, aule didattiche e laboratori. Per ciascuna sessione di misura sono state inoltre rilevate le condizioni microclimatiche all'esterno dell'edificio in modo da avere un riferimento sui parametri climatici stagionali. Tutte le sessioni di misura sono state concentrate nell'arco della mattina, in concomitanza con lo svolgimento delle lezioni. Per ogni punto di prelievo prescelto sono state registrate le quattro grandezze microclimatiche fondamentali.

Una prima osservazione sull'andamento microclimatico generale può essere fatta analizzando l'insieme dei dati rilevati in tutti i plessi scolastici (Tabella 4.1.4.1) dati di temperatura dell'aria rilevati all'interno dei singoli ambienti mostrano una generale uniformità anche a dispetto delle condizioni climatiche esterne; a titolo di esempio, nel "periodo freddo" i valori di temperatura *outdoor* sono in diversi casi inferiori anche di 10 °C rispetto a quelli misurati all'interno. Analogamente i valori di temperatura media radiante testimoniano l'assenza di significative sorgenti di calore; infatti la loro differenza rispetto alla temperatura dell'aria secca non è mai superiore a 1 °C. Il valore medio di RH% si attesta, nel complesso, all'interno dell'intervallo 40%-60%, generalmente considerato accettabile. Riguardo infine alla presenza di correnti d'aria, i valori rilevati dall'anemometro evidenziano, come era lecito attendersi, condizioni di velocità dell'aria trascurabili.

**Tabella 4.1.4.1** - Statistica dei valori delle grandezze fondamentali suddivise per periodo stagionale - tutti gli ambienti

PERIODO	N	Parametro statistico	$t_a$ (°C)	$T_r$ (°C)	$T_a - T_r$ (°C)	RH (%)	velocità dell'aria (m/s)
"CALDO"	57	media	24,4	25,3	-0,9	53,7	0,04
		dev.st	1,7	1,9	-0,2	5,2	0,04
		min	21,1	21,3	-0,2	41	0
		max	27,7	28,6	-0,9	68,2	0,14
"FREDDO"	66	media	21,8	21,7	0,1	41,9	0,01
		dev.st	2,4	2,2	0,2	9,4	0,02
		min	15	16	0	25,2	0
		max	26,5	26	0,5	70,9	0,1

Un'analisi più approfondita delle grandezze fondamentali può essere condotta suddividendo i dati per tipologia di ambiente (Tabella 4.1.4.2) e anche per Istituto (Tabella 4.1.4.3). Nel periodo "freddo" i valori medi di  $T_a$  riguardanti l'area amministrativa sono superiori di circa 1,5 °C rispetto a quanto osservato nelle aule. Ciò è in accordo con la consuetudine del personale amministrativo di mantenere spesso la porta chiusa, limitando in tal modo la dispersione di calore verso i corridoi.

Del resto i valori di  $T_r$ , sottolineano l'assenza di fonti radianti significative in entrambi gli ambienti. Al contrario, le basse temperature osservate nei laboratori, dove il dato medio di  $T_a$  è inferiore a 18°C, possono essere spiegate con il fatto che si tratta di locali per lo più situati al piano ammezzato o seminterrato e frequentati in modo discontinuo.

Particolarmente interessante è il dato di **RH%** che, in questo periodo, si mantiene al di sotto del limite inferiore dell'intervallo di accettabilità in tutti i tre ambienti. Si tratta con tutta probabilità degli effetti del riscaldamento dei locali realizzato con metodologie tradizionali (*radiatori in ghisa e, in minor misura, di alluminio*), che provoca un'eccessiva deumidificazione dell'aria. D'altra parte l'apertura periodica dei serramenti, che consentirebbe di riportare l'umidità a valori accettabili, determinerebbe un abbassamento della temperatura ambientale. Nel periodo "caldo" i valori di  $T_a$  sono in stretta connessione con il rialzo delle temperature tipico di maggio e inizio giugno, di solito quasi a livelli estivi nell'area della città di Roma.

**Tabella 4.1.4.2** - Grandezze fondamentali: distribuzione dei valori medi per tipologia di ambiente - Tutti i dati

PERIODO	AMBIENTE	$t_a$ (°C)	RH (%)	$t_r$ (°C)	$V_a$ (m/s)
FREDDO	aule	20,0	37,9	19,7	0,01
	laboratorio	17,8	32,2	17,8	0,01
	segreteria	21,6	34,0	21,9	0,02
CALDO	aule	28,3	61,0	29,3	0,04
	laboratorio	22,9	55,7	23,6	0,03
	segreteria	23,8	53,9	24,7	0,02
$\Delta$ caldo-freddo	aule	8,2	23,1	9,6	0,03
	laboratorio	5,1	23,5	5,8	0,02
	segreteria	2,2	19,9	2,7	0,00

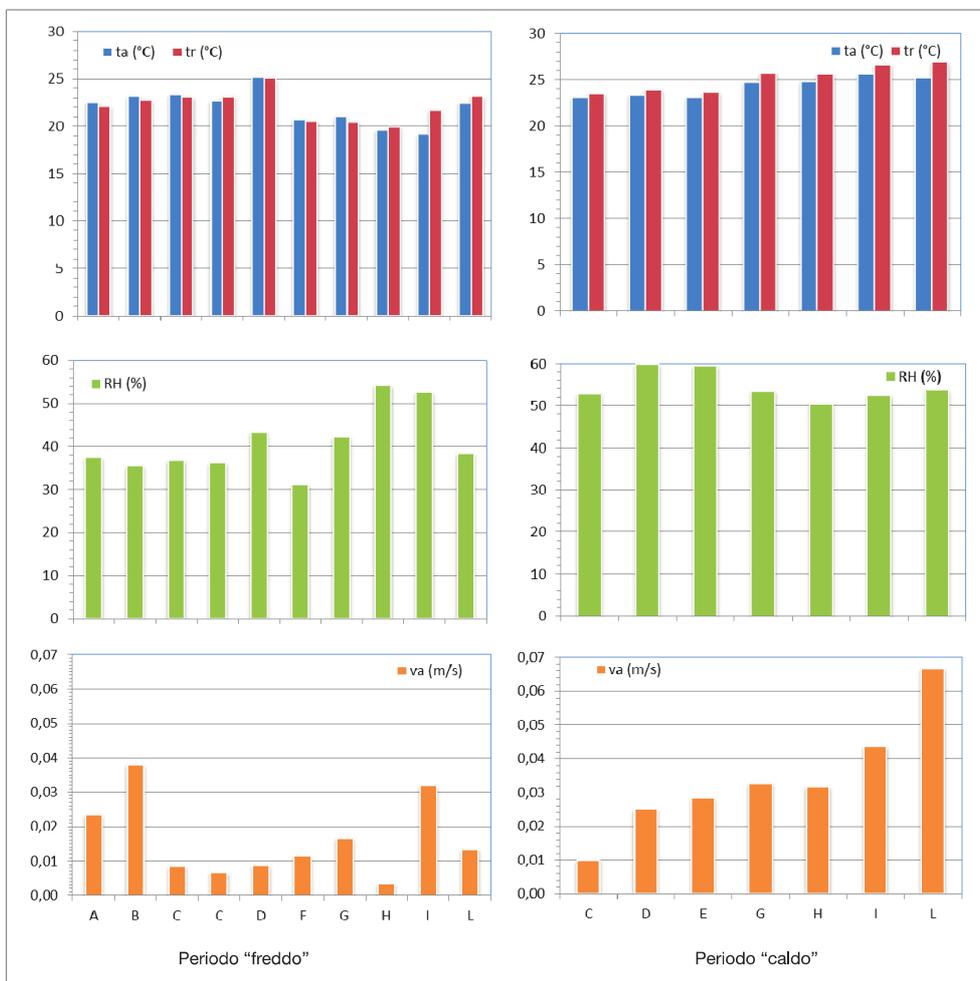


Figura 4.1.4.1 - Grandezze fondamentali: distribuzione dei valori medi per singolo plesso scolastico.

Tale situazione dipende in larga parte dall'assenza nelle aule di qualsiasi dispositivo di "raffrescamento". Per questo motivo il dato medio di temperatura (28°C circa) supera di ben 8°C il valore rilevato nella stagione fredda e aumenta per i locali posti ai piani alti degli istituti e maggiormente esposti al sole (quadrante sud-est).

**Tabella 4.1.4.3** - Grandezze fondamentali: distribuzione dei valori medi suddivisi per Istituto e tipologia di ambiente

Periodo	Istituto	N	Ambiente	t <sub>a</sub> (°C)	RH (%)	t <sub>r</sub> (°C)	V <sub>a</sub> (m/s)	
freddo	A	2	aule	22,4	41,2	21,5	0,03	
		1	segreteria	23,0	29,8	23,2	0,01	
	B	4	aule	23,4	36,7	22,7	0,05	
		1	segreteria	22,6	30,6	23,0	0,01	
	C	5	aule	22,7	37,8	23,1	0,01	
		2	segreteria	23,1	32,8	23,1	0,01	
		2	laboratorio	24,0	39,8	23,4	0,02	
	D	3	aule	25,1	44,2	25,3	0,00	
		2	laboratorio	25,2	40,1	24,8	0,03	
	F	2	segreteria	23,0	25,7	23,0	0,01	
		1	aule	20,2	34,5	19,4	0,01	
			2	laboratorio	18,3	37,2	18,3	0,03
			5	aule	21,4	43,8	20,6	0,02
	G		1	laboratorio	19,3	34,3	19,4	0,00
			4	aule	20,6	55,1	20,7	0,00
	H		4	laboratorio	20,1	42,1	21,0	0,00
			7	aule	21,0	49,0	20,6	0,00
	I		1	segreteria	17,6	49,4	18,5	0,05
L		8	aule	23,4	36,6	23,3	0,01	
		4	segreteria	20,1	35,6	20,8	0,02	
caldo	C	2	aule	21,5	54,9	21,8	0,01	
		6	segreteria	24,0	51,1	24,4	0,01	
		1	laboratorio	25,8	41,0	26,7	0,01	
	D	3	aule-	24,6	54,0	25,3	0,01	
		2	laboratorio	22,4	64,6	22,6	0,06	
			3	aule	24,0	57,4	24,1	0,04
			1	segreteria	22,6	60,4	24,4	0,00
	E		2	laboratorio	22,2	62,5	22,6	0,02
			5	aule	25,0	53,0	26,0	0,04
	G		4	aule	26,2	49,8	27,3	0,04
			4	segreteria	23,4	51,3	24,4	0,04
	H		1	laboratorio	21,3	54,6	22,3	0,04
			6	aule	26,2	51,5	27,2	0,04
	I		1	Segreteria	25,5	53,1	26,5	0,02
	L		9	aule	25,3	53,4	27,2	0,08
1			Segreteria	23,2	53,5	23,7	0,04	

È da notare inoltre che per alcuni istituti situati in edifici storici, a causa dei vincoli architettonici, non è sempre possibile intervenire in modo adeguato, installando dispositivi di schermatura per contrastare l'irraggiamento solare diretto. D'altra parte, l'impiego di serrande o di tendaggi posti all'interno, utilizzati come "schermi" parasole", pur limitando la quantità di luce solare all'interno degli ambienti, non riducono lo scambio di calore con l'esterno. Per quanto riguarda la situazione relativa ai dati di  $T_r$ , si osserva in primo luogo che tale parametro aumenta sensibilmente nel "periodo caldo", parallelamente ai valori di  $T_a$ , a testimonianza dell'assenza di sistemi di condizionamento dell'aria. Inoltre, nello stesso periodo, aumenta il gradiente tra i due valori di temperatura, più di quanto accade nel periodo freddo. Per quanto riguarda infine l'umidità relativa, dato che in questo periodo le attività vengono svolte con le finestre aperte, sono stati rilevati valori in linea con il dato misurato all'esterno, nell'ambito del previsto *range* di accettabilità (40%-60%).

## 4.2 Ergonomia degli Ambienti

### 4.2.1 Comfort microclimatico

Come già illustrato nel paragrafo 4.1.4, ai fini della valutazione del microclima occorre definire preliminarmente se l'ambiente oggetto dell'indagine è di tipo *moderato, severo caldo o severo freddo*. Gli *ambienti moderati* tipici delle attività che si svolgono nei plessi scolastici presentano condizioni microclimatiche non estreme, spesso omogenee, tali comunque da sollecitare in modo limitato il sistema di termoregolazione; questi ambienti sono generalmente caratterizzati da temperature non eccessive e da un'attività fisica modesta. Per tale motivo l'indice scelto per la valutazione, il PMV, dà un'idea dello scostamento della situazione reale dalla situazione di benessere termico (anche detta *comfort*) che, ricordiamo, riassume "*la condizione mentale in cui viene espressa soddisfazione per l'ambiente termico*", ossia la condizione in cui la percezione soggettiva delle condizioni climatiche è ottimale. Per quanto riguarda gli ambienti moderati in linea generale, come già detto in precedenza, si possono assumere come limiti di riferimento quelli relativi alla categoria intermedia individuata dalla Norma UNI EN ISO 7730, classificata con la lettera B, per la quale si può considerare ottimale un valore di PMV compreso tra +0.5 e -0.5, a cui corrisponde una percentuale massima di insoddisfatti pari al 10%. A partire dai dati delle grandezze climatiche fondamentali rilevate negli ambienti, per poter ricavare un quadro quanto più verosimile della situazione microclimatica, è necessario determinare con la maggiore precisione possibile,

i valori dei parametri decisionali necessari alla valutazione, e cioè il *dispendio metabolico*, l'*isolamento termico dovuto al vestiario* ed il *rendimento meccanico*, la cui corretta determinazione è fondamentale per ottenere risultati realmente descrittivi del fenomeno in questione.

**Calcolo del dispendio metabolico (MET) e del rendimento meccanico (h).**

Per quanto riguarda il calcolo del dispendio metabolico è stato ricostruito un "profilo" metabolico tipico di ciascuno dei soggetti presenti nel corso dei rilievi, quali studenti, professori, personale amministrativo (Tabella 4.2.1.1), sulla base dei prospetti riportati in allegato alla Norma UNI EN ISO 8996 (*Ergonomics of the thermal environment Determination of metabolic rate*) Per tutte le figure presenti negli ambienti scolastici è stato considerato un rendimento meccanico  $\eta$  nullo.

**Tabella 4.2.1.1 - Valori di dispendio metabolico**

Profilo professionale	W/m2	MET*
Personale amministrativo	92,5	1,59
Professore	77,5	1,333
Studente	77,5	1,333
Studente impegnato in attività fisiche	140,1	2,41

**Calcolo dei valori di isolamento prodotto dal vestiario ( $I_{clO}$ ).**

Per l'attribuzione del grado di isolamento termico fornito dal vestiario, nel corso dei sopralluoghi si è preso nota delle tipologie di indumenti indossati (Tabella 4.2.1.2). In base ai singoli capi di abbigliamento censiti, sono stati ricavati i valori di isolamento da utilizzare per il calcolo del *comfort* termico. Per una analisi puntuale dei valori di  $I_{cl}$  relativi alla tipologia di indumenti più comunemente osservati nel corso delle varie sessioni di misurazione, sia per gli addetti amministrativi sia per la popolazione studentesca, si può fare riferimento all'allegato B.

Come è possibile notare, la tipologia del vestiario indossato dagli studenti è caratterizzata da una scarsa variabilità, poiché risente di scelte legate al gusto personale, proprie del senso di appartenenza o degli stereotipi espressi dai giovani. L'assortimento più frequentemente osservato durante i sopralluoghi è rappresentato da t-shirt, jeans e scarpe da ginnastica, con piccole modifiche dettate dal contesto stagionale (felpe in cotone o maglioni, scarponcini di tipo invernale con suola in gomma). Al contrario, la situazione dell'abbigliamento scelto dagli addetti all'area amministrativa è più articolata.

Per questo motivo, a differenza di quanto osservato per gli studenti, non è possibile definire un assortimento di indumenti mediamente rappresentativo.

**Tabella 4.2.1.2 - Tipologia di indumenti indossati negli ambienti scolastici**

Categorie di vestiario tratte dalla Norma UNI EN ISO 9920	Capi di abbigliamento censiti
soprabiti	cappotto, giaccone, giubbotto, pile
maglioni	maglione, pile, maglioncino, cardigan lana leggero,
camicie magliette felpe	camicia, sottomaglia, polo a maniche lunghe, maglia leggera, camicia leggera, polo a maniche corte, camicetta, camicia manica corta, maglia maniche lunghe sintetico, maglietta leggera, felpe
t-shirt	t-shirt, indumenti di maglina, canottiera di lana leggera, canottiera di cotone
gonne	gonna altezza ginocchio, gonna lunga,
tute	tuta da ginnastica
giacche, gilet, grembiuli	grembiule
pantaloni	pantaloni di cotone pesante, jeans, pantaloni lunghi
scarpe	scarpe invernali, scarpe da ginnastica, stivali da donna, scarponi, calzature tipo "sneakers", scarpe basse, mocassini, scarpe tecniche, scarpe di cuoio con tacco
calze/collant	calze di nylon, fantasmini, calze leggere
intimo	slip, reggiseno
accessori	sciarpina, foulard

### **Analisi dei valori di PMV**

L'analisi delle grandezze primarie rilevate, il contesto operativo proprio della popolazione presente all'interno dei vari istituti scolastici e, infine, l'assenza di sorgenti radianti di una certa importanza fa ritenere che le attività didattiche si svolgano in un ambiente di "tipo moderato". Per tale motivo la verifica del grado di *discomfort* è basata sul calcolo e sull'analisi dei valori degli indici PMV-PPD.

In riferimento ai criteri di accettabilità definiti dalla norma UNI EN ISO 7730, un ambiente confinato si può considerare accettabile facendo riferimento alla categoria B della norma, ovvero quando i valori di PMV calcolati sono compresi entro l'intervallo  $-0,5 < PMV < +0,5$ , che equivale a una percentuale massima del 10% di persone non completamente soddisfatte a pieno dalle condizioni climatiche misurate.

Pertanto, sulla base delle condizioni delle grandezze fondamentali misurate e

della stima dei parametri personali (*isolamento, dispendio metabolico e rendimento meccanico*) sono stati così calcolati 170 indici di benessere, la cui distribuzione è riportata in Tabella 4.2.1.3. Circa il 60% dei valori di PMV calcolati rientra nell'intervallo di accettabilità sopra definito, che sale a oltre il 73% se si considerano anche i valori compresi nella fascia  $-0,7 < PMV < +0,7$ .

L'analisi dei valori di PMV evidenzia tuttavia la presenza di situazioni di *discomfort* degne di nota, che hanno una chiara correlazione con l'andamento delle temperature nella stagione "calda", a causa dell'assenza di sistemi di condizionamento ambientale. In questo periodo infatti, circa il 43% dei casi mostra valori di PMV uguali o superiori a  $+0,7$ ; di questi, più del 17% supera il valore di  $PMV = +1$ .

**Tabella 4.2.1.3** - Distribuzione % percentuale dei valori di PMV.

	Dati totali		Dati relativi al Periodo freddo		Dati relativi al Periodo caldo	
	N	%	N	%	N	%
<b><math>PMV \geq +1</math></b>	15	8,8	-	0,0	15	17,2
<b><math>+0,7 \leq PMV &lt; +1</math></b>	25	14,7	2	2,4	23	26,4
<b><math>+0,5 \leq PMV &lt; +0,7</math></b>	23	13,5	7	8,4	16	18,4
<b><math>0 \leq PMV &lt; +0,5</math></b>	68	40,0	41	49,4	27	31,0
<b><math>-0,5 \leq PMV &lt; 0</math></b>	35	20,6	29	34,9	6	6,9
<b><math>-0,7 \leq PMV &lt; -0,5</math></b>	3	1,8	3	3,6	0	0,0
<b><math>-1 \leq PMV &lt; -0,7</math></b>	1	0,6	1	1,2	0	0,0
<b><math>PMV &lt; -1</math></b>	-	0,0	-	0,0	-	0,0

Sempre in riferimento al periodo caldo, si osserva un 7% di casi in cui i soggetti evidenziano valori di PMV calcolati che ricade nella fascia  $-0,5 < PMV < +0,5$ . Questa condizione è legata a una serie di dati ambientali rilevati nel mese di settembre in concomitanza con un calo imprevisto delle temperature. Nella Tabella 4.2.1.4 i valori degli indici PMV sono stati suddivisi, per i singoli Istituti, in funzione della tipologia di ambiente e del periodo stagionale. Anche questa ulteriore di suddivisione dei dati disponibili conferma il grado di insoddisfazione

osservato nel periodo caldo (maggio, giugno e settembre), per i motivi sopra esposti.

**Tabella 4.2.1.4** - Distribuzione dei valori medi dell'indice PMV per Istituto e tipologia di locale

Istituto	Tipologia di ambiente	Periodo freddo			Periodo caldo		
		Data	Numero* di valutazioni eseguite	PMV	Data	Numero* di valutazioni eseguite	PMV
A	Aule	13/3/07	2	+0,22			
	Area amministrativa	20/3/07	1	+0,39			
	Laboratori						
B	Aule	20/3/07	5	+0,64			
	Area amministrativa		1	+0,70			
	Laboratori						
C	Aule	25/2/09	2	+0,22	24/5/10	7	+0,48
	Area amministrativa		1	+0,39		6	-0,04
	Laboratori						
C	Aule	10/3/09	6	+0,28			
D	Aule	19/3/09	5	+0,54	25/5/10	3	+0,75
	Area amministrativa						
	Laboratori		2	+0,60		4	+0,19
E	Aule	20/1/10	3	+0,47	23/5/11	3	+0,47
	Area amministrativa		1	+0,42		1	+0,42
	Laboratori					2	+0,17
F	Aule	8/2/10	3	-0,24		-	
	Area amministrativa		3	+0,35			
	Laboratori						
G	Aule	26/3/13	5	+0,08	17/9/13	11	+0,58
	Area amministrativa		1	+0,19			
	Laboratori		1	-0,29			
H	Aule	6/3/13	11	-0,20	18/9/13	20	+0,89
	Area amministrativa		6	+0,19		7	+0,45
	Laboratori						
I	Aule	14/3/13	7	-0,03	16/9/13	11	+0,73
	Area amministrativa		1	-0,33		1	+0,78
	Laboratori						
L	Aule	21/3/13	22	+0,07	19/9/13	16	+0,72
	Area amministrativa		3	-0,30		1	+0,56
	Laboratori						

\* Il numero di valutazioni non coincide con il numero di misurazioni ambientali effettuate poiché tiene conto dei diversi set di abbigliamento osservati in ciascun locale

## 4.2.2 Il Clima Acustico

### *Introduzione*

Il rumore costituisce uno dei principali agenti di rischio negli ambienti di lavoro: infatti fino ad alcuni anni fa l'*ipoacusia da rumore* era la malattia professionale più indennizzata dall'INAIL.

Anche gli ambienti di vita, specialmente nei grandi centri urbani, sono caratterizzati da livelli di rumore elevati, potenzialmente dannosi, e da un clima acustico che influenza negativamente le attività umane. Quest'ultimo aspetto ha particolare rilevanza negli ambienti, come nel caso delle scuole, in cui la comunicazione finalizzata all'apprendimento è di fondamentale importanza. Non si dispone di dati diretti sui riconoscimenti di sordità da rumore negli ambienti scolastici, in quanto l'INAIL assicura in via diretta solo insegnanti e alunni che ".....attendano ad esperienze tecnico-scientifiche od esercitazioni pratiche".

Dalla letteratura scientifica attualmente disponibile, si deduce che, come è lecito attendersi, lo svolgimento delle attività tipiche legate all'istruzione non comporta il rischio di determinare un danno all'apparato uditivo, per la sostanziale assenza di attrezzature e macchinari rumorosi. Tuttavia, in determinate situazioni, la voce umana può raggiungere livelli di rumore elevati, come avviene in alcuni ambienti quali le mense, dove si possono facilmente raggiungere livelli di 85÷100 dB; in queste condizioni, un'esposizione della durata di 30 minuti richiede circa un'ora di recupero per ripristinare la normale funzionalità uditiva.

Negli ambienti scolastici i tempi in cui si registrano livelli elevati sono mediamente molto ridotti, facendo così escludere il superamento dei *livelli di azione* e dei *valori limite* fissati dal D.Lgs. 81/2008<sup>30</sup> (Titolo VIII, Capo II: *Protezione dei lavoratori contro i rischi di esposizione al rumore durante il lavoro*). Di conseguenza non è necessaria la valutazione del rischio, come prevista dal citato decreto. Sulla base di tali premesse, l'indagine effettuata nell'ambito del progetto ha riguardato non tanto il rischio da rumore, bensì l'adeguatezza del clima acustico negli ambienti dove vengono svolte le attività didattiche, per verificare se sussistano le condizioni di buona comprensione della comunicazione verbale. È dimostrato infatti che il **comfort acustico** migliora la qualità dell'apprendimento da parte degli studenti se la comprensione del messaggio verbale (parlato), nel suo complesso, è adeguata. Inoltre non si possono trascurare i possibili effetti negativi sull'attenzione e, più in generale, sulle condizioni psicofisiche che hanno influenza sul comportamento.

---

30 Livello inferiore di azione.  $L_{ex}=80$  dB(A) riferito a una giornata lavorativa convenzionale di 8 ore.

Riguardo al *comfort acustico* la norma UNI EN ISO9241-6:2001 “Requisiti ergonomici per il lavoro di ufficio con videoterminali (VDT) - Guida sull'ambiente di lavoro”, classifica gli effetti indesiderati del rumore in relazione a:

- compromissione dell'udito;
- reazioni indesiderate del sistema nervoso centrale e autonomo;
- intralcio della comunicazione verbale e di altro tipo;
- riduzione delle prestazioni e della funzione cognitiva;
- fastidio.

Per quanto descritto, il rumore presente negli ambienti scolastici va considerato un agente di disturbo che, pur rientrando nel novero dei fattori dell'ergonomia (*ergonomia acustica*), è in relazione stretta con la salute (stress psico-fisico) degli insegnanti e degli studenti.

#### **Riferimenti legislativi e normativi**

Ai fini di valutare in modo corretto la qualità sonora degli ambienti, è necessario fare riferimento alla legislazione specifica sui requisiti acustici degli edifici scolastici.

Il primo riferimento, in ordine cronologico, è rappresentato dalla Circolare Ministeriale del 22 maggio 1967 “*Criteri di valutazione e collaudo dei requisiti acustici negli edifici scolastici*”, nella quale vengono indicati i valori di riferimento di alcuni parametri relativi all'isolamento acustico (potere fonoisolante, livello del rumore da calpestio, rumorosità dei servizi). Inoltre si prescrive che la media dei tempi di riverberazione misurati alle frequenze di 250 Hz, 500 Hz, 1000 Hz, 2000 Hz non debba superare 1,2 secondi per le aule ( in presenza di arredo e con due persone al massimo) e di 2,2 secondi per gli ambienti adibiti a “palestra”.

Successivamente è stato emanato il DM 18/12/1975 - “*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*”; il decreto in particolare definisce le condizioni di abitabilità dell'edificio scolastico e, al punto 5.1, indica i valori di riferimento per i seguenti parametri acustici:

- potere fonoisolante;
- livello di rumore di calpestio normalizzato di solai;
- coefficiente di assorbimento dei materiali isolanti acustici;
- isolamento acustico per via aerea fra ambienti;
- rumorosità provocata da servizi e impianti fissi;
- tempo di riverberazione.

In merito a quest'ultimo parametro si fa presente che esso va determinato in funzione del volume dell'ambiente e riferito alle frequenze di 250 Hz, 500 Hz, 1000 Hz, 2000 Hz.<sup>31</sup>

Il D.P.C.M. 14/11/1997 "*Determinazione dei valori limite delle sorgenti sonore*" include le aree scolastiche nella Classe 1 tra quelle di destinazione d'uso del territorio che i Comuni devono adottare (tabella A dell'allegato), con valori di qualità diurno e notturno pari rispettivamente a 47 dB(A) e a 37 dB(A) e valori limite assoluti di immissione diurno e notturno pari rispettivamente a 50 dB(A) e a 40 dB(A).

Un ulteriore riferimento è costituito dal D.P.C.M. del 05/12/1997, riguardante la "*Determinazione dei requisiti acustici passivi degli edifici*", che inserisce le scuole nella "Categoria E", per la quale i valori delle grandezze di riferimento sono:

- indice di valutazione del potere fonoisolante apparente di elementi di separazione tra ambienti: 50 dB;
- isolamento acustico standardizzato di facciata: 48 dB;
- livello di rumore di calpestio di solai normalizzato: 58 dB;
- livello massimo di pressione sonora ponderata A con costante di tempo slow: 35 dB;
- livello continuo equivalente di pressione sonora ponderata A: 25 dB.

Per quanto riguarda la valutazione del tempo di riverbero, si deve far riferimento al valore stabilito dalla Circolare Ministeriale del 22 maggio 1967 (1,2 secondi). Oltre ai riferimenti di legge vi sono alcune norme, che definiscono i parametri che determinano la qualità acustica degli ambienti, con l'indicazione dei valori adeguati agli ambienti scolastici; si tratta in particolare della norma UNI 11367:2010 (*Classificazione acustica delle unità immobiliari*), che riporta i valori prestazionali dei parametri acustici per le scuole.

### ***Intelligibilità del parlato***

L'indagine ha previsto la valutazione della qualità acustica degli ambienti attraverso l'analisi dell'"intelligibilità del parlato", che rappresenta la percentuale di parole comprese da un ascoltatore rispetto alla totalità di quelle pronunciate. Questa è influenzata da due aspetti fondamentali: l'*assenza di disturbo* e la *buona ricezione*.

---

<sup>31</sup> A titolo di esempio, per un'aula di medie dimensioni, intorno ai 150 m<sup>3</sup> di volume, il tempo di riverbero ottimale è circa 0,8 secondi a 2000 Hz.

Per quanto riguarda il primo aspetto, è necessario verificare l'assenza di un livello di rumore di fondo, originato da sorgenti sia interne che esterne all'edificio scolastico<sup>32</sup>, capace di interferire con il suono prodotto dal parlatore (insegnante). In merito al secondo aspetto è necessario verificare che il livello sonoro del segnale emesso sia percepito in modo ottimale dai ricettori (studenti). Perché ciò possa avvenire, l'ambiente non deve essere eccessivamente riverberante; in simili condizioni i tempi di propagazione delle onde sonore riflesse che raggiungono l'ascoltatore devono essere limitati a poche decine di millisecondi, per "rafforzare" l'intensità del suono diretto ed evitare il mascheramento dei segnali successivi.

L'intelligibilità del parlato si valuta mediante appositi *test* di tipo *diretto*, ben codificati, che prevedono l'utilizzo di parole o frasi in rima, la cui elaborazione richiede tuttavia procedure piuttosto laboriose.

In alternativa è possibile ricorrere a tecniche basate sulla misura di parametri oggettivi come, ad esempio, quelli previsti nella norma UNI EN ISO 9921:2004 (*Ergonomics - Assessment of speech communication*), dedicata alla valutazione della comunicazione verbale. Tale norma suggerisce l'utilizzo di diversi indici di qualità acustica, correlati alla fonazione degli insegnanti e alle condizioni di ascolto degli studenti. Uno di questi indici è rappresentato dal *livello di interferenza del parlato* (SIL - *Speech Interference Level*) con il quale si valuta il grado di intelligibilità nei casi di comunicazione diretta in un ambiente rumoroso. Esso prende in considerazione la media dello spettro del rumore di fondo, lo sforzo vocale del parlatore e la distanza tra chi parla e chi ascolta. Tale metodo viene impiegato quando non sia possibile l'utilizzo di altri criteri di valutazione, a condizione che l'ambiente non sia eccessivamente riverberante. Pur con i suddetti limiti, il calcolo del SIL può fornire prime indicazioni sulle qualità acustiche dell'ambiente. Per ottenere il valore del SIL occorre determinare:

- il livello di interferenza sul parlato prodotto dal rumore ambientale LSIL; questo viene calcolato come la media aritmetica dei livelli di pressione sonora nelle bande di ottava di 500 Hz, 1000 Hz, 2000 Hz, 4000 Hz, misurati nella posizione dell'ascoltatore (alunno), secondo la seguente relazione:

$$L_{SIL} = \frac{1}{4} \sum L_{N, \text{ oct}, i}$$

<sup>32</sup> Le fonti di rumore interne sono rappresentate principalmente dagli impianti di condizionamento e dal disturbo proveniente dagli altri ambienti dell'edificio, mentre quelle esterne sono legate all'inquinamento sonoro dovuto soprattutto al traffico veicolare.

- lo sforzo vocale prodotto dal parlatore (insegnante), definito con il simbolo  $L_{S,A,L}$  calcolato misurando il livello di pressione sonora continuo equivalente ponderato A a 1 metro di distanza dalla bocca del parlatore e applicando la formula:

$$L_{S,A,L} = L_{S,A,1m} - 20 \log r/r_0$$

dove  $r$  rappresenta la distanza in metri tra il parlatore e l'ascoltatore con  $r_0$  pari a 1 m.

Per gli ambienti caratterizzati da tempi di riverberazione inferiori a due secondi, misurati in corrispondenza della frequenza di 500 Hz, il dato di  $L_{S,A,L}$  è valido fino alla distanza di 8 metri dalla sorgente di emissione del segnale. Al contrario, nel caso di ambienti molto riverberanti, il calcolo dello sforzo prodotto dal parlatore ha validità fino a circa 2 metri di distanza dalla sorgente<sup>33</sup>. Da queste due differenti misurazioni si ricava l'indice SIL, come differenza tra lo sforzo vocale del parlatore e il livello di interferenza sul parlato del rumore ambientale. In linea generale l'intelligibilità della comunicazione verbale, nella posizione dell'ascoltatore, può essere ritenuta accettabile quando il valore del  $SIL = L_{S,A,L} - L_{SIL} > 10$  dB. Entrando più nello specifico, in base ai valori di SIL calcolati a partire dalle misurazioni, l'allegato F della norma definisce la seguente scala di intelligibilità:

Grado di intellegibilità	SIL (dB)
Eccellente	21
Buono	15-21
Discreto	10-15
Scarso	3-10
Cattivo	<3

Poiché per motivi di praticità e di ripetibilità della misura si è preferito rilevare il valore di  $L_{SIL}$  (ovvero del rumore ambientale) in assenza di alunni, condizione ideale assimilabile ai soli momenti in cui durante la lezione vi sia un completo silenzio degli studenti, i valori di SIL risultano sovrastimati rispetto alla situazione reale.

<sup>33</sup> La propagazione del suono in campo libero subisce una riduzione del livello di -6 dB ad ogni raddoppio della distanza.

Le misurazioni del livello del parlato possono inoltre dare indicazioni sullo sforzo vocale compiuto, poiché all'aumentare del livello di rumore ambientale il parlatore (insegnante) tenderà automaticamente ad alzare il livello della propria voce, aumentando lo sforzo vocale (Effetto Lombard). Nella Tabella 4.2.2.1 della norma UNI EN ISO 9921:2004 lo sforzo vocale viene classificato in base ai livelli di pressione sonora misurati a distanza di 1 metro di fronte alla bocca del parlatore, ( $L_{S,A,1m}$  misurato con curva di ponderazione A).

**Tabella 4.2.2.1** - Valori dello sforzo vocale misurato a 1 metro davanti alla bocca del parlatore ( $L_{S,A,1m}$ ) (norma UNI EN ISO 9921:2004)

Sforzo vocale	$L_{S,A,1m}$ (dB)
Urlato	78
Forte	72
Elevato	66
Normale	60
Rilassato	54

### Tempo di riverberazione

Come è stato accennato, l'intelligibilità del parlato è strettamente legata alla buona ricezione determinata dalle caratteristiche dell'ambiente. Il parametro principale che meglio definisce la qualità acustica dell'ambiente è rappresentato dal Tempo di riverbero ( $T_{60}$ ). Tale parametro viene definito<sup>34</sup> come il tempo necessario affinché il livello sonoro generato da una sorgente decada di 60 dB (un milionesimo dell'energia iniziale), dopo che la sorgente viene spenta; di solito viene calcolato utilizzando la formula di Sabine:

$$T_{60} = 0,16 V/A$$

Dove  $V$  = volume dell'ambiente in  $m^3$ ;

$A = \alpha S$ ;

$S$  = superficie dell'ambiente in  $m^2$ ;

$\alpha$  = coefficiente di assorbimento del materiale costituente le superfici.

Da questa relazione risulta che il tempo di riverbero è direttamente proporzionale al volume dell'ambiente ed inversamente proporzionale all'assorbi-

<sup>34</sup> Norma ISO 3382:1997.

mento che in esso si verifica (aumenta quanto più l'ambiente è costituito da superfici riflettenti). Da un punto di vista più strettamente tecnico, in relazione alla destinazione d'uso dell'ambiente e alla sua volumetria, si è soliti fare riferimento a un "tempo di riverberazione ottimo", che si ricava dalla seguente formula:

$$T_{2000} = k\sqrt[9]{V}$$

con:

$T_{2000}$  = valore riferito a 2000 Hz;

$K$  = costante variabile da 0,2 a 0,8 a seconda dell'utilizzo della sala;

$V$  = volume ambiente in  $m^3$ .

Nel caso di un ambiente destinato ad attività scolastiche, si può assumere un valore di  $K$  pari a 0,4. Ne consegue che, nel caso di aule con un volume intorno ai  $160 m^3$ , il tempo di riverbero, misurato in corrispondenza della frequenza 2000 Hz, risulta pari a 0,7 secondi. In base dell'andamento della curva *tempo di riverberazione ottimo-frequenza* (Figura 4.2.2.1 e Figura 4.2.2.2), tale valore equivale a circa 0,84 secondi alla frequenza di 500 Hz, che rientra nei limiti previsti dal D.M. 18/12/1975. Nel caso di ambienti più grandi, quali palestre o auditorium, con un volume intorno ai  $1000 m^3$ , si avrebbe un  $T_{60}$  (a 2000 Hz) pari a circa 1,0 secondi.

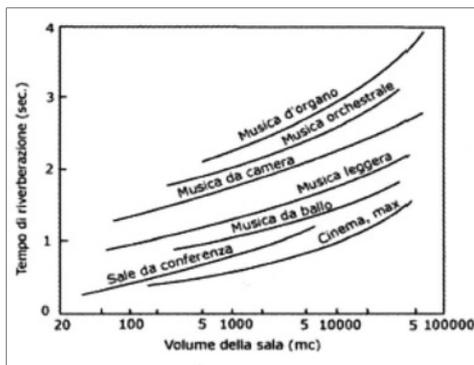


Figura 4.2.2.1 - Grafico del tempo ottimo (tratto da: "L'acustica in architettura" di F.Bianchi - R. Carratù)

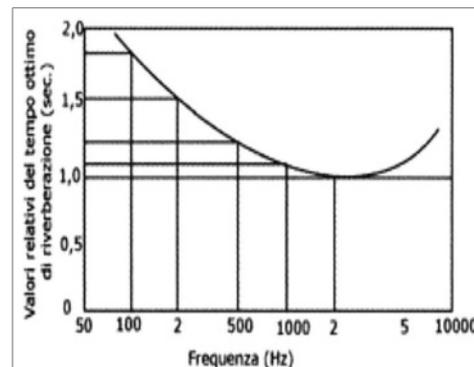


Figura 4.2.2.2 - Grafico di trasposizione per frequenza. (tratto da: "L'acustica in architettura" di F.Bianchi - R.Carratù)

Occorre sottolineare che, ai fini del confronto con il **tempo di riverberazione ottimo**, i risultati ottenuti dalle misurazioni eseguite ad aula vuota, come richiesto dalla normativa, descrivono la condizione peggiore, mentre le reali condizioni di utilizzo (aula piena), presentando maggiore assorbimento acustico, sono migliori in termini di tempi di riverberazione.

Il riferimento normativo per la misurazione del tempo di riverberazione è la norma UNI EN ISO 3382-2:2008 *“Misurazione dei parametri acustici degli ambienti - Parte 2: Tempo di riverberazione negli ambienti ordinari”*. In essa sono riportate tre diverse metodologie di misura (*metodo di controllo, metodo tecnico-progettuale e metodo di precisione*), differenti tra loro in base allo scopo delle misure e al livello di accuratezza richiesto.

Nel caso in oggetto si è ritenuto più rispondente il *metodo tecnico-progettuale* che, oltre ad essere appropriato per la verifica delle prestazioni degli edifici, è anche specificamente raccomandato per le misurazioni previste dalla famiglia delle norme ISO 140 (Misurazione dell'isolamento acustico in edifici e in elementi di edificio), nelle quali ci sono riferimenti al tempo di riverberazione degli ambienti. L'accuratezza nominale dei risultati ottenuti con il metodo prescelto è maggiore del 5%, se la misura è relativa alle bande di ottava, e superiore al 10% nel caso in cui si considerino misure in terzi di ottava.

Da un punto di vista metodologico è prevista l'effettuazione di misure con almeno due posizioni della sorgente e sono richieste sei combinazioni indipendenti sorgente-microfono, secondo lo schema di Tabella 4.2.2.2.

**Tabella 4.2.2.2** - Metodo tecnico-progettuale - numeri minimi di posizioni e di misurazioni....

Combinazioni sorgente-microfono	6
Posizioni della sorgente	≥2
Postazioni microfoniche	≥2
N° di decadimenti in ciascuna posizione (rumore interrotto)	2

Riguardo alle tecniche di misura, la norma prevede due diverse modalità, ovvero:

- metodo del rumore interrotto: metodo per ottenere curve di decadimento registrando direttamente il decadimento del livello della pressione sonora dopo aver eccitato un ambiente con un rumore a larga banda o con limitazione di banda.
- metodo della risposta integrata all'impulso: metodo per ottenere curve di decadimento mediante integrazione inversa della media quadratica della risposta all'impulso.

Per le misure effettuate con il primo metodo è stata utilizzata una sorgente sonora di tipo dodecaedrico a emissione omnidirezionale (Figura 4.2.2.3); il segnale riprodotto è costituito da rumore rosa<sup>35</sup>. Inoltre il livello della sorgente è stato impostato in modo da avere una gamma dinamica sufficiente per ricavare il valore del tempo di riverbero, ovvero con un livello di almeno 35 dB più elevato rispetto al rumore di fondo.

La sorgente sonora è stata posizionata in tre spigoli di ciascun ambiente, poggiata sul pavimento; per ogni posizione prescelta sono state effettuate tre misure con ubicazioni diverse del microfono, scelte casualmente nell'ambiente oggetto di studio e rispettando le distanze minime richieste dalla norma (distanza microfono-sorgente; distanza microfono-pareti, pavimento,soffitto).

Il secondo metodo (risposta integrata all'impulso) è stato applicato utilizzando un'attrezzatura costituita da due assi in legno incernierate tra di loro e dotate di maniglie fissate sul lato esterno; le assi vengono sbattute in modo da generare un impulso di livello sonoro adeguato; per tale ragione l'attrezzatura viene definita comunemente con il termine "clappatore", per assonanza con la definizione inglese di 'hand clap' (battuta di mani) (Figura 4.2.2.4).



Figura 4.2.2.3



Figura 4.2.2.4

Per quanto riguarda il confronto tra i risultati ottenuti con i due metodi riportati nella norma UNI EN ISO 3382-2:2008, si assume che *l'incertezza di misura usando il metodo di risposta integrata all'impulso sia dello stesso*

<sup>35</sup> Rumore in cui le componenti a bassa frequenza hanno potenza maggiore, a differenza del rumore "bianco" in cui la potenza è uguale per qualsiasi frequenza.

ordine di grandezza di quella che si ottiene usando una media di  $n = 10$  misurazioni con il metodo del rumore interrotto.

In ogni caso, al fine di avere un quadro più rappresentativo possibile sulle caratteristiche riverberanti dell'ambiente, si è ritenuto di effettuare le misurazioni utilizzando entrambi i metodi previsti dalla norma. Si segnala che l'Organizzazione Mondiale della Sanità, nella pubblicazione "Noise in schools" (2001), raccomanda un rumore di fondo non superiore a 35 dB (A) nelle aule scolastiche durante l'attività didattica e un tempo di riverbero pari a 0,6 secondi.

### **Strumentazione utilizzata**

La strumentazione utilizzata per i rilievi fonometrici è di classe 1 ed è costituita da:

Strumento	Modello	Matricola
Fonometro integratore Larson Davis:	L&D 831	1210
Preamplificatore Larson Davis:	L&D PRM 831	0232
Microfono PCB Piezotronic:	PCB 377B02	115708
Calibratore Larson Davis:	L&D CAL 200	5327

Per la realizzazione delle misure di riverbero è stata infine utilizzata una sorgente isotropica dodecaedrica omnidirezionale (sistema "Look Line™") della Spectra.

### **Risultati**

L'indagine ha riguardato principalmente gli ambienti in cui hanno luogo le attività didattiche (aule e laboratori); tuttavia sono state effettuate misure anche nelle palestre, negli auditorium e nei locali adibiti alle attività amministrative. Nella Tabella 4.2.2.3 vengono riassunti in termini quantitativi i diversi parametri acustici misurati, distribuiti per le diverse tipologie di ambienti dei 9 Istituti di Scuola Superiore oggetto dello studio.

A causa della variabilità dei dati misurati relativi allo sforzo vocale sostenuto dagli insegnanti si è ritenuto di utilizzare il valore di sforzo normale suggerito dalla norma, ovvero  $L_{S,A,1m} = 60$  dB (A), al fine di disporre di dati dell'indice SIL tra loro comparabili; ciò significa che l'intelligibilità del parlato non può essere migliorata in cambio di un maggiore sforzo vocale da parte degli insegnanti, che determinerebbe gravi problemi di disfonia per gli stessi.

**Tabella 4.2.2.3 - Totale misurazioni effettuate**

Ambiente	Rumore di fondo	SIL	T <sub>60</sub>	Note
Aule	36	16	10	Rumore di fondo misurato a finestre aperte
Laboratori	7	3		
Uffici	5			
Palestre	3		1	
Auditorium			1	

**Rumore di fondo**

Una prima indicazione del clima acustico degli ambienti scolastici deriva dall'analisi dei livelli di rumore di fondo nei locali monitorati, dovuto quasi esclusivamente all'inquinamento sonoro proveniente dall'ambiente esterno, a causa principalmente del traffico veicolare e, in minima parte, delle attività antropiche svolte nelle vicinanze dell'edificio.

Per simulare la condizione peggiore, le misure sono state effettuate mantenendo le finestre aperte. Tale situazione riflette quella che si verifica generalmente nei mesi di maggio e giugno, a causa della mancanza di un sistema di condizionamento. Per le diverse tipologie di ambienti vengono indicati i valori massimo, minimo e medio del rumore di fondo (Tabella 4.2.2.4).

Come si può notare, il dato medio relativo alle aule è superiore al valore limite consigliato dall'OMS (35 dB(A)). Anche le altre tipologie di ambienti sono caratterizzate da livelli piuttosto elevati, originati prevalentemente dall'inquinamento acustico esterno.

**Tabella 4.2.2.4 - Valori del rumore di fondo negli ambienti scolastici**

Ambiente	N	Max.	Min.	Media	$\sigma$	Note
Aule	36	63,2	40,8	54,7	0,007	Rumore di fondo misurato a finestre aperte
Laboratori	7	71,4	44,2	58,1	0,026	
Uffici	5	62,5	43,7	54,5	0,009	
Palestre	3	50,1	47,3	48,8	0,001	

**Intelligibilità del parlato**

Come detto in precedenza, la misura dello sforzo vocale degli insegnanti è stata utilizzata per il calcolo dell'indice SIL; l'analisi dei dati è stata utile anche per classificare la qualità dello sforzo vocale, al fine di evidenziare eventuali problemi di fonazione degli insegnanti. Nella Tabella 4.2.2.5 sono riportati i va-

lori massimo, minimo e medio delle misure di  $L_{s,A,1m}$ , ossia il valore di  $Leq(A)$ , misurato ad 1 metro di distanza davanti alla bocca del parlatore (insegnante).

**Tabella 4.2.2.5 - Livello del parlato ( $L_{s,A,1m}$ )**

Totale misurazioni	Max.	Min.	Media	Note
19	77,6	65,9	71,2	Le misure riguardano n. 15 aule e n. 4 laboratori

Le misure sono state effettuate durante le normali ore di lezione, nelle condizioni ambientali contingenti (finestre sia aperte che chiuse); in alcuni casi la misura è stata realizzata per ambedue le condizioni. Si è così potuto constatare che il valore misurato è pressoché indipendente dall'apertura o chiusura degli infissi. L'analisi dei dati evidenzia come il valore medio relativo allo sforzo vocale misurato sperimentalmente possa essere classificato "alto" (loud - pari a 72 dB ), secondo quanto indicato nella norma UNI EN ISO 9921:2004.

Per il calcolo dell'indice SIL, al fine di avere dati tra loro confrontabili, il valore di  $L_{s,A,1m}$  utilizzato è stato posto pari a 60 dB(A) per tutti gli ambienti monitorati; per tale motivo i valori assegnati all'indice SIL risultano peggiori di quanto osservato in realtà. Tuttavia è chiaro che, in assenza di un'acustica adeguata, l'intelligibilità del parlato non può essere migliorata chiedendo agli insegnanti di aumentare la propria emissione sonora. Nella Figura 4.2.2.5 vengono illustrati i risultati delle misurazioni relative all'indice SIL, con l'indicazione dei valori massimi relativi alle condizioni migliori (banchi della prima fila, più prossimi all'insegnante) e alle condizioni peggiori (banchi dell'ultima fila, più lontani dall'insegnante), espressi in termini percentuali rispetto al numero di ambienti monitorati (15 aule e 4 laboratori); i colori utilizzati fanno riferimento ai diversi livelli della scala di intelligibilità riportata dalla norma.

I risultati evidenziano che in corrispondenza dei banchi della prima fila, dove l'intelligibilità del parlato dell'insegnante deve essere la migliore possibile per effetto della loro prossimità alla cattedra, la percentuale di situazioni non adeguate (scarso e cattivo) riguarda oltre il 47% dei casi monitorati; tale condizione sale oltre l'80% se si considerano i banchi dell'ultima fila.

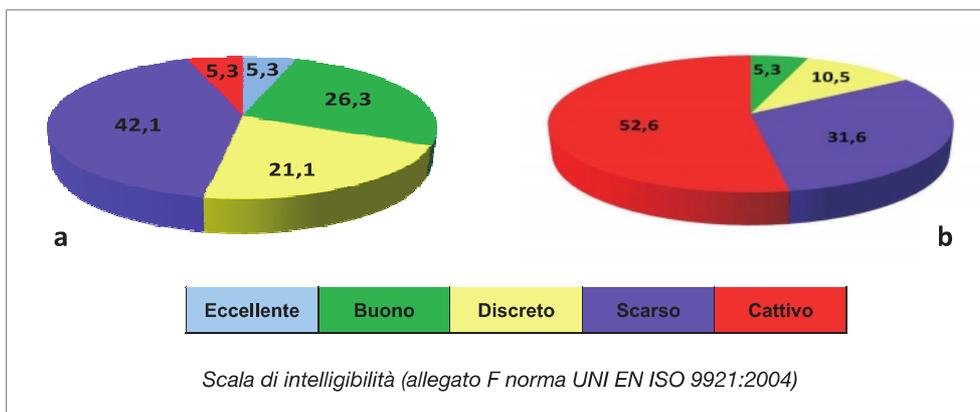


Figura 4.2.2.5 - a) - Valori massimi SIL; b) Valori minimi SIL (% sul totale dei campioni).

### Tempo di riverbero

Le misure di riverbero hanno riguardato principalmente le aule didattiche, per le quali dovrebbe essere prevista una qualità acustica ottimale; il campione monitorato è composto da 10 aule, relative a 7 dei 9 istituti oggetto dello studio. Inoltre, per avere un quadro maggiormente rappresentativo, sono state effettuate misure di riverbero anche in una palestra e in una sala adibita ad auditorium. In generale, per quanto riguarda le palestre, il rispetto di un “tempo di riverbero ottimale” è legato non tanto all’intelligibilità del parlato, quanto al fatto che in questa tipologia di ambiente, per le attività che vi vengono svolte, si raggiungono spesso livelli sonori elevati (maggiori di 80 dB (A)). Nella Tabella 4.2.2.6 vengono riassunti i valori delle misure condotte in 12 ambienti, con l’indicazione dei relativi limiti di riferimento; il metodo del rumore interrotto è stato utilizzato in tutti gli ambienti, mentre quello del rumore impulsivo riguarda solo una parte di essi; dai risultati ottenuti si evidenzia come le due metodologie diano risultati simili.

**Tabella 4.2.2.6** -  $T_{60}$  (calcolato sulle frequenze di ottava 250 Hz, 500 Hz, 1000 Hz, 2000 Hz)

Tipologia ambiente	Rumore interrotto	Rumore impulsivo	$T_{60}$ C.M. 22/05/1967 <sup>(6)</sup>
Aula 1	0,73		1,2
Aula 2	0,82	0,88	1,2
Aula 3	0,80		1,2
Aula 4	2,67		1,2
Aula 5	2,59		1,2
Aula 6	2,10		1,2
Aula 7	1,79	2,15	1,2
Aula 8	2,77	2,95	1,2
Aula 9	2,41	2,30	1,2
Aula10	2,00	2,23	1,2
Palestra	3,94	3,83	2,2
Auditorium	3,93	4,11	1,2

I risultati ottenuti evidenziano il rispetto dei requisiti di legge solo per i dati rilevati nelle aule 1, 2, 3 tutte appartenenti allo stesso edificio scolastico; queste sono caratterizzate dalla presenza di un controsoffitto di materiale assorbente (a nido d'ape), che svolge un'efficace azione nello smorzamento delle riflessioni.

Per tutti gli altri ambienti i limiti legislativi vengono abbondantemente superati, per l'assenza di materiali di rivestimento, efficaci da un punto di vista acustico<sup>36</sup>. Particolarmente penalizzata è la situazione osservata nelle aule di grandi dimensioni. Quanto sopra sottolinea con forza la necessità di adottare adeguati interventi di prevenzione, finalizzati al miglioramento delle caratteristiche acustiche dell'ambiente.

### 4.2.3 Ergonomia degli arredi

#### Introduzione

L'ergonomia (dal greco *érgon*, lavoro e *nomos*, regola) è la scienza che studia l'interazione tra gli esseri umani, le macchine o le attrezzature di lavoro e gli

<sup>36</sup> Tutti gli ambienti sono caratterizzati da superfici in muratura intonacata.

ambienti in cui vengono svolte le varie attività. Ciò si traduce nello studio delle modalità di svolgimento delle attività quotidiane, affinché queste conducano al migliore risultato con il minimo impegno muscolare, mentale ed energetico. Lo stile di vita imposto dalla società odierna, condizionato dalla carenza di esercizio fisico e da condizioni di sedentarietà, determina l'adozione di posture molto diverse da quelle fisiologiche, ottimali per l'essere umano.

Nell'ambiente scolastico l'ergonomia è il più importante mezzo di prevenzione, in quanto consente di studiare le caratteristiche della postazione dello studente e di pianificare le strategie finalizzate ad aumentare le condizioni di benessere minimizzando il dispendio energetico nonché il sovraccarico biomeccanico del rachide e degli arti (superiori e inferiori), facilitando l'apprendimento.

Poiché l'età scolastica coincide con quella della crescita, abituare il corpo al mantenimento della postura ottimale favorisce il corretto sviluppo fisico; in un'ottica ergonomica, è quindi opportuno migliorare le condizioni posturali degli studenti durante la loro permanenza nell'ambiente scolastico.

La posizione ottimale per l'essere umano è quella eretta (ortostatica). In questa condizione le curve fisiologiche del rachide (due cifosi e due lordosi) consentono di scaricare in modo dinamico il peso del corpo, distribuendolo correttamente sui dischi intervertebrali e di minimizzare il dispendio energetico. Viceversa, la posizione assisa, statica, altera la conformazione del rachide modificando le curve fisiologiche. Per questo motivo, se prolungata nel tempo, può risultare estremamente dannosa per lo sviluppo della colonna vertebrale ed essere causa di patologie specifiche (protrusioni discali, ernie ecc.) localizzate nei suoi diversi distretti.

Recenti pubblicazioni scientifiche riferiscono di un notevole aumento dei casi di patologie a carico del rachide (normalmente definite come "mal di schiena") nell'ambito della popolazione in età scolare. Tale fenomeno si manifesta già tra gli studenti delle scuole elementari e assume proporzioni rilevanti per quelli delle scuole medie inferiori e superiori. Stime attendibili evidenziano che tali disturbi affliggono almeno un terzo della popolazione studentesca. Le cause di questo fenomeno sono dovute con tutta probabilità a due fattori principali: in primo luogo va sottolineato che, durante le lezioni, lo studente assume una postura non fisiologica (seduta) per un considerevole lasso di tempo e ciò avviene in una fase molto delicata, quale l'età della crescita; Inoltre va evidenziato che gli arredi di norma utilizzati (banchi e sedie) sono spesso inadeguati alle caratteristiche antropometriche dell'attuale popolazione scolastica e determinano un ulteriore peggioramento della qualità della postura assunta dagli studenti.

Durante lo sviluppo di un individuo, il rachide assume forme differenti: alla nascita esso è concavo anteriormente; la curvatura diminuisce progressivamente a partire dai cinque mesi per attenuarsi dopo l'età di un anno, quando il rachide

diventa più o meno rettilineo. Verso i tre anni inizia a comparire la lordosi lombare, che si accentua intorno agli otto; si giunge alla struttura definitiva all'età di circa dieci anni. Per questo motivo è particolarmente importante porre attenzione alla scelta degli arredi più adeguati a garantire il corretto sviluppo del rachide in un periodo fondamentale per la crescita degli individui.

Oltre all'insorgenza del mal di schiena, l'assunzione di posture incongrue per un periodo di tempo non trascurabile contribuisce ad aumentare la sensazione di affaticamento degli studenti, diminuendo il benessere e incidendo sul livello di concentrazione e, conseguentemente, sulla qualità dell'apprendimento. Al fine di ovviare alla staticità della postura, accade spesso che gli studenti adottino inconsapevolmente posizioni scorrette.

### **Riferimenti Normativi**

Come accennato in precedenza, l'assunzione di una postura corretta viene favorita dall'impiego di adeguati arredi scolastici. Le caratteristiche delle sedie e dei tavoli, assieme a quelle degli strumenti, dei materiali, dell'illuminazione e dei parametri microclimatici, determinano infatti la qualità della postazione in cui vengono svolte le attività scolastiche. In tale ottica si può fare riferimento alle norme tecniche della serie UNI EN 1729 (parti 1 e 2), che recepiscono gli standard europei e indicano i requisiti dimensionali e di sicurezza dei banchi e delle sedie per uso scolastico. Le suddette norme tuttavia non riguardano gli arredi delle postazioni per il computer, delle officine didattiche e dei laboratori. In linea generale, per evitare l'insorgenza di disturbi connessi all'adozione di posture incongrue, le caratteristiche degli arredi devono essere "calibrate" sulle necessità degli utilizzatori: in tal senso, la loro scelta deve tenere in considerazione la variabilità delle misure antropometriche e le eventuali disabilità degli individui. In particolare la norma UNI EN 1729-1 fissa le classi dimensionali (definite *grandezze*) degli arredi da scegliere in funzione delle diverse fasce di altezza degli studenti.

La suddetta norma detta i requisiti degli arredi scolastici (dimensioni della seduta e dello schienale delle sedie, altezza minima del piano del banco, sufficiente spazio per le gambe ecc.) nell'ottica di garantire il mantenimento di una postura corretta della schiena, un'equa distribuzione del peso del corpo sulle anche e la posizione ottimale delle ginocchia; inoltre, in accordo con la norma citata, gli arredi devono essere progettati in modo da consentire l'appoggio delle braccia, al fine di non sovraccaricare i distretti delle spalle durante la lettura o la scrittura e nello svolgimento di attività al personal computer<sup>37</sup>. Vengono poi fornite indicazioni riguardanti specifiche caratteri-

37 Nel D.Lgs. 81/2008 la regolamentazione dell'uso del personal computer rientra nella sezione "Attrezzature munite di videotermini" (Titolo VII e Allegato XXXIV).

stiche degli elementi costitutivi di banchi e sedie (piano di lavoro, seduta, schienale ecc.) quali, ad esempio, la forma degli spigoli, che devono essere arrotondati e avere un raggio di curvatura minimo di 2 millimetri.

Al fine di evitare che si possano produrre schegge, le superfici devono essere levigate e gli spigoli devono essere arrotondati. Nella norma UNI EN 1729-2 vengono invece stabilite le prove di laboratorio alle quali gli arredi devono essere sottoposti per risultare idonei (stabilità, resistenza ai carichi e agli urti, durata).

### *Caratteristiche degli arredi*

#### *Banchi*

I banchi in dotazione alle scuole, osservati nel corso dell'indagine, sono caratterizzati da altezze prefissate. In funzione delle caratteristiche antropometriche dei vari utenti, essi possono risultare idonei o meno. In quest'ultima circostanza si distinguono le due situazioni seguenti:

1. **piano di lavoro troppo alto:** in questa condizione l'alunno, per scrivere o leggere, è costretto a portare in avanti il corpo, sollevando i glutei e portando il rachide in iperestensione in misura più o meno pronunciata. Ciò determina un incremento dello sforzo muscolare e un aumento della pressione sulle cosce nonché l'impossibilità di appoggiare correttamente gli arti superiori sul piano del banco, con conseguente impegno dei muscoli del distretto delle spalle. Si verifica inoltre un disallineamento dello sguardo rispetto al piano di lettura o di scrittura o di quello di visione (piano del monitor) se l'alunno è impegnato nell'uso di un personal computer;
2. **piano di lavoro troppo basso:** la necessità di leggere o scrivere costringe l'alunno a flettere in misura eccessiva il torace ed il tratto cervicale del rachide, con il conseguente appiattimento o, peggio, all'inversione della curva lordotica cervicale; anche in questo caso gli arti superiori non godrebbero di sostegno idoneo e si verificherebbe il disallineamento dello sguardo rispetto alla condizione ideale del piano di visione.

La soluzione ideale per far fronte ad entrambe le situazioni sopra descritte sarebbe quella di adottare banchi con altezza del piano di lavoro regolabile. In alternativa, è necessario che l'altezza tenga conto delle caratteristiche antropometriche degli utilizzatori. Per i banchi, la norma UNI EN 1729-1 fissa 8 *grandezze*: si va dalla *grandezza* 0, adatta per bambini di altezza compresa tra 80 e 95 cm, alla *grandezza* 7, idonea per ragazzi la cui altezza si colloca nell'intervallo 174 - 207 cm.

In ogni caso, indipendentemente dall'altezza dell'utilizzatore, la profondità del piano del banco deve essere pari ad almeno 50 cm, mentre la lunghezza minima consentita è di 60 cm. La norma prevede che l'inclinazione del piano del banco, generalmente fissa, possa essere regolabile. In questo caso deve comunque essere possibile posizionarlo orizzontalmente.

### *Sedie*

Anche per le sedie, in funzione delle caratteristiche antropometriche e delle eventuali disabilità degli utilizzatori, la norma UNI EN 1729-1 fornisce misure e caratteristiche standard da rispettare in fase di progettazione, in riferimento alle altezze dei vari elementi costruttivi, alla profondità, alle caratteristiche del piano della seduta e all'inclinazione dello schienale.

**Altezza della seduta:** qualora una sedia presenti il piano di seduta troppo alto, l'alunno potrebbe avere difficoltà nel riuscire a poggiare correttamente le piante dei piedi sul pavimento. Ciò, oltre a determinare instabilità e quindi affaticamento dei muscoli, causa la compressione della parte inferiore della coscia, impedendo la corretta circolazione sanguigna. Questa condizione costringe l'alunno a continui movimenti che determinano, oltre al disturbo fisico, una condizione di malessere che inficia la concentrazione e l'apprendimento. Viceversa, un piano di seduta troppo basso può determinare, per lo studente, una delle due situazioni seguenti:

- un'eccessiva estensione delle gambe, accompagnata dall'impossibilità di poggiare correttamente i piedi sul pavimento;
- una flessione eccessiva delle gambe, che verrebbero piegate al di sotto della sedia. Questa situazione determina spesso l'impossibilità di sfruttare il sostegno offerto dallo schienale, inducendo un'eccessiva sollecitazione della zona ischiatica.

**Profondità della seduta:** nel caso in cui la profondità della sedia sia eccessiva, il cavo popliteo<sup>38</sup> può essere soggetto a compressione: nel tempo ciò può determinare problemi circolatori. Per ovviare a tale situazione, l'alunno tenderà a portare i glutei in avanti e, talvolta, a non poggiare correttamente le piante dei piedi sul pavimento, perdendo la possibilità di utilizzare correttamente lo schienale. La flessione in avanti del busto può quindi determinare un'eccessiva pressione sulla zona ischiatica.

---

38 Zona posta dietro l'articolazione del ginocchio.

Al contrario, una profondità ridotta del piano di seduta non consente all'utilizzatore di poggiare le cosce in tutta la loro lunghezza. Ciò conduce a una compressione localizzata della parte inferiore della coscia determinando una sensazione di disagio e inducendo uno scorretto appoggio delle piante dei piedi.

**Schienale:** se lo schienale è troppo alto, l'alunno tende a utilizzarlo per tutta la sua lunghezza fino a poggiare la nuca, adottando una postura semi-sdraiata, non idonea allo svolgimento delle attività didattiche. In questa situazione si riduce la frequenza del movimento antero-posteriore; viceversa, l'assenza dello schienale o una sua ridotta altezza non consentono un adeguato sostegno del tronco.

La norma UNI EN 1729-1 prescrive inoltre un'inclinazione dello schienale compresa tra 95° e 110°, indipendentemente dalla statura dell'utilizzatore.

**Imbottitura:** a parte poche eccezioni, le sedie attualmente in uso nelle scuole non prevedono alcuna imbottitura. Tuttavia, al fine di evitare la sensazione di parestesia<sup>39</sup>, che si avverte in seguito a prolungati periodi di seduta su superfici rigide e la conseguente situazione di *discomfort*, è opportuno adottare sedie dotate di un'imbottitura adeguata.

L'imbottitura non deve essere troppo dura, al fine di evitare un'eccessiva pressione localizzata sulle strutture muscolo-nervo-vascolari, né eccessivamente morbida: in quest'ultimo caso il tronco si troverebbe in una situazione di scarso equilibrio e sarebbe necessario il continuo impegno delle fasce muscolari dorsali e addominali; inoltre essa deve essere traspirante, al fine di evitare un'eccessiva sudorazione, e facilmente lavabile.

La norma UNI EN 1729-1 prescrive inoltre che gli arredi scolastici rechino, in punti ben visibili:

- la *grandezza*, identificata anche attraverso un determinato colore;
- i nomi del fabbricante, del distributore, dell'importatore o del venditore;
- la data di fabbricazione.

#### *Idoneità degli arredi*

Al fine di valutare se gli arredi in dotazione alle scuole fossero idonei allo svolgimento delle attività didattiche, è stata effettuata una serie di sopralluoghi. L'analisi delle posture assunte dagli alunni ha messo in luce una situazione degna di essere approfondita. Le posture osservate erano, in buona

<sup>39</sup> Condizione caratterizzata da un'alterazione, a livello locale, della sensibilità di alcune parti del corpo, fondamentalmente causata da problemi circolatori.

parte dei casi, decisamente incongrue: gli studenti erano spesso ricurvi sul banco o, viceversa, quasi distesi sulla sedia, talvolta con le gambe incrociate. Tale situazione, come già detto, influisce negativamente sulla qualità dell'apprendimento. La condizione è apparsa di gran lunga peggiore per alcuni studenti disabili, in quanto la ridotta altezza del banco non consentiva loro un adeguato posizionamento della carrozzella. In sostanza, già nel corso dei primi sopralluoghi sono emerse alcune criticità relative all'idoneità degli arredi in dotazione agli istituti scolastici, dovute principalmente alle scarse disponibilità economiche che non ne consentono un adeguato rinnovo. Di conseguenza molti arredi in uso sono ancora quelli adottati molti anni fa e rispondono ai requisiti dettati dalla norma UNI 7713:1977, ormai ritirata e sostituita, nel 2003, dalla prima versione della UNI EN 1729. A causa di un fenomeno, noto come *secular trend*, che verrà illustrato più avanti, la prima parte di quest'ultima norma prevede, rispetto alla vecchia UNI 7713, una classe dimensionale (*grandezza*) in più. Nella tabella 4.2.3.1. sono riportate le dimensioni di alcuni parametri degli arredi e le rispettive *grandezze* definite dalla norma UNI EN 1729-1 relativamente alla popolazione di studenti considerata.

**Tabella 4.2.3.1** - Grandezze degli arredi e loro dimensioni in funzione dell'altezza degli utilizzatori (misure in millimetri). Estratto e adattato dalla norma UNI EN 1729-1.

Grandezza		4	5	6	7
Codice colore					
Altezza dell'utilizzatore senza scarpe		1330-1590	1460-1765	1590-1880	1740-2070
BANCO	Altezza del piano del banco ( $\pm 10$ mm)	640	710	760	820
	Profondità minima del piano del banco	500	500	500	500
	Lunghezza minima del piano del banco (per persona)	600	600	600	600
SEDIA	Altezza del piano di seduta ( $\pm 10$ mm)	380	430	460	510
	Larghezza minima del piano di seduta	340	360	380	400
	Profondità del piano di seduta ( $\pm 20$ mm)	340	380	420	460

Al fine di valutare l'adeguatezza delle dimensioni degli arredi disponibili attraverso il confronto con gli standard dettati dalla norma UNI EN 1729-1, sono stati raccolti 656 valori di altezza degli studenti<sup>40</sup>, distribuiti tra le cinque classi degli istituti secondo quanto riportato nella tabella 4.2.3.2.

**Tabella 4.2.3.2** - Distribuzione dei valori di altezza degli studenti tra le 5 classi degli istituti.

Classe scolastica	Valori di altezza acquisiti
I	167
II	140
III	155
IV	96
V	98
<b>Totale</b>	<b>656</b>

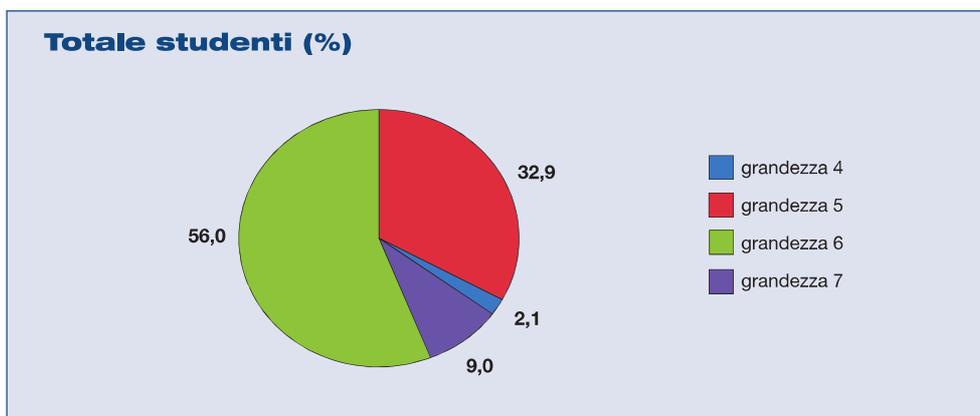
La norma definisce, sulla base degli intervalli di altezza degli studenti (*grandezze*) i requisiti dimensionali da considerare nella scelta degli arredi. Poiché gli intervalli riportati nella norma sono parzialmente sovrapponibili tra loro, l'altezza di ciascuno studente è stata classificata considerando il minimo scostamento dal valore medio di ogni intervallo (tabella 4.2.3.3).

**Tabella 4.3.3.3** - Norma EN 1729-1: intervalli e valori medi di altezza relativi alle grandezze da 4 a 7

Grandezza	Intervallo (mm)	Valore medio (mm)
4	1330-1590	1460
5	1460-1765	1612,5
6	1590-1880	1735
7	1740-2070	1905

<sup>40</sup> I valori di altezza degli studenti sono stati raccolti sulla base delle loro dichiarazioni. Tuttavia, l'errore dovuto alla particolare modalità di acquisizione del dato, può ritenersi trascurabile considerando l'ampio margine di sovrapposizione degli intervalli di altezza assegnati alle diverse grandezze considerate dalla norma.

In virtù della metodologia esposta, la statura degli studenti rientra per la maggior parte (88,6 %) nelle *grandezze* 5 e 6; le rimanenti altezze sono riferibili alla *grandezza* 4 (2,4%) e 7 (9%), come rappresentato in figura 4.2.3.1.



**Figura 4.2.3.1** - Distribuzione delle altezze del totale degli studenti tra le grandezze degli arredi previste dalla norma UNI EN 1729-1.

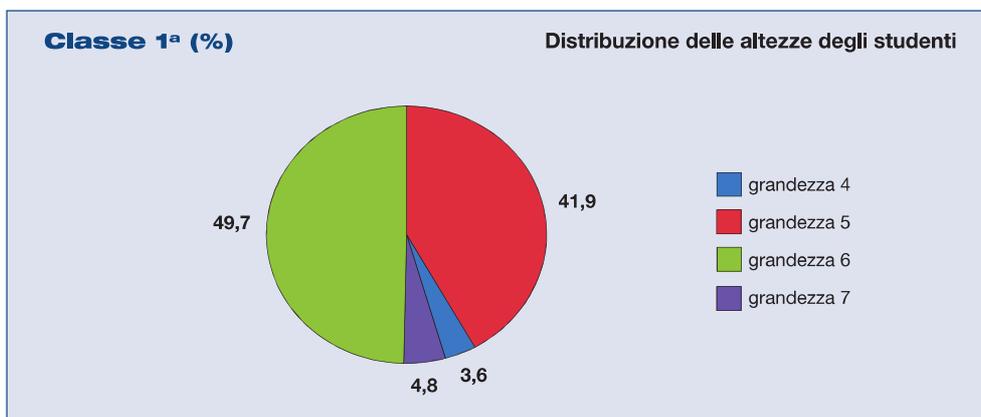
Parallelamente alla rilevazione delle altezze degli studenti, è stata effettuata un'analisi dimensionale degli arredi utilizzati nelle aule degli istituti, distinguendoli per classe scolastica in modo tale da verificare se, al crescere dell'età e quindi dell'altezza degli studenti, corrispondesse una fornitura di banchi e sedie di dimensioni adeguate. I dati relativi alle dimensioni degli arredi, rapportati alle altezze degli studenti per ciascuna classe scolastica, sono riportati nelle figure 4.2.3.2, 4.2.3.3, 4.2.3.4, 4.2.3.5, 4.2.3.6.

### Classe Prima

Circa la metà degli studenti delle prime classi (49,7%) ha altezze che rientrano nella grandezza 6, mentre poco meno del 42% appartiene alla grandezza 5 e una frazione residuale si distribuisce più o meno equamente tra le grandezze 4 e 7 (figura 4.2.3.2).

#### Dimensione degli arredi

	Tipo	Dimensioni (L x P x h) (centimetri)	Grandezza UNI EN 1729-1		
			L	P	h
banchi	1 posto	69 x 69 x 76	6	6	6
	1 posto	70 x 50 x 76	6	6	6
	2 posti	129 x 50 x 76	6	6	6
	2 posti	130 x 50 x 77	6	6	6
Dimensioni della seduta (L x P x h) (centimetri)			Grandezza UNI EN 1729-1		
			L	P	h
sedie	40 X 41 X 46		6	6	6
	40 X 40 X 45		6	6	6
	39 X 34 X 46		6	4	6
	35 x 35 x 45		4	4	6
	40 X 40 X 46		6	6	6
	39 X 39 X 46		6	5	6
	35 X 35 X 47		4	4	6



**Figura 4.2.3.2** - Dimensioni degli arredi rilevate nelle prime classi (e relative grandezze previste dalla norma UNI EN 1729-1) rapportate alla distribuzione delle altezze degli studenti. Per le 4 grandezze nelle quali ricadono le altezze, raggruppate secondo il criterio esposto nel testo, sono stati utilizzati i codici di colore di cui alla norma citata.

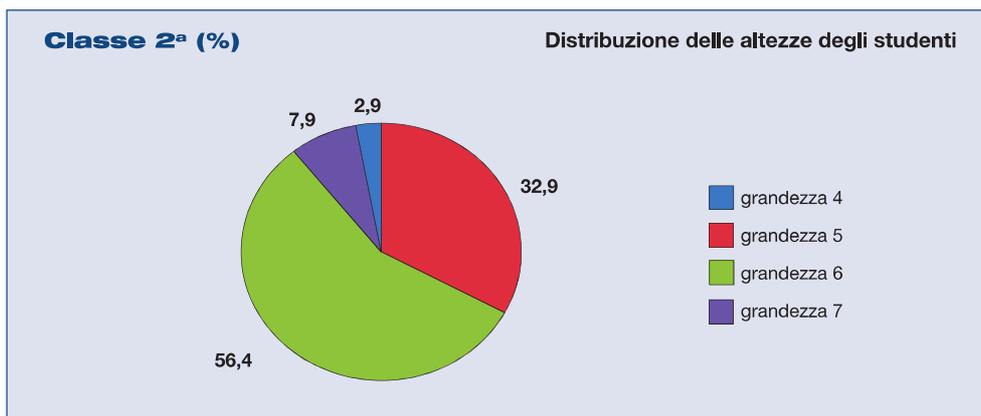
A fronte di tale distribuzione, i banchi, per quanto di tipologia e dimensioni diverse, appartengono tutti alla *grandezza* 6 e risultano quindi idonei solo per la metà degli studenti; gli altri necessiterebbero di banchi più bassi (*grandezza* 5 per il 41,9% e *grandezza* 4 per il 3,6%) o più alti (*grandezza* 7, 4,8%). Per quanto riguarda le sedie, quelle in uso soddisfano meno della metà degli utilizzatori. Esse sono di diversa tipologia e le loro altezze possono essere ricondotte alla *grandezza* 6; in molti casi, tuttavia, la larghezza e la profondità del piano di seduta sono riconducibili a *grandezze* inferiori (5 o addirittura 4).

### Classe Seconda

Nelle seconde classi (figura 4.2.3.3) oltre la metà (56,4%) degli studenti ha un'altezza riferibile alla *grandezza* 6; segue una frazione (32,9%) di alunni aventi altezze collocabili nella *grandezza* 5, il 7,9% necessiterebbe di arredi aventi *grandezza* 7, mentre una quantità residuale di ragazzi (2,9%) avrebbe bisogno di banchi appartenenti alla *grandezza* 4. Anche in questo caso, i banchi, seppure diversi tra loro, appartengono tutti alla *grandezza* 6 e risultano idonei solo per poco più della metà degli utilizzatori. Anche le sedie, appartenenti alla *grandezza* 6, soddisfano solo una parte della popolazione di studenti delle seconde classi. In molti casi, pur potendo riferire le altezze alla *grandezza* 6, la larghezza e la profondità del piano di seduta erano estremamente piccole (*grandezza* 4)

#### Dimensione degli arredi

	Tipo	Dimensioni (L x P x h) (centimetri)	Grandezza UNI EN 1729-1		
			L	P	h
banchi	1 posto	69 x 69 x 76	6	6	6
	1 posto	70 x 50 x 76	6	6	6
	2 posti	140 x 50 x 76	6	6	6
	2 posti	130 x 50 x 77	6	6	6
		Dimensioni della seduta (L x P x h) (centimetri)	Grandezza UNI EN 1729-1		
			L	P	h
sedie		35 x 35 x 45	6	6	6
		40 X 40 X 46	6	6	6
		40 X 40 X 46	6	4	6



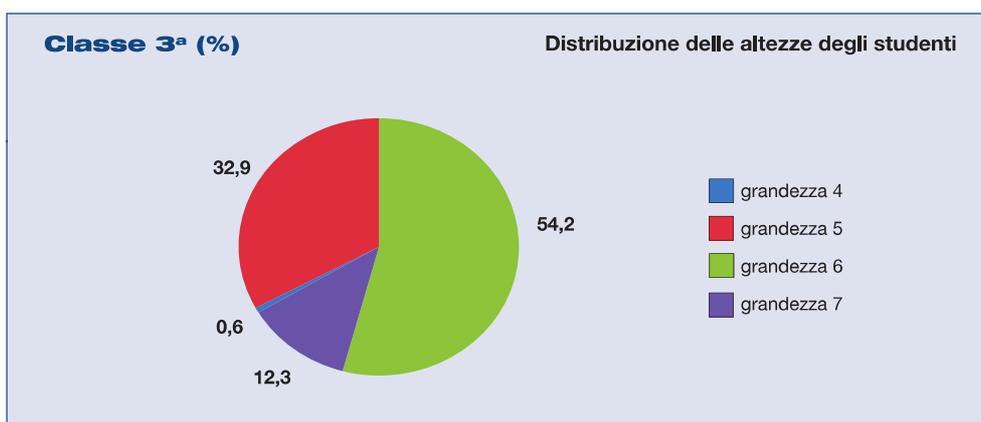
**Figura 4.2.3.3** - Dimensioni degli arredi rilevate nelle seconde classi (e relative grandezze previste dalla norma UNI EN 1729-1) rapportate alla distribuzione delle altezze degli studenti. Per le 4 grandezze nelle quali ricadono le altezze, raggruppate secondo il criterio esposto nel testo, sono stati utilizzati i codici di colore di cui alla norma citata.

### Classe Terza

I banchi in uso nelle terze classi, sia da un posto che da due, hanno altezze riconducibili alla *grandezza 6* (figura 4.2.3.4). Essi risultano adatti solo al 54,2% degli studenti (fatta eccezione per quelli aventi profondità ridotta, inferiore al valore minimo prescritto dalla norma UNI EN 1729-1). Per il 32,9% degli studenti sono necessari banchi di *grandezza 5*, mentre il 12,3%, che rappresenta gli studenti di statura maggiore, non dispone di banchi adatti alle proprie dimensioni antropometriche (*grandezza 7*); lo stesso vale per gli studenti con altezze che ricadono nella *grandezza 4* (0,6%).

#### Dimensione degli arredi

	Tipo	Dimensioni (L x P x h) (centimetri)	Grandezza UNI EN 1729-1		
			L	P	h
<b>banchi</b>	1 posto	69 x 69 x 76	6	6	6
	2 posti	138 x 48 x 76,5	6	insufficiente	6
	2 posti	129 x 50 x 76	6	6	6
	2 posti	139 x 49 x 76	6	insufficiente	6
	2 posti	130 x 50 x 77	6	6	6
		Dimensioni della seduta (L x P x h) (centimetri)	Grandezza UNI EN 1729-1		
			L	P	h
<b>sedie</b>		40 x 38 x 46	6	5	6
		40 x 40 x 46	6	6	6
		35 x 35 x 45	4	4	6



**Figura 4.2.3.4** - Dimensioni degli arredi rilevate nelle terze classi (e relative grandezze previste dalla norma UNI EN 1729-1) rapportate alla distribuzione delle altezze degli studenti. Per le 4 grandezze nelle quali ricadono le altezze, raggruppate secondo il criterio esposto nel testo, sono stati utilizzati i codici di colore di cui alla norma citata.

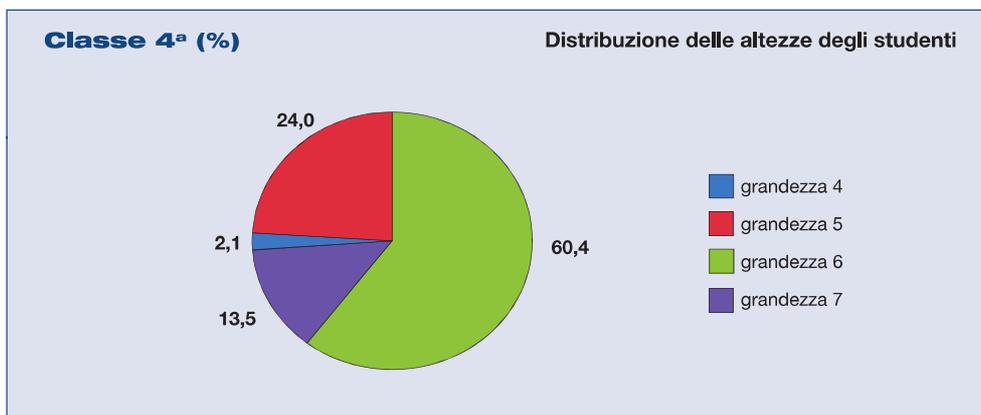
Le diverse tipologie di sedie, pur avendo altezze del piano di seduta riconducibili alla *grandezza* 6, non sono adatte per buona parte degli studenti appartenenti a questa *grandezza*, in quanto caratterizzate da dimensioni estremamente ridotte del piano di seduta, riconducibili alle *grandezze* 4 e 5. Anche in questo caso, la scelta degli arredi non rispetta le esigenze degli studenti appartenenti alle *grandezze* 4, 5, 7 e soddisfa solo parzialmente quelli della *grandezza* 6.

### Classe Quarta

Oltre il 60% del campione di studenti appartenenti alla quarta classe ha altezza riferibile alla *grandezza 6*; rispetto alle classi inferiori, si nota una diminuzione della percentuale di studenti collocabili nella *grandezza 5* e un aumento del numero di quelli più alti, attribuibili alla *grandezza 7* (rispettivamente 24% e 13,5%).

### Dimensione degli arredi

	Tipo	Dimensioni (L x P x h) (centimetri)	Grandezza UNI EN 1729-1		
			L	P	h
banchi	1 posto	69 x 69 x 76	6	6	6
	2 posti	136 x 49 x 76	6	insufficiente	6
	2 posti	129 x 50 x 76	6	6	6
	2 posti	130 x 50 x 77	6	6	6
Dimensioni della seduta (L x P x h) (centimetri)			Grandezza UNI EN 1729-1		
			L	P	h
sedie		35 x 35 x 46	4	4	6
		39 x 36 x 46	6	5	6
		39 x 39 x 46	6	5	6
		40 x 40 x 47	6	6	6
		40 x 40 x 46	6	6	6



**Figura 4.2.3.5** - Dimensioni degli arredi rilevate nelle quarte classi (e relative grandezze previste dalla norma UNI EN 1729-1) rapportate alla distribuzione delle altezze degli studenti. Per le 4 grandezze nelle quali ricadono le altezze, raggruppate secondo il criterio esposto nel testo, sono stati utilizzati i codici di colore di cui alla norma citata.

Gli alunni aventi altezza ascrivibile alla *grandezza* 4 costituiscono invece il 2,1% del campione (figura 4.2.3.5). Le tipologie di banchi utilizzati appartengono tutte alla *grandezza* 6, fatta eccezione per un modello la cui profondità è inferiore al valore minimo prescritto dalla norma UNI EN 1729-1. Di conseguenza i banchi sono idonei solo per il 60% degli studenti, mentre la loro scelta non soddisfa il rimanente 40%, che avrebbe bisogno di banchi più bassi e più alti. Le sedie in uso nelle quarte classi sono di cinque tipologie diverse. Mentre l'altezza del piano di seduta risponde sempre ai requisiti della *grandezza* 6, larghezza e profondità variano tra le *grandezze* 4 o 5. Pertanto solo due dei cinque modelli riscontrati soddisfano le esigenze degli studenti aventi altezza riferibile alla *grandezza* 6, mentre gli altri, pur avendo dimensioni del piano di seduta collocabili nelle *grandezze* 4 e 5, risultano troppo alti per gli studenti ascrivibili a queste. Pertanto il 39,6% degli alunni non dispone di sedie idonee.

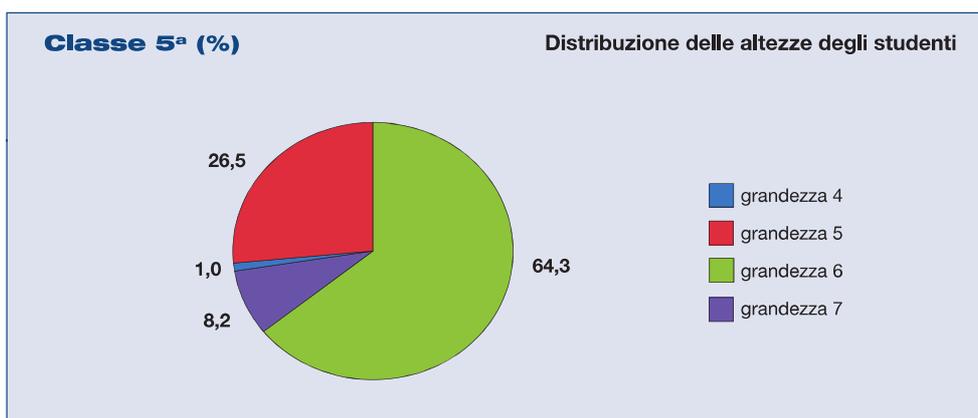
### Classe Quinta

Le altezze degli studenti delle quinte classi rientrano, per il 64,3%, nella *grandezza 6*, per il 26,5% nelle *grandezze 5* (26,5%), mentre l'8,2 rientra nella *grandezza 7* (8,2%). Solo l'1% degli alunni ricade nella *grandezza 4* (figura 4.2.3.6). I banchi utilizzati sono di 5 diversi tipi; alcuni hanno inclinazione regolabile, cosa che risulta particolarmente utile nello svolgimento delle attività grafiche. In ogni caso, essi appartengono tutti alla *grandezza 6* e pertanto sono adatti per circa 2/3 degli utilizzatori. Tra essi ne è stato riscontrato un modello avente profondità inferiore a quella minima prescritta dalla norma UNI EN 1729-1.

Anche le sedie in uso, di dimensioni molto simili, appartengono alla *grandezza 6* e risultano inadatte per oltre 1/3 degli studenti.

#### Dimensione degli arredi

	Tipo	Dimensioni (L x P x h) (centimetri)	Grandezza UNI EN 1729-1		
			L	P	h
banchi	1 posto	69 x 69 x 76	6	6	6
	1 posto (inclinaz. regolabile)	90 x 60 x 77	6	6	6
	2 posti	139 x 47 x 76	6	insufficiente	6
	2 posti	139 x 50 x 76	6	6	6
	2 posti	130 x 50 x 77	6	6	6
Dimensioni della seduta (L x P x h) (centimetri)			Grandezza UNI EN 1729-1		
sedie			L	P	h
	40 x 40 x 46		6	6	6
		40,5 x 40 x 46	6	6	6



**Figura 4.2.3.6** - Dimensioni degli arredi rilevate nelle quinte classi (e relative grandezze previste dalla norma UNI EN 1729-1) rapportate alla distribuzione delle altezze degli studenti. Per le 4 grandezze nelle quali ricadono le altezze, raggruppate secondo il criterio esposto nel testo, sono stati utilizzati i codici di colore di cui alla norma citata.

## Considerazioni conclusive

Negli ultimi decenni si è osservato un fenomeno, definito “*secular trend*” (Sanna E., 2002)<sup>41</sup>, caratterizzato da un’accelerazione nei processi dello sviluppo e dal raggiungimento delle dimensioni corporee che caratterizzano il soggetto adulto in età sempre più precoce; in particolare, a parità di età considerata, negli ultimi decenni l’esame dei dati antropometrici testimonia un aumento complessivo delle dimensioni corporee e un ampliamento della distribuzione delle altezze, al punto tale che, nell’ambito di una stessa classe scolastica, gli scarti in altezza registrati possono superare i 30 cm. Nell’ambito di una determinata popolazione, il suddetto fenomeno risulta apprezzabile in un periodo di tempo relativamente breve, dell’ordine delle decine di anni.

La vecchia norma UNI 7713:1977 dettava i criteri di progettazione e scelta degli arredi in base alle caratteristiche antropometriche di una popolazione di studenti di oltre trenta anni fa. Per quanto sopra, la UNI EN 1729-1, prevede, rispetto alla vecchia norma, una *grandezza* in più.

I valori di altezza degli studenti raccolti nelle scuole, confrontati con quelli ricavati dalla letteratura del settore, confermano questa tendenza all’incremento delle dimensioni antropometriche. Risulta evidente inoltre come l’ampiezza dello scarto tra le altezze rilevate nell’ambito della stessa classe scolastica superi i 30 cm.

In generale gli arredi disponibili, stando alle indicazioni fornite dalla norma UNI EN 1729-1, risultano inadeguati alle attuali necessità degli studenti. Tutti i banchi e le sedie osservate, sebbene diversi tra loro, hanno altezza riferibile alla *grandezza* 6. Al contrario alcuni modelli di sedia hanno dimensioni del piano di seduta (L, P) tipiche delle grandezze 4 e 5.

La scelta dei banchi e delle sedie non tiene conto della classe scolastica alla quale sono destinati e quindi dell’età e della variabilità antropometrica degli utilizzatori. Spesso gli arredi risultano troppo grandi per alcuni alunni delle prime classi e troppo piccoli per quelli delle ultime; inoltre, nell’ambito della medesima classe, la dotazione degli arredi non tiene conto della variabilità antropometrica esistente: nessuna delle classi visitate dispone di arredi che

---

41 Le cause del *secular trend* sono da ricercare tra i seguenti fenomeni:

- cambiamenti nelle condizioni di vita (dai punti di vista nutrizionale, igienico-sanitario e culturale);
- selezione differenziale nella fecondità e nella mortalità esistente tra individui di diversa altezza;
- movimenti migratori.

I punti sopra esposti rendono conto del fatto che il *secular trend* non è un fenomeno universalmente diffuso: nei paesi sottosviluppati esso non viene rilevato.

Per maggiori dettagli, cfr. Sanna E., (2002) - *Il secular trend in Italia. Antropo*, 3, 23-49.  
[www.didac.ehu.es/antropo](http://www.didac.ehu.es/antropo)

rispettano i requisiti dimensionali delle *grandezze* 4, 5 e 7, favorendo l'assunzione di posture non corrette. La causa probabilmente risiede nel fatto che buona parte degli arredi attualmente in uso sono stati acquistati prima dell'entrata in vigore della norma UNI EN 1729-1 e, per questo motivo, risultano sottodimensionati. Alla luce di quanto sopra, emerge la necessità di rinnovare gli arredi, optando per quattro distinte *grandezze* (dalla 4 alla 7) per fornirli agli studenti in funzione delle loro caratteristiche antropometriche. Negli istituti in cui è stata svolta la presente indagine erano infatti del tutto assenti banchi e sedie in grado di soddisfare le necessità sia degli studenti più bassi che di quelli più alti. In ciascuna classe (dalla prima alla quinta) si è infatti registrata la presenza di studenti la cui altezza è riferibile a tutte le 4 *grandezze* sopra citate. L'adozione di tali arredi consentirebbe di limitare l'assunzione di posture incongrue.

L'inadeguatezza non si limita alle sole dimensioni degli arredi, bensì riguarda anche alcune peculiarità degli stessi; in particolare, in alcune classi sono presenti sedie di diversi modelli: in legno, in plastica, con o senza braccioli.

Situazioni di particolare *discomfort* sono state evidenziate nei casi in cui, in abbinamento a banchi di altezza ridotta, vi sono sedie dotate di braccioli. In tali situazioni, gli studenti non riescono a posizionare questi ultimi al di sotto del piano del banco (Figura 4.2.3.7a): l'impossibilità di avvicinare in modo corretto il piano di seduta a quello del banco obbliga gli studenti ad assumere una postura non sempre idonea.

Anche la mancanza di spazi adeguati può determinare condizioni di *discomfort* posturale, come evidenziato dalla Figura 4.2.3.7b.



**Figura 4.2.3.7a** - Particolare di una sedia dotata di braccioli che impediscono di posizionarla correttamente sotto il piano del banco. Si notano anche i differenti modelli di sedie utilizzati nella stessa aula.



**Figura 4.2.3.7b** - Disposizione di due sedie sui due lati di un banco a un solo posto.

Le condizioni di *discomfort* ergonomico sono inoltre causate dalla conformazione fisica dei locali, spesso utilizzati come aule anche quando la loro originaria destinazione d'uso era diversa. In locali troppo larghi, i banchi delle file più avanzate si trovano spesso in prossimità della cattedra: in questi casi, gli studenti che occupano quelli situati lateralmente (Figura 4.2.3.8) sono costretti ad assumere posture incongrue, consistenti in pronunciate torsioni del busto e del collo, per rivolgere lo sguardo verso l'insegnante.



**Figura 4.2.3.8** - Disposizione dei banchi sulle file laterali di un locale molto largo utilizzato come aula. L'immagine è stata ripresa dalla postazione di uno studente seduto al primo banco.

L'assunzione di posture incongrue da parte degli studenti può essere determinata anche nei casi, osservati in occasione di diversi sopralluoghi, in cui la cattedra poggia su una pedana di legno avente un'altezza di 15-20 cm. In tale condizione, per mantenere una linea di visione<sup>42</sup> corretta, lo studente è costretto a estendere all'indietro il capo, aumentando la lordosi del tratto cervicale. Al fine di rendere più agevole la visuale degli studenti e quindi evitare l'assunzione di posture dannose, è opportuno che la cattedra sia posizionata sul pavimento; inoltre i banchi devono essere distribuiti in modo tale da consentire anche agli alunni situati nelle ultime file di osservare il docente in modo favorevole. Gli accorgimenti finalizzati al miglioramento degli aspetti ergonomici verranno trattati nel paragrafo 5.6.

---

42 Linea che congiunge l'occhio dello studente all'elemento osservato (volto dell'insegnante).