

PROF. ING. FRANCESCO MINICHELLO

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE, SEZIONE ETEC

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI NAPOLI "FEDERICO II"

CENNI SU BENESSERE TERMICO E QUALITA' DELL'ARIA

Cenni su benessere termico e qualità dell'aria in ambienti confinati ad uso civile

Il comfort o benessere in ambienti confinati può essere garantito assicurando contemporaneamente comfort termico, qualità dell'aria, comfort acustico e comfort visivo.

Cenni su benessere termico in ambienti confinati ad uso civile

Per quanto riguarda il comfort termico, può risultare utile classificare gli ambienti confinati in ambienti termicamente moderati ed ambienti severi caldi o freddi: gli ambienti termicamente moderati sono quelli la cui progettazione e gestione hanno come finalità il benessere termico, mentre gli ambienti severi (caldi o freddi) sono quelli in cui, non essendo possibile perseguire condizioni di benessere, ci si limita ad assicurare che le condizioni interne almeno non influenzino negativamente la salute degli occupanti. Sono ambienti termicamente moderati tutti gli ambienti ad uso civile ed alcuni ad uso industriale. Nel seguito ci si riferirà esclusivamente ad ambienti termicamente moderati.

Per comfort o benessere termico si intende quello stato psico-fisico in cui l'individuo esprime soddisfazione riguardo al microclima ambientale, ovvero non avverte sensazione né di caldo né di freddo. Questa condizione è detta anche di neutralità termica. Ci si occuperà inizialmente soltanto di comfort globale, che riguarda il corpo umano nella sua completezza, e successivamente si farà cenno al comfort locale, che riguarda possibili situazioni di discomfort relative ad una particolare zona del corpo umano. In ogni caso dalla suddetta definizione di comfort si deduce che l'individuazione di condizioni di benessere termico è legata a valutazioni di carattere soggettivo.

Il corpo umano può essere visto come una macchina termica in cui il combustibile è costituito dai cibi e dai depositi interni, principalmente grassi. Per "metabolismo energetico", espresso in W/m^2 o in met ($1 \text{ met} = 58,2 \text{ W/m}^2$), si intende l'energia chimica dei cibi e dei depositi interni che viene convertita, per unità di tempo e per unità di superficie corporea, in energia termica, mediante processi di ossidazione di tipo esotermico.

L'equazione di bilancio dell'energia per il corpo umano si può scrivere, in condizioni di regime non stazionario, come segue:

$$M \cdot A_b = \dot{Q} + \dot{L} + S \quad (1)$$

in cui:

M è il metabolismo energetico sopra definito, espresso in W/m^2 o in met;

A_b è l'area della superficie corporea di un uomo medio nudo, circa pari ad $1,8 \text{ m}^2$;

\dot{Q} è la potenza termica ceduta dal corpo umano all'ambiente, W;

\dot{L} è la potenza meccanica, ovvero l'energia meccanica compiuta dall'uomo sull'ambiente nell'unità di tempo, W;

S è la variazione di energia interna del corpo umano nell'unità di tempo, W.

In condizioni di benessere non deve esserci variazione di energia interna, per cui il termine di accumulo S si annulla e la relazione (1) si scrive (condizioni di regime stazionario):

$$M \cdot A_b = \dot{Q} + \dot{L} \quad (2)$$

che esprime il fatto che, in condizioni di benessere, l'energia disponibile nell'unità di tempo dal corpo (il metabolismo $M \cdot A_b$) è in parte utilizzata come lavoro esterno nell'unità di tempo \dot{L} , in parte è smaltita sotto forma di potenza termica \dot{Q} . Considerando l'uomo come una macchina termica, si può definire il rendimento come $\eta = \frac{\dot{L}}{M \cdot A_b}$. Essendo la potenza meccanica di gran

lunga inferiore a \dot{Q} , η assume un valore molto basso, pari a circa $0,10 \div 0,15$.

Il metabolismo energetico cresce all'aumentare del livello di attività dell'individuo ed è quindi tabellato in funzione del tipo di attività: tabelle di questo tipo sono disponibili nella norma UNI-EN-ISO 7730 (tab.1) e negli standard definiti dall'ASHRAE (American Society of Heating, Refrigeration and Air-conditioning Engineers) (tab.2).

Tabella 1: metabolismo energetico per varie attività (da UNI-EN-ISO 7730)

Attività	Metabolismo energetico [W /m ²]
Steso, a riposo	46
Seduto, rilassato	58
In piedi, rilassato	70
Attività sedentaria: ufficio, casa, scuola, laboratorio	70
Attività in piedi: acquisti, laboratorio, industria leggera	93
Attività in piedi: commesso, lavoro domestico, lavoro con macchine	116
Attività intermedia: lavoro pesante con macchine, lavoro in garage	165

Poiché i dati di tab.1 non coprono la fascia delle attività più gravose, nella successiva tab.2 sono mostrati alcuni dati ricavati dall'ASHRAE Handbook Fundamentals 2001.

Tabella 2: metabolismo energetico per varie attività (da ASHRAE Handbook Fundamentals 2001)

Attività	W/m ²	met
<i>Riposo</i>		
Dormire	40	0,7
Salotto	45	0,8
Seduto, fermo	60	1,0
In piedi, rilassato	70	1,2
<i>Camminare (piano orizzontale)</i>		
3,2 km/h (0,9 m/s)	115	2,0
4,3 km/h (1,2 m/s)	150	2,6
6,4 km/h (1,8 m/s)	220	3,8
<i>Attività di ufficio</i>		
Leggere, seduto	55	1,0
Scrivere	60	1,0
Dattiloscivere	65	1,1
Archiviare, seduto	70	1,2
Archiviare, in piedi	80	1,4
Andare in giro	100	1,7
Sollevarre, imballare	120	2,1
<i>Guidare/Volare</i>		
Macchina	60÷115	1,0÷2,0
Aereo, ordinario	70	1,2
Aereo, atterraggio strumentale	105	1,8
Aereo, combattimento	140	2,4
Veicolo pesante	185	3,2
<i>Attività occupazionali varie</i>		
Cucinare	90÷115	1,6÷2,0
Pulire casa	115÷200	2,0÷3,4
Seduto, movimento forzato arti	130	2,2
<i>Lavoro alla macchina</i>		
Segare	105	1,8
Leggero (industria elettrica)	115÷140	2,0÷2,4
Pesante	235	4,0
Maneggiare sacchi di 50 kg	235	4,0
Lavoro con pala e piccone	235÷280	4,0÷4,8
<i>Attività varie di svago</i>		
Ballare	140÷255	2,4÷4,4
Attività di fitness	175÷235	3,0÷4,0
Tennis, singolo	210÷270	3,6÷4,0
Pallacanestro	290÷440	5,0÷7,6
Lotta, combattimento	410÷505	7,0÷8,7

Sono anche disponibili tabelle in cui è riportata direttamente la potenza termica \dot{Q} rilasciata da un uomo medio in ambiente (espressa in W) in funzione del tipo di attività (tab.3, i cui dati sono tratti da ASHRAE Handbook Fundamentals 2001).

Tabella 3: potenza termica rilasciata in ambiente da un uomo medio per varie attività (da ASHRAE Handbook Fundamentals 2001)

Grado di attività		Totale, W		Sensibile W	Latente W	% sensibile che è radiante	
		Uomo adulto	Corretto M/F ^a			Bassa V ^b	Alta V
Seduto a teatro	Teatro, giorno	115	95	65	30	60	27
Seduto a teatro, sera	Teatro, sera	115	105	70	35		
Seduto, lavoro leggerissimo	Uffici, alberghi	130	115	70	45		
Moderate attività d'ufficio	Uffici, alberghi	140	130	75	55	58	38
In piedi, lavoro leggero	Ufficio	160	130	75	55		
Camminare, stare in piedi	Supermercato	160	145	75	70		
Lavoro sedentario	Ristorante ^c	145	160	80	80	49	35
Lavoro al banco leggero	Fabbrica	235	220	80	140		
Ballare moderatamente	Sala da ballo	265	250	90	160		
Camminare 4,8 km/h	Fabbrica	295	295	110	185	54	19
Bowling ^d	Pista da bowling	440	425	170	255		
Lavoro pesante	Fabbrica	440	425	170	255		
Lavoro pesante alla macchina	Fabbrica	470	470	185	285		
Atletica	Palestra	585	525	210	315		

Note:

1. I valori tabulati sono riferiti ad una temperatura di bulbo asciutto di 24°C. Per temperatura di 27°C, il calore totale rimane lo stesso, ma il valore del calore sensibile dovrebbe essere diminuito approssimativamente del 20%, e quello del calore latente aumentato.
 - a) Il valore corretto della potenza termica rilasciata in ambiente è riferito ad una percentuale normale di uomini, donne e bambini per l'attività menzionata, con l'ipotesi che la potenza termica rilasciata da una donna adulta è pari all'85% di quella rilasciata da un uomo adulto e quella rilasciata da un bambino è pari al 75% di quella rilasciata da un uomo adulto.
 - b) V è la velocità dell'aria.
 - c) Il valore corretto include 18 W a persona per il cibo (9 W sensibile e 9 W latente).
 - d) Riferito ad una persona sulla pista da bowling e tutte le altre sedute (117 W) o in piedi o che camminano lentamente (231 W).

La potenza termica dispersa dal corpo umano è divisa in due aliquote: la potenza sensibile che ha come "forza spingente" una differenza di temperatura, e la potenza latente che ha come "forza spingente" una differenza di pressione. Ad esempio, nel caso dell'evaporazione del sudore, la "forza spingente" è la differenza tra la pressione del vapor d'acqua saturo alla temperatura della pelle (si suppone infatti che l'aria umida, a contatto del film di acqua liquida che si forma sulla pelle, giunge a saturazione, per cui la pressione parziale del vapor d'acqua contenuto nell'aria umida diventa appunto uguale alla pressione del vapor d'acqua saturo alla temperatura a cui si trova, cioè la

temperatura della pelle) e la pressione parziale del vapor d'acqua contenuto nell'aria umida in ambiente. Nel caso di lavoro leggerissimo seduto, ad esempio, le tre suddette aliquote valgono all'incirca: $\dot{Q}_{tot}=115$ W, $\dot{Q}_s=70$ W, $\dot{Q}_l=45$ W. Questi valori sono validi per T_{ba} dell'aria umida pari a 24°C. Per $T_{ba}=27^\circ\text{C}$ la potenza termica totale rimane all'incirca costante, mentre la sensibile diminuisce di circa il 20% (diminuisce infatti il ΔT tra corpo e ambiente) e l'aliquota latente aumenta all'incirca del 20%. Sono anche disponibili tabelle in cui, fissato il livello di attività (ad esempio lavoro leggero sedentario) sono fornite le tre quantità \dot{Q}_{tot} , \dot{Q}_s , \dot{Q}_l , nonché la portata d'acqua \dot{m}_l rilasciata da ciascuna persona, al variare della T_{ba} tra circa 20°C e 27°C (tab.4).

Tabella 4: potenza termica e portata d'acqua rilasciate da un uomo in ambiente al variare della temperatura di bulbo asciutto dell'ambiente (da UNI 5104)

T_{ba} (°C)	\dot{Q}_{tot} (W)	\dot{Q}_s (W)	\dot{Q}_l (W)	\dot{m}_l (g/h)
20	116	93	23	35
21,5	116	87	29	45
22	116	81	35	50
25	116	75	41	60
27	116	64	52	80

Confrontando i dati delle due tabelle 3 e 4 si deduce che quelli di tab.4 sono implicitamente riferiti ad un'attività classificabile all'incirca come lavoro leggerissimo.

Esaminando più in dettaglio il termine \dot{Q} dell'equazione di bilancio (2), si può affermare che la potenza termica \dot{Q} rilasciata dall'uomo in ambiente è somma delle seguenti aliquote (tutte espresse in W):

- potenza termica rilasciata per convezione;
- potenza termica rilasciata per irraggiamento;
- potenza termica rilasciata per conduzione;
- potenza termica rilasciata per evaporazione del sudore secreto dalle ghiandole sudoripare come meccanismo di termoregolazione, e potenza termica associata al vapor d'acqua diffuso attraverso la pelle in ambiente (traspirazione);
- potenza termica rilasciata mediante la respirazione.

È importante notare che i vari termini della (2) sono funzione delle sei variabili M , I_{clo} , T_{ba} , Φ , w_a , T_r , così definite:

- M è il metabolismo energetico, precedentemente definito, espresso in W/m^2 o in met;

- I_{clo} è la resistenza termica dell'abbigliamento, espressa in $(m^2 \cdot K) / W$ o come accade più frequentemente, nell'unità incoerente clo [$1 \text{ clo} = 0,155 (m^2 \cdot K) / W$]. 1 clo corrisponde alla resistenza media di un abbigliamento invernale;
- T_{ba} è la temperatura di bulbo asciutto dell'aria umida, espressa in $^{\circ}C$;
- Φ l'umidità relativa dell'aria umida, espressa in %;
- w_a è la velocità dell'aria umida, espressa in m/s;
- T_r è la temperatura media radiante dell'ambiente definita come la temperatura uniforme della superficie di una immaginaria cavità nera che, se l'individuo si trovasse in tale cavità, scambierebbe con l'uomo una potenza termica pari a quella scambiata per irraggiamento tra la superficie corporea e l'ambiente reale in cui si trova l'uomo, ambiente caratterizzato da superfici non isoterme.

In particolare, il metabolismo energetico M compare direttamente nella (2); la resistenza termica dell'abbigliamento, I_{clo} , compare nella valutazione delle potenze termiche disperse per convezione ed irraggiamento. La temperatura di bulbo asciutto dell'aria umida, T_{ba} , influenza la potenza termica rilasciata per convezione e l'aliquota sensibile della potenza termica rilasciata per respirazione. L'umidità relativa (o grado igrometrico) dell'aria umida presente in ambiente, Φ , influenza la potenza termica rilasciata per evaporazione del sudore, quella legata al vapore diffuso attraverso la pelle in ambiente (traspirazione) e l'aliquota latente della potenza termica rilasciata per respirazione (tutte queste potenze termiche latenti si riducono all'aumentare dell'umidità relativa Φ dell'aria ambiente). La velocità dell'aria, w_a , influenza i coefficienti di scambio che caratterizzano i fenomeni di trasporto di massa e di energia che influenzano la potenza termica dispersa per convezione e quelle connesse al sudore ed alla traspirazione: valori accettabili della w_a sono compresi tra 0.05 e 0.40 m/s, meglio ancora se inferiori a 0.15 m/s circa. Infine, la temperatura media radiante, T_r , influenza lo scambio termico radiativo: si noti che può capitare che le potenze convettiva e radiativa abbiano verso opposto, ad esempio nel caso di aria fredda e pareti calde (per la presenza di un camino o di un impianto di riscaldamento a parete o a pavimento), o nel caso di aria calda e pareti fredde (ad esempio per la presenza di ampie superfici vetrate).

Per mantenere le condizioni di benessere, il corpo umano tende a ripristinare le condizioni di equilibrio in cui vale la relazione (2), allorquando c'è variazione di uno dei termini della (2). Si parla di "meccanismi di termoregolazione" del corpo umano. Ad esempio, al diminuire della T_{ba} , tende ad aumentare la \dot{Q} della (2) perché tende ad aumentare lo scambio termico convettivo legato al ΔT tra superficie corporea e aria ambiente: vengono allora innescati automaticamente processi di vasocostrizione dei tessuti superficiali che inducono una riduzione della temperatura superficiale

corporea per cui si tende a ripristinare il ΔT iniziale e quindi la \dot{Q} . Oltre che con tale meccanismo di termoregolazione, una riduzione della T_{ba} può essere anche compensata dall'impiego di abiti più pesanti (maggiore resistenza termica superficiale convettiva e quindi minore potenza termica rilasciata per convezione) o aumentando il livello di attività e quindi il metabolismo M . Se invece la T_{ba} aumenta, si riducono \dot{Q}_{conv} e \dot{Q} : si attivano pertanto meccanismi di vasodilatazione dei tessuti superficiali che inducono un aumento della temperatura superficiale corporea, per cui si tende a ripristinare il ΔT iniziale (precedente all'aumento di T_{ba}); altro meccanismo di termoregolazione che si attua in questo caso è quello della sudorazione, per cui l'evaporazione del sudore avviene a spese della potenza termica prelevata dalla superficie corporea e rilasciata in ambiente: avviene quindi il ripristino delle condizioni per cui vale la (2); ragionando in modo analogo a prima, si comprende che l'aumento di T_{ba} può essere anche compensato dall'impiego di abiti più leggeri o dalla riduzione del livello di attività.

Le condizioni di benessere termico di un ambiente confinato sono individuabili dalle ∞^5 combinazioni delle sei variabili prima elencate che soddisfano la relazione (2). Per semplificare il problema, l'ASHRAE ha proposto di vincolare alcuni dei sei parametri come segue:

- 1) Abbigliamento tipico stagionale ($I_{clo} \cong 0,5$ clo in estate, $I_{clo} \cong 0,90$ clo in inverno);
- 2) Livello di attività: sedentario/leggero ($M < 1,2$ met);
- 3) $W_a < 0,15$ m/s

In queste ipotesi, le condizioni di benessere, sono definite dagli stati che ricadono nelle due zone riportate sul diagramma di fig.1, dette zone di benessere termoigrometrico.

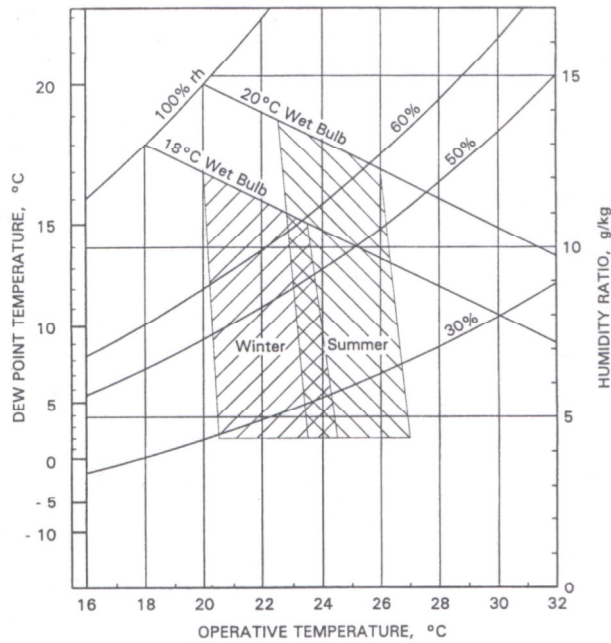


Figura 1: Zone di benessere termico secondo ASHRAE Handbook Fundamentals 2001

Legenda: dew point temperature = temperatura di rugiada; wet bulb (temperature) = temperatura di bulbo bagnato; humidity ratio = umidità specifica; operative temperature = temperatura operativa.

Si osservi che sulle ascisse è riportata la temperatura operativa, definita come la temperatura uniforme della superficie di una immaginaria cavità nera che scambierebbe con l'uomo la stessa potenza termica che l'uomo scambia per convezione e irraggiamento con l'ambiente reale. Qualora la temperatura media radiante sia inferiore a 50°C , la temperatura operativa è ben stimata dalla media aritmetica delle temperature di bulbo asciutto dell'aria e media radiante.

Si può notare che le due zone di benessere termico (estivo ed invernale) si sovrappongono leggermente intorno ai $23^{\circ}\text{C}/24^{\circ}\text{C}$: in questa zona un uomo vestito con abiti invernali avverte in inverno una lieve sensazione di caldo, mentre un uomo vestito con abiti estivi avverte in estate una lieve sensazione di freddo¹.

Si osservi che, se la temperatura media radiante T_r risulta circa uguale alla temperatura di bulbo asciutto T_{ba} , si può con buona approssimazione sostituire, sull'ascissa di fig.1, la temperatura operativa con la T_{ba} e riferirsi quindi al diagramma psicrometrico tradizionale: su questo, quindi, si può determinare, in modo solo qualitativo, come cambiano le zone di benessere quando non viene rispettata quest'ultima condizione (T_r circa uguale alla temperatura di bulbo asciutto T_{ba}) o una delle condizioni prima indicate (1÷3). Se la temperatura media radiante, T_r , non è all'incirca uguale alla T_{ba} , al ridursi della T_r deve aumentare la T_{ba} (per mantenere costante la temperatura operativa

¹ E' ovvio che trattandosi di valutazioni soggettive, le sensazioni termiche vanno intese come risultati di medie effettuate su un campione significativo di persone.

T_o), per cui le zone di benessere si “spostano” verso destra nel diagramma psicrometrico; analogamente, all’aumentare di T_r si spostano verso sinistra. Se la velocità dell’aria è maggiore di 0,15 m/s, le zone si spostano verso destra (sono, cioè, necessarie T_{ba} più alte). Se aumenta il livello di attività e quindi il metabolismo M risulta maggiore di 1,2 met, le suddette zone si spostano verso sinistra nel diagramma psicrometrico tradizionale.

Ponendo $\Phi=50\%$, l’ASHRAE fornisce anche una tabella (tab.5) con i campi di variabilità della T_{ba} in inverno e in estate per garantire condizioni di benessere termico.

Tabella 5: temperatura ottimale e campo accettabile di variabilità ($\Phi=50\%$)

Stagione	T_{ba} ottimale (°C)	Campo di variabilità T_{ba} (°C)
Inverno	22	20 – 23,5
Estate	24,5	23 – 26

Sempre allo scopo di individuare condizioni di comfort termico globale, sono stati introdotti degli indici, funzioni delle sei variabili prima definite, che assumono lo stesso valore per tutte le combinazioni delle sei variabili che determinano uguali sensazioni termiche. Gli indici proposti in letteratura sono di due tipi: indici di sensazione, basati sul giudizio che un campione significativo di persone selezionato dà riguardo al microclima di un ambiente, ed indici di temperatura, che si basano sulla definizione di temperature equivalenti. Tra gli indici più utilizzati si citano il PMV ed il PPD, entrambi indici di sensazione, che saranno di seguito esaminati. Si noti che, poiché tali indici si basano su medie relative a valutazioni comunque soggettive, anche quando gli indici calcolati risultano compresi in intervalli “di benessere” ci possono sempre essere dei soggetti che ritengono l’ambiente in esame caldo o freddo.

L’indice PMV (Predicted Mean Vote, cioè Voto Medio Previsto) è un indice che esprime un voto medio assegnato da un gruppo di persone selezionate sul microclima di un ambiente confinato.

Il voto può essere uno dei sette riportati nella tabella a fianco, a ciascuno dei quali è associata una

+3	Molto caldo
+2	Caldo
+1	Leggermente caldo
0	Neutralità
-1	Leggermente freddo
-2	Freddo
-3	Molto freddo

sensazione termica.

Pertanto, dato un certo ambiente, si può valutare il PMV (è funzione dei sei parametri più volte citati e di qualche altro che però non è variabile indipendente ma è ricavabile dai sei parametri) e successivamente giudicare l’ambiente dal punto di vista del comfort termico globale: in base alla vecchia versione della norma UNI-EN-ISO-7730 l’ambiente risultava accettabile se PMV è compreso tra $-0,5$ e $0,5$. Si noti che il PMV si può anche utilizzare, all’inizio dell’analisi microclimatica, per verificare

se l’ambiente in esame è termicamente moderato (PMV compreso tra -1 e $+1$) o è un ambiente

severo caldo o freddo (in tal caso si utilizzano altre procedure di analisi e di valutazione del microclima ambientale). Come si è già accennato, anche quando risulta $PMV=0$ (neutralità termica) bisogna comunque aspettarsi che un certo numero di persone siano insoddisfatte; per valutarne la percentuale è stato introdotto un secondo indice, il PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied, cioè Percentuale Prevista di Insoddisfatti), legato al PMV da una relazione analitica rappresentabile graficamente come segue (fig.2):

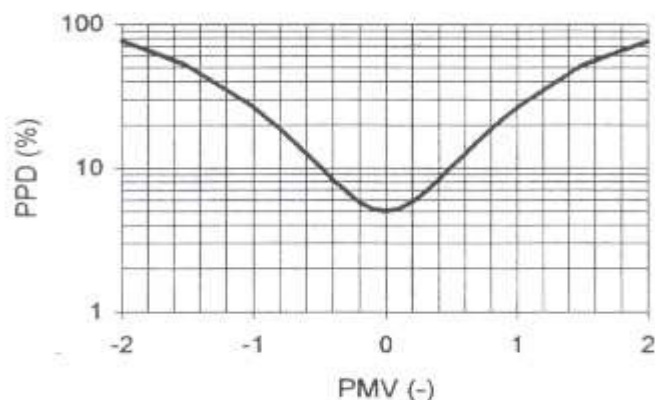


Figura 2: Relazione tra indice PMV e percentuale di insoddisfatti PPD (da UNI-EN-ISO-7730)

Si noti che anche per $PMV=0$ risulta $PPD \neq 0$ (5%); si vede anche che il vincolo indicato nella (vecchia versione della) norma UNI-EN-ISO-7730, PMV compreso tra $-0,5$ e $0,5$, equivale a porre $PPD \leq 10\%$.

Data la complessità della relazione che lega il PMV alle sei variabili, sono stati proposti anche diagrammi di uso più semplice: uno di questi (fig.3) è ottenuto ponendo $PMV=0$ (neutralità termica), $\phi=50\%$ e calcolando la velocità relativa w_{ar} in funzione di M ponendo $w_a=0$ m/s:

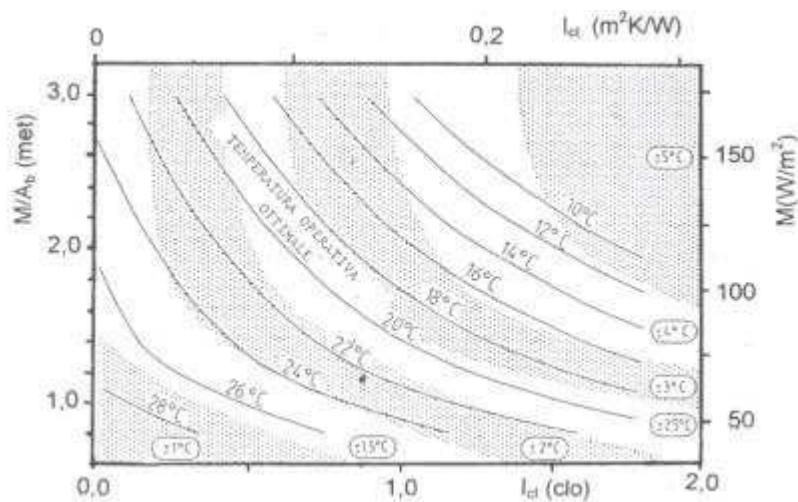


Figura 3: Curve di neutralità termica ($PMV=0$) in funzione di M , I_{clo} e T_o (da UNI-EN-ISO-7730)

Il diagramma si può utilizzare, ad esempio, entrando con i valori di M e di I_{clo} e ricavando la temperatura operativa ottimale T_o , sono anche riportate delle zone (ad esempio quella relativa a $\Delta T_0 = \pm 3^\circ\text{C}$) che indicano di quanto la temperatura operativa può aumentare o diminuire (ad esempio fino a $\pm 3^\circ\text{C}$) senza però che il PMV esca dall'intervallo di benessere $(-0,5 \div 0,5)$.

Segue qualche breve cenno sulla nuova versione (2005) della norma UNI-EN-ISO-7730. Vengono definite 3 classi (A, B, C), a ciascuna delle quali corrisponde una certa percentuale di insoddisfatti PPD ed un certo intervallo di PMV:

Classe A		Classe B		Classe C	
PMV	PPD (%)	PMV	PPD (%)	PMV	PPD (%)
da -0.20 a +0.20	≤ 6	da -0.50 a +0.50	≤ 10	da -0.70 a +0.70	≤ 15

Infine, rimandando a testi specializzati per un esame dettagliato, si sottolinea che andrebbero considerate anche le problematiche connesse alle cause di discomfort locale, che riguardano quindi una zona particolare del corpo umano. Le principali cause di discomfort termico locale sono:

- 1) elevata differenza verticale di temperatura dell'aria - per la classe B, la differenza di temperatura ΔT , a 0.1 m e 1.1 m (soggetto seduto), non deve essere superiore ai 3°C , il che equivale ad accettare una percentuale massima di insoddisfatti pari al 5%;
- 2) pavimento troppo caldo o troppo freddo - per la classe B, la temperatura del pavimento deve essere compresa tra 19°C e 29°C , il che equivale ad accettare una percentuale massima di insoddisfatti pari al 10%;
- 3) correnti d'aria - è stato definito un coefficiente, DR (Draft Risk, cioè rischio da correnti d'aria), che rappresenta la percentuale di insoddisfatti da correnti d'aria; in passato si riteneva che il discomfort da corrente d'aria dipendesse solo dalla velocità dell'aria; nel nuovo indice, DR, invece, si considera anche l'influenza della T_{amb} e dell'intensità di turbolenza Tu . Pertanto, la sola valutazione della velocità dell'aria ambiente non basterebbe, essendo DR dipendente anche da turbolenza dell'aria e temperatura. A rigore, andrebbe valutato DR e, per la classe B, verificato che sia inferiore a 20% (PPD=10%). In pratica, garantire velocità dell'aria, ad altezza uomo, non superiori a 0.15 m/s è alquanto cautelativo;
- 4) elevata asimmetria della temperatura piana radiante - per la classe B, i valori massimi sono:
 $\Delta T_{\text{piana radiante,orizzontale}} = 10^\circ\text{C}$ (PPD = 5%); $\Delta T_{\text{piana radiante,verticale}} = 5^\circ\text{C}$ (PPD = 5%).

In definitiva, affinché un ambiente sia ritenuto soddisfacente dal punto di vista del microclima interno, è necessario che risulti PMV compreso negli intervalli indicati nella tabella sopra riportata e che siano soddisfatti i vincoli relativi alle quattro cause di discomfort locale.

CENNI SUL COMFORT TERMICO ADATTIVO

Un'altra teoria suggerisce di valutare le condizioni di comfort termico attraverso il concetto di comfort adattivo.

Questa teoria si basa sul fatto che l'essere umano sia in grado di *adattarsi alle condizioni del contesto* in cui si trova (adattare l'abbigliamento se sente più freddo o più caldo, aprire o chiudere le finestre, attivare o disattivare gli impianti di riscaldamento/climatizzazione, ecc.) e sia anche disposto ad accettare condizioni che si discostano leggermente da quelle *ideali*.

Le nuove norme tecniche (ASHRAE Standard 55/2004, EN ISO 7730/2005, EN 15251) non stabiliscono condizioni fissate di comfort termico, ma le differenziano in base al tipo di impianto di ventilazione/riscaldamento/raffreddamento presente in ambiente.

Va sottolineato che per gli ambienti caratterizzati da un impianto che soddisfi pienamente la definizione di "impianto di climatizzazione" (quindi, che sia in grado di controllare temperatura, umidità relativa, velocità e qualità dell'aria interna), va comunque preferita la teoria di Fanger.

La principale differenza con la teoria di Fanger è che quest'ultima non tiene conto della variabilità delle condizioni esterne. L'avvio agli studi sul comfort adattivo parte dalle ricerche di Richard de Dear e Gail Shiller Brager, in cui si stabilisce che la temperatura di comfort termico in ambiente non è disconnessa dalle condizioni climatiche esterne, bensì fortemente legata a queste. Gli studi di Fanger, invece, vengono condotti in camera climatica, senza, pertanto, alcuna correlazione rispetto all'esterno, né possibilità di scelta e condizionamento da parte delle persone lì all'interno.

L'adattamento comportamentale dell'uomo comprende:

- adattamento personale (variare l'abbigliamento, l'attività, la postura; mangiare cibo; bere bevande calde o fredde; spostarsi in un altro ambiente o in un'altra posizione);
- adattamento ambientale (aprire o chiudere le finestre, adattare gli schermi solari; attivare l'impianto di riscaldamento/raffreddamento o un ventilatore; chiudere i diffusori di aria; agire su altri controlli del sistema di climatizzazione);
- adattamento culturale (adattare il "dress code" alle condizioni climatiche; programmare le attività, ecc.).

Prima di decidere se applicare una o l'altra teoria per la valutazione del comfort termico indoor, è bene valutare se l'ambiente è del tipo *fully mechanically controlled building* (TEORIA DI FANGER) oppure se si tratta di un ambiente in *free-running* (COMFORT ADATTIVO), che è il caso di una stanza con un unico occupante, che è libero di modificare l'abbigliamento e la sua attività e ha un'ampia gamma di possibilità di controllo ambientale. Ovviamente c'è anche una situazione intermedia, che è il caso in cui gli ambienti sono *partially mechanically controlled*: in tale evenienza è il progettista a dover definire qual è la migliore strategia per valutare le condizioni di comfort termico.

Secondo la EN 15251/2007 ("Indoor environmental input parameter for design and assessment of energy performance of building – addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics"), vengono definite tre categorie di locali in base alla percentuale di persone soddisfatte dal microclima interno:

Categoria I → almeno 90% degli occupanti soddisfatti;

Categoria II → almeno 80% degli occupanti soddisfatti;

Categoria III → almeno 65% degli occupanti soddisfatti.

Le categorie di comfort termico si creano a partire dalle seguenti equazioni, che stabiliscono il limite superiore e il limite inferiore dei diagrammi di comfort adattivo. A queste equazioni corrispondono delle rette che andranno ad individuare un range di comfort (3 fasce, una per ogni categoria).

$$\text{Limite inferiore classe} \rightarrow T_{\text{INDOOR MAX}} = 0.33 \cdot T_{\text{OUTDOOR MEAN RUNNING MONTHLY}} + 18.8 + X$$

$$\text{Limite superiore classe} \rightarrow T_{\text{INDOOR MIN}} = 0.33 \cdot T_{\text{OUTDOOR MEAN RUNNING MONTHLY}} + 18.8 - X$$

$T_{\text{INDOOR MAX}}$ e $T_{\text{INDOOR MIN}}$ sono le temperature di bulbo asciutto dell'ambiente interno minime (minimo accettabile) e massime (massimo accettabile) e sono le incognite delle equazioni che una volta trovate definiranno il limite superiore e il limite inferiore per le classi di comfort.

$T_{\text{OUTDOOR MEAN RUNNING MONTHLY}}$ è la temperatura media mensile dell'aria esterna.

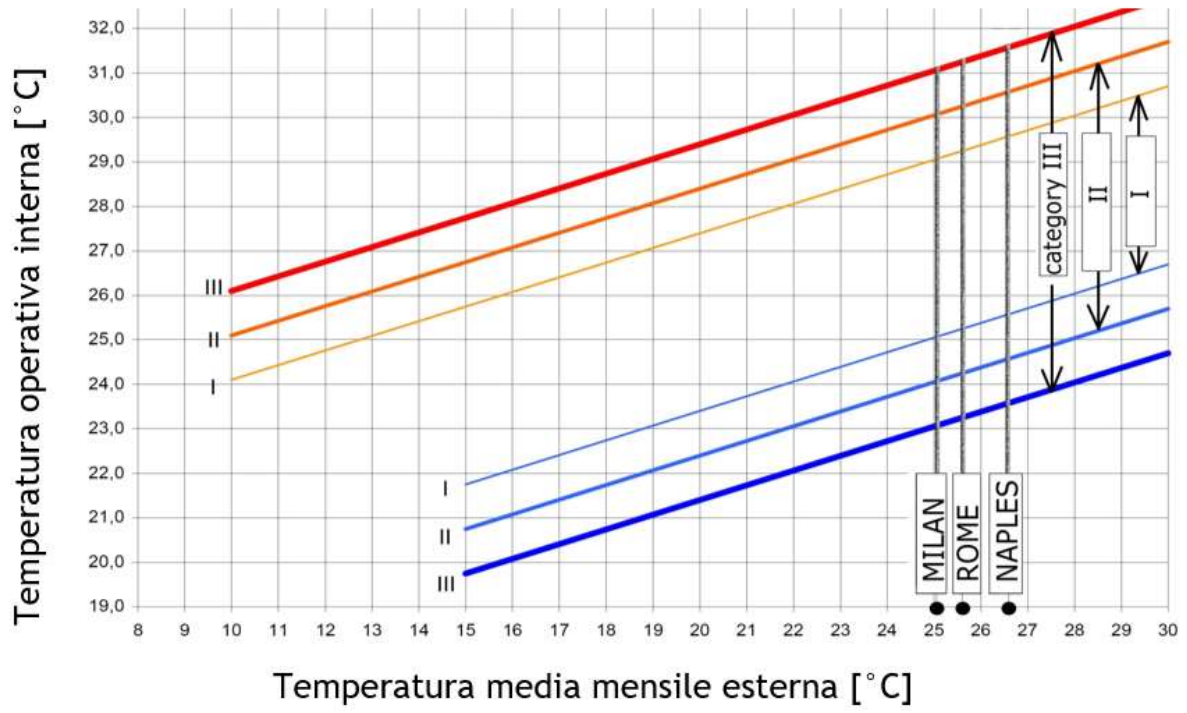
Nelle 2 equazioni sopra riportate, i valori di X sono:

- Categoria I (90% accettazione, 10% insoddisfatti) → X = 2
- Categoria II (80% accettazione, 20% insoddisfatti) → X = 3
- Categoria III (65% accettazione, 35% insoddisfatti) → X = 4

ESEMPIO¹

Comfort Conditions EN 15251	Categoria I (90% accettazione)	Categoria II (80% accettazione)	Categoria III (65% accettazione)
Napoli (<i>T media Luglio</i> = ca. 26.7 °C)	25.6 - 29.6 °C	24.6 - 30.6 °C	23.6 - 31.6 °C
Roma (<i>T media Luglio</i> = ca. 25.7 °C)	25.3 - 29.3 °C	24.3 - 30.3 °C	23.3 - 31.3 °C
Milano (<i>T media Luglio</i> = <i>T</i> = ca. 25.1 °C)	25.1 - 29.1 °C	24.1 - 30.1 °C	23.1 - 31.1 °C

¹ Esempio preso dagli appunti del Prof. Fabrizio Ascione.



Cenni sulla qualità dell'aria in ambienti confinati ad uso civile (IAQ - "Indoor Air Quality")

Un altro aspetto importante del comfort negli ambienti confinati riguarda la qualità dell'aria, che dipende dalla concentrazione degli inquinanti presenti: principalmente polveri, gas indesiderati, fumi. Il particolato può essere rimosso dall'ambiente con l'impiego di opportuni filtri. La norma UNI 10339 riporta una tabella (tab.6) con indicazioni relative a 14 classi di filtrazioni: l'efficienza di filtrazione E varia tra valori inferiori al 65% per la classe 1 ed il 99,999% per filtri di classe 14.

Tabella 6: classificazione dei filtri (da UNI 10339)

Classe	Efficienza del filtro E	Campo di efficienza %	Metodo di prova
1	M	$E < 65$	Ponderale
2	M	$65 \leq E < 80$	Ponderale
3	M	$80 \leq E < 90$	Ponderale
4	M	$90 \leq E$	Ponderale
5	A	$40 \leq E < 60$	Atmosferico
6	A	$60 \leq E < 80$	atmosferico
7	A	$80 \leq E < 90$	atmosferico
8	A	$90 \leq E < 95$	atmosferico
9	A	$95 \leq E$	atmosferico
10	AS	$95 \leq E < 99,9$	fiamma sodio
11	AS	$99,9 \leq E < 99,97$	fiamma sodio
12	AS	$99,97 \leq E < 99,99$	fiamma sodio
13	AS	$99,99 \leq E < 99,999$	fiamma sodio
14	AS	$99,999 \leq E$	fiamma sodio

M = media efficienza; A = alta efficienza; AS = altissima efficienza e filtri assoluti

La stessa norma riporta anche una tabella in cui è specificato il tipo di filtrazione da utilizzare secondo il tipo di utenza (tab.7).

Si noti che la norma UNI 10339 è in via di aggiornamento, e l'efficienza dei filtri non è più indicata con M, A ed AS, bensì con G, F, ULPA (Ultra-Low Particulate Air) ed HEPA (High-Efficiency Particulate Air). In sostanza, cambia la denominazione ma non la teoria alla base. Comunque, ogni filtro di un impianto HVAC deve essere preceduto da uno di classe inferiore.

I gas indesiderati possono essere rimossi con l'ausilio di assorbenti chimici.

I fumi possono essere diluiti con l'introduzione, in ambiente, di opportune portate di aria esterna (nell'ipotesi che sia meno inquinata dell'aria interna), peraltro necessaria per la respirazione. La suddetta norma UNI 10339 fornisce (tab. 8), per ogni tipo di utenza, la portata volumetrica di aria esterna, espressa in m^3/s per persona, o, in alcuni casi (cucine), in m^3/s per m^2 di superficie dell'ambiente; per gli ambienti adibiti a servizi igienici è prevista solo estrazione di aria e fissata la portata in termini di ricambi orari (quindi di volume ambiente/s o volume ambiente/h).

Tabella 7: classe dei filtri ed efficienza di filtrazione richieste per varie categorie di edifici (da UNI 10339)

Classificazione degli edifici per categorie	Classe ** di filtri		Efficienza di filtrazione **
	min.	max.	
EDIFICI ADIBITI A RESIDENZA E ASSIMILABILI			
- abitazioni civili	4	7	M*, M+A
- collegi, luoghi di ricovero, caserme, conventi	4	7	M*, M+A
- alberghi, pensioni	5	7	M+A
EDIFICI PER UFFICI E ASSIMILABILI			
- uffici in genere	5	7	M+A
- locali riunione	5	7	M+A
- centri elaborazione dati	6	9	M+A
OSPEDALI, CLINICHE, CASE DI CURA E ASSIMILABILI			
- degenze (2-3 letti)	6	8	M+A
- corsie	6	8	M+A
- camere sterili e infettivi	10	11	M+A+AS
- maternità, anestesia, radiazioni	10	11	M+A+AS
- prematuri, sale operatorie	11	12	M+A+AS
- visita medica	6	8	M+A
- soggiorni, terapie fisiche	6	8	M+A
EDIFICI ADIBITI AD ATTIVITA' RICREATIVE, ASSOCIATIVE, DI CULTO			
- cinematografi, teatri, sale congressi	5	6	M+A
- musei, biblioteche	7	9	M+A
- luoghi di culto	4	6	M*, M+A
- bar, ristoranti, sale da ballo			
- bar in genere	3	5	M*, M+A
- sale pranzo ristoranti	5	6	M+A
- sale da ballo	3	5	M*, M+A
- cucine	2	4	M
ATTIVITA' COMMERCIALI ED ASSIMILABILI			
- grandi magazzini	4	6	M*, M+A
- negozi in genere	4	6	M*, M+A
- negozi particolari			
- alimentari	5	6	M+A
- fotografi	5	6	M+A
- farmacie	5	6	M+A
- zona pubblico banche	4	6	M*, M+A
- quartieri fieristici	2	3	M
EDIFICI ADIBITI AD ATTIVITA' SPORTIVE			
- piscine, saune ed assimilabili	4	6	M*, M+A
- palestre ed assimilabili	2	4	M
EDIFICI ADIBITI AD ATTIVITA SCOLASTICHE			
- scuole materne ed elementari	7	9	M+A
- aule in genere	5	6	M+A
- altri locali:			
- aule musica e lingue	6	7	M+A
- laboratori	6	7	M+A

* Da adottare per efficienze fino a 4

** Per la definizione dei simboli vedi tab. 6

Tabella 8: portate di aria esterna richieste in edifici adibiti ad uso civile (da UNI 10339)

Categorie di edifici	Portata di aria esterna o di estrazione		Note
	Q_{op} ($10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ per persona)	Q_{os} ($10^{-3} \text{ m}^3/\text{s m}^2$)	
EDIFICI ADIBITI A RESIDENZA E ASSIMILABILI RESIDENZE A CARATTERE CONTINUATIVO			
Abitazioni civili: -soggiorni, camere da letto -cucina, bagni, servizi	11	-	A
Collegi, luoghi di ricovero, case di pena, caserme, conventi			
-sale riunioni	9*	-	-
-dormitori\camere	11	-	-
-cucina	-	16,5	-
-bagni\servizi			A
RESIDENZE OCCUPATE SALTUARIAMENTE Vale quanto prescritto per le residenze a carattere Continuativo			
ALBERGHI, PENSIONI ecc.			
-ingresso, soggiorni	11	-	-
-sale conferenze (piccole)	5,5*	-	-
-auditori (grandi)	5,5*	-	-
-sale da pranzo	10	-	-
-camere da letto	11	-	-
-bagni, servizi			-
EDIFICI PER UFFICI ED ASSIMILABILI			
-uffici singoli	11	-	-
-uffici open space	11	-	-
-locali riunione	10*	-	-
-centri elaborazione dati	7	-	-
-servizi			A
OSPEDALI, CLINICHE, CASE DI CURA ED ASSIMILABILI **			
-degenze (2-3 letti)	11	-	-
-corsie	11	-	-
-camere sterili	11	-	-
-camere per infettivi		-	D
-sale mediche/soggiorni	8,5	-	-
-terapie fisiche	11	-	-
-sale operatorie/sale parto	-		D
-servizi			A
EDIFICI ADIBITI AD ATTIVITÀ RICREATIVE, ASSOCIATIVE, DI CULTO E ASSIMILABILI CINEMA, TEATRI, SALE PER CONGRESSI			
-atri, sale d'attesa, bar			
-platee, loggioni, aree per il pubblico, sale cinematografiche, sale teatrali, sale per riunioni senza fumatori	5,5*	-	-
-palcoscenici, studi TV	12,5*	-	-
-sale riunioni con fumatori	10*	-	-

-servizi		estrazioni	A
-borse titoli	10*	-	-
-sale attesa stazioni e metropolitane		estrazioni	A
MOSTRE, MUSEI, BIBLIOTECHE, LUOGHI DI CULTO			
-sale mostre, pinacoteche, musei	6*	-	-
-sale lettura, biblioteche	5,5*	-	-
-depositi libri	-	1,5	-
-luoghi di culto	6*	-	-
-servizi		estrazioni	A
BAR, RISTORANTI, SALE DA BALLO			
-bar	11	-	A
-pasticcerie	6	-	A
-sale pranzo, ristoranti e self-service	10	-	-
-sale da ballo	16,5*	-	-
-cucine	-	16,5	-
-servizi		estrazioni	A
ATTIVITÀ COMMERCIALI E ASSIMILABILI			
-grandi magazzini piano interrato	9	-	B
piani superiori	6,5	-	-
-negozi o reparti di grandi magazzini:			
-barbieri, saloni di bellezza	14	-	-
-abbigliamento, calzature, mobili, ottici, fioristi	11,5	-	-
Fotografi			
-alimentari, lavasecco, farmacie	9	-	-
-zone pubblico, banche, quartieri fieristici	10	-	-
EDIFICI ADIBITI AD ATTIVITÀ SPORTIVA PISCINE, SAUNE ED ASSIMILABILI			
-piscine (sala vasca)	-	2,5	C
-spogliatoi/servizi		estrazioni	A
-saune	-	2,5	C
PALESTRE ED ASSIMILABILI			
-palazzetti sportivi	6,5*	-	-
-bowling	10	-	-
-palestre			
-campi gioco	16,5*	-	-
-zone spettatori	6,5*	-	-
-altri locali			
-spogliatoi/servizi atleti		estrazioni	A
-servizi pubblico		estrazioni	A
EDIFICI ADIBITI AD ATTIVITÀ SCOLASTICHE ED ASSIMILABILI			
-asili nido e scuole materne	4	-	-
-aule scuole elementari	5	-	-
-aule scuole medie inferiori	6	-	-
-aule scuole medie superiori	7	-	-
-aule universitarie	7	-	-
-transiti, corridoi	-	-	-
-servizi		estrazioni	A
-altri locali:			
-biblioteche, sale lettura	6	-	-

-aule musica e lingue	7	-	-
-laboratori	7	-	-
-sale insegnanti	6	-	-
<p>* Salvo le indicazioni relative ai locali di pubblico spettacolo e di riunione riportate al paragrafo 9.1.1.1. della normativa UNI 10339.</p> <p>** Per gli ambienti di questa categoria non è ammesso usare aria di ricircolo.</p> <p>Note: A - Ricambio richiesto nei servizi igienici: - per edifici adibiti a residenza e assimilabili: 0,0011 vol/s (4 vol/h); - per altre categorie in tabella: 0,0022 vol/s (8 vol/h) il volume è quello relativo ai bagni (antibagni esclusi).</p> <p>B - Verificare i regolamenti locali</p> <p>C - Valori più elevati possono essere richiesti per il controllo dell'umidità</p> <p>D - Per questi ambienti le portate d'aria devono essere stabilite in relazione alle prescrizioni vigenti ed alle specifiche esigenze delle singole applicazioni.</p>			

Per valutare il numero di persone in un ambiente è anche riportata una tabella (tab. 9) con l'indice di affollamento (numero di persone per m² di superficie dell'ambiente) per ogni tipo di utenza.

Tabella 9: indici di affollamento n_s (numero di persone per m^2 di superficie dell'ambiente), da UNI 10339

Classificazione degli edifici per categorie	n_s
EDIFICI ADIBITI A RESIDENZA E ASSIMILABILI	
- abitazioni civili: Soggiorni, camere da letto	0,04
- collegi, luoghi di ricovero, case di pena, caserme, conventi:	
• soggiorni	0,20
• sale riunioni	0,60
• dormitori	0,10
• camere letto	0,05
- alberghi, pensioni:	
• ingresso, soggiorni	0,20
• sale conferenze (piccole)	0,60
• camere letto	0,05
EDIFICI PER UFFICI E ASSIMILABILI	
• uffici singoli	0,06
• uffici open space	0,12
• locali riunione	0,60
• centri elaborazione dati	0,08
OSPEDALI, CLINICHE, CASE DI CURA E ASSIMILABILI	
• degenze (2-3 letti)	0,08
• corsie	0,12
• camere sterili e infettive	0,08
• visita medica	0,05
• soggiorni, terapie fisiche	0,20
EDIFICI ADIBITI AD ATTIVITÀ RICREATIVE, ASSOCIATIVE, DI CULTO	
- cinematografi, teatri, sale congressi	
• sale in genere	1,50
• biglietterie, ingressi	0,20 (medio)
• borse titoli e simili	0,50
• sale attesa stazioni e metropolitane, ecc.	1,00
- musei, biblioteche, luoghi di culto	
• sale in genere	0,30
• luoghi di culto	0,80
- bar, ristoranti, sale da ballo	
• bar in genere	0,80
• sale pranzo ristoranti	0,60
• sale da ballo	1,00
ATTIVITÀ COMMERCIALI ED ASSIMILABILI	
- grandi magazzini	0,25
- negozi o reparti di grandi magazzini:	
• alimentari, abbigliamento, calzature, mobili, ottici, fioristi fotografi	0,10
• barbieri, saloni di bellezza, lavasecco, farmacie, zona pubblico banche	0,20
- quartieri fieristici	0,20
EDIFICI ADIBITI AD ATTIVITÀ SPORTIVA	

- piscine, saune ed assimilabili	
• piscine (sala vasca)	0,30
• saune	0,50
• ingressi	0,20
- palestre e assimilabili	
• campi gioco	0,20
• zone spettatori	1,50
• bowling	0,60
• ingressi	0,20
EDIFICI ADIBITI AD ATTIVITÀ SCOLASTICHE	
- asili nido e scuole materne	0,40
- aule scuole elementari, medie inferiori e superiori	0,45
- aule universitarie	0,60
- altri locali:	
• aule musica e lingue	0,50
• laboratori	0,30
• sale insegnanti	0,30