



Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino

Appunti universitari

Tesi di laurea

Cartoleria e cancelleria

Stampa file e fotocopie

Print on demand

Rilegature

NUMERO: 548

DATA: 05/06/2013

A P P U N T I

STUDENTE: Sicari

MATERIA: Fisica Tecnica Esercitazioni

Prof. Boffa_Toso

Il presente lavoro nasce dall'impegno dell'autore ed è distribuito in accordo con il Centro Appunti.

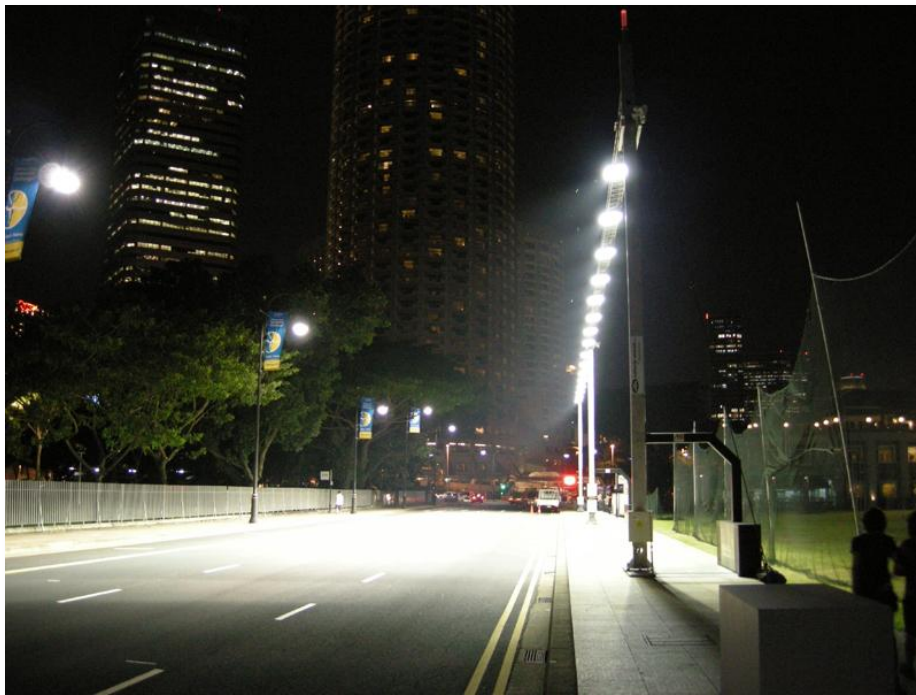
Tutti i diritti sono riservati. È vietata qualsiasi riproduzione, copia totale o parziale, dei contenuti inseriti nel presente volume, ivi inclusa la memorizzazione, rielaborazione, diffusione o distribuzione dei contenuti stessi mediante qualunque supporto magnetico o cartaceo, piattaforma tecnologica o rete telematica, senza previa autorizzazione scritta dell'autore.

**ATTENZIONE: QUESTI APPUNTI SONO FATTI DA STUDENTIE NON SONO STATI VISIONATI DAL DOCENTE.
IL NOME DEL PROFESSORE, SERVE SOLO PER IDENTIFICARE IL CORSO.**



ESERCITAZIONE DI ILLUMINOTECNICA

Progetto di massima dell'impianto di illuminazione artificiale di una strada



POLITECNICO DI TORINO

I Facoltà di Ingegneria

Corso di laurea in Ingegneria Civile

Prof. Ing. Cesare Boffa

Ing. Gianluca Toso

Anno accademico 2010/2011

Alunno: Rosario Sicari

Matricola: 163513

Indice

Premessa	4
Testo e richieste dell'esercitazione	5
Discussione preliminare	6
Punto a)	7
Punto b)	10
Considerazioni preliminari.....	10
Illuminamento nel punto P_1	10
Illuminamento nel punto P_2	11
Illuminamento nel punto P_3	12
Punto c).....	14
Punto d)	19
Punto e)	20
Punto f).....	21
Metodo analitico di calcolo di $\phi_{emesso da una sorgente}$	21
Metodo geometrico/grafico di calcolo di $\phi_{emesso da una sorgente}$	23
Punto g)	27

Testo e richieste dell'esercitazione

Si prenda in esame una strada rettilinea di larghezza pari a L ($L = 10 + 0,4 N$) metri, illuminata da lampade sospese al centro della carreggiata

L'altezza delle sorgenti è pari ad h ($h = 5 + 0,2 C$) metri.

N e C rappresentano il numero d'ordine alfabetico delle lettere iniziali del nome e del cognome dell'allievo. Si considera l'alfabeto italiano comprese le lettere straniere ($j k w x y$).

Si sa, inoltre, che le lampade sono poste ad una distanza tra loro pari a $L/2$, che il solido fotometrico è a simmetria di rotazione rispetto ad un asse verticale passante per la sorgente e che l'indicatrice fotometrica è data da $I = I_0(1 + \cos \varepsilon)$, ove ε è l'angolo con la verticale passante per la sorgente.

Per semplificare si ponga $-80^\circ < \varepsilon < +80^\circ$. Al di fuori di questi valori di ε , $I = 0$.

Si calcoli:

- La distribuzione dell'illuminamento E sulla superficie stradale in funzione di I_0 prodotta da una sola sorgente;
- Il valore di E prodotto dall'impianto in 3 punti $P_1 - P_2 - P_3$ specifici sulla carreggiata, in funzione di I_0 ;
- Il valore di E_{medio} nella regione R compresa fra due lampade, in funzione di I_0 ;
- Il valore di I_0 necessario per garantire un illuminamento medio in R di 50 lux;
- Il coefficiente di uniformità $U = E_{min}/E_{max}$ in R ;
- Il fattore di utilizzazione del flusso;
- I costi di gestione di una porzione dell'impianto di lunghezza pari a 1000 m.

Punto a)

Ciò che si richiede è di trovare una funzione che descriva correttamente la distribuzione dell'illuminamento E sulla superficie stradale. Si dovrà tenere conto che il risultato ottenuto sarà espresso (come richiesto) in funzione di I_0 . La funzione da cercare avrà invece una variabile: la distanza x che separa il punto da esaminare sulla strada dal piede della perpendicolare condotta dalla sorgente al piano della strada.

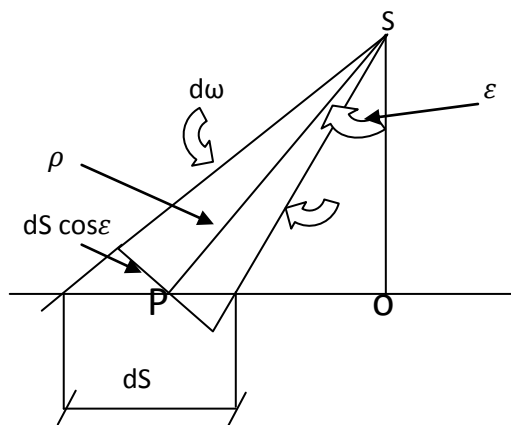
Non si dimentichi che viene espressamente richiesto di considerare una sola sorgente.

Dalla teoria è noto che:

$$E = \frac{d\phi}{dS} \text{ [lux]} \quad \text{ma} \quad d\phi = I \cdot d\omega \text{ [lumen]}$$

Ricordando la definizione di angolo solido ed aiutandosi con la figura, è possibile affermare che

$$d\omega = \frac{dS \cdot \cos \varepsilon}{\rho^2} \text{ [sterad]}$$



dove: $OP = x$; $OS = h$;

Procedendo a ritroso con le sostituzioni si ricava (d'ora in poi ometterò le unità di misura, ricordandole solo in presenza di dati numerici o comunque dove sarà espressamente necessario):

$$E = \frac{I(\varepsilon) \cdot \cos \varepsilon}{\rho^2} .$$

Nel nostro caso I è proprio funzione di ε , avendo infatti espresso l'indicatrice fotometrica come

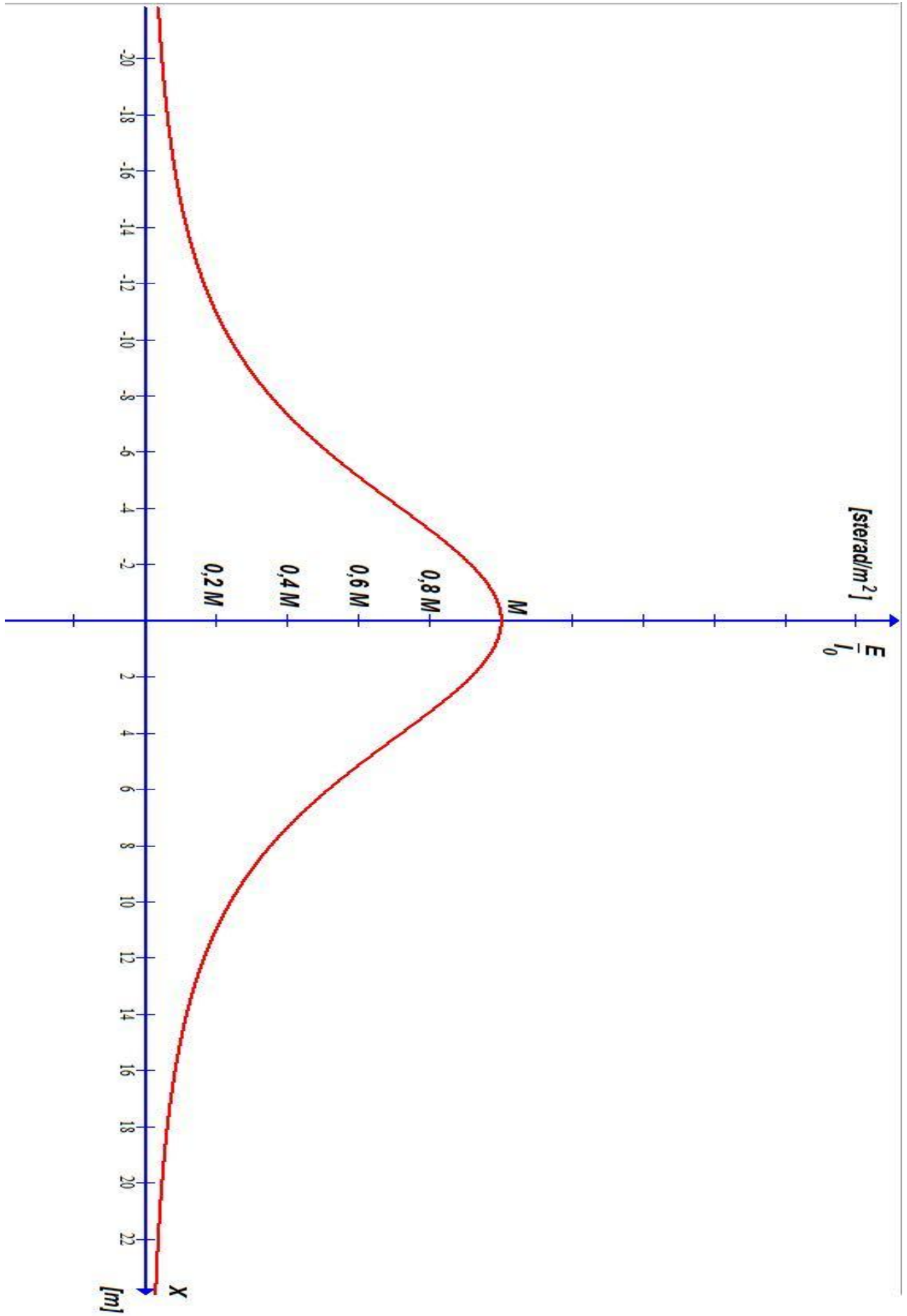
$$I = I_0(1 + \cos \varepsilon)$$

Sostituendo si ha

$$E = \frac{I_0(1 + \cos \varepsilon) \cdot \cos \varepsilon}{\rho^2}$$

Alcune osservazioni:

$$\cos \varepsilon = \frac{h}{\rho} \quad \rho^2 = h^2 + x^2$$



$$x = \frac{L}{2} + \frac{L}{4} = \frac{3}{4}L = 12,9 \text{ m}$$

$$E_2 = I_0 \frac{8,8 (\sqrt{8,8^2 + 12,9^2} + 8,8)}{(8,8^2 + 12,9^2)^2} \cong I_0 \cdot 0,0036133 \text{ [lux]}$$

Per la sorgente S3 si ha:

$$x = \frac{3}{4}L + \frac{L}{2} = \frac{5}{4}L = 21,5 \text{ m}$$

$$E_3 = I_0 \frac{8,8 (\sqrt{8,8^2 + 21,5^2} + 8,8)}{(8,8^2 + 21,5^2)^2} \cong I_0 \cdot 0,0009678 \text{ [lux]}$$

Poiché $E_3 < 10\% E_1$, allora per il criterio di esclusione lo trascuro.

In definitiva:

$$E_{tot} = 2(E_1 + E_2) = I_0 \cdot 0,0428283 \text{ [lux]}$$

Illuminamento nel punto P₂

Il punto P₂ si trova sul bordo esterno della strada, in corrispondenza all'interasse tra due sorgenti.

Anche in questo caso è possibile sfruttare la geometria del problema. Infatti data la particolare simmetria in cui si trova il punto in P₂, l'illuminamento dovuto alle sorgenti alla sua destra sarà uguale a quello dovuto alle sorgenti alla sua sinistra. In conseguenza di ciò si calcola l'illuminamento dovuto alle sorgenti situate da un solo lato (nel nostro caso considereremo quelle alla sua destra: S1, S2, S3 ecc...) e poi raddoppiarlo.

Non si dimentichi di applicare il criterio di esclusione.

Per la sorgente S1 si ha:

$$x = \sqrt{\left(\frac{L}{2}\right)^2 + \left(\frac{L}{4}\right)^2} = \frac{\sqrt{5}}{4}L \cong 9,615 \text{ m}$$

$$E_1 = I_0 \frac{8,8 (\sqrt{8,8^2 + 9,615^2} + 8,8)}{(8,8^2 + 9,615^2)^2} \cong I_0 \cdot 0,0066571 \text{ [lux]}$$

Per la sorgente S2 si ha:

$$x = \sqrt{\left(\frac{L}{2}\right)^2 + \left(\frac{3L}{4}\right)^2} = \frac{\sqrt{13}}{4}L \cong 15,504 \text{ m}$$

$$E_2 = I_0 \frac{8,8 (\sqrt{8,8^2 + 15,504^2} + 8,8)}{(8,8^2 + 15,504^2)^2} \cong I_0 \cdot 0,0023199 \text{ [lux]}$$

Per la sorgente S3 si ha:

$$E_3 = I_0 \frac{8,8 (\sqrt{8,8^2 + 19,230^2} + 8,8)}{(8,8^2 + 19,230^2)^2} \cong I_0 \cdot 0,0013176 \text{ [lux]}$$

Per la sorgente S4 si ha:

$$x = \sqrt{\left(\frac{L}{2}\right)^2 + \left(\frac{3L}{2}\right)^2} = \frac{\sqrt{10}}{2} L \cong 27,196 \text{ m}$$

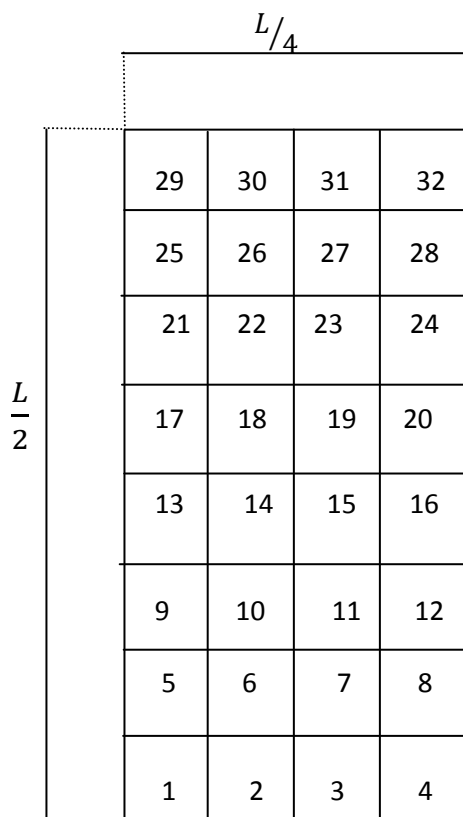
$$E_4 = I_0 \frac{8,8 (\sqrt{8,8^2 + 27,196^2} + 8,8)}{(8,8^2 + 27,196^2)^2} \cong I_0 \cdot 0,0004928 \text{ [lux]}$$

Poiché $E_4 < 10\% E_1$, per il criterio di esclusione lo trascuro. In definitiva:

$$E_{tot} = E_1 + 2(E_2 + E_3) \cong I_0 \cdot 0,0189893 \text{ [lux]}$$

- 1) Poiché i quadratini della sottoregione R_1 hanno uguale area, segue immediatamente che il valore medio dell'illuminamento in questa regione è pari alla media aritmetica dei singoli illuminamenti relativi ai "quadratini". Si tratterebbe, infatti, di una media pesata, ma poiché i singoli fattori "pesano" allo stesso modo (l'area su cui vengono calcolati gli illuminamenti è la stessa), ci si riduce al calcolo di una media aritmetica.
- 2) Il valore dell'illuminamento medio calcolato sulla sottoregione R_1 è esattamente uguale a quello riscontrabile sulla intera regione R. Ciò segue dalla scelta di R_1 come sottoregione "ad uguale illuminamento".

Ecco come è stata suddivisa la sottoregione R_1 :



Nella tabella seguente si tenga conto che:

- N indica il quadratino a cui sono riferiti i calcoli;
- L'illuminamento viene calcolato sul centro di ogni quadratino;
- Vale sempre il criterio di esclusione per cui se $E_n < 10\% E_1$, allora E_n viene trascurato;
- Immaginando di "immergere" la figura sopra riportata in un piano cartesiano xy, allora d_1 rappresenta la componente lungo l'asse delle ordinate della distanza x del centro del quadratino dalla sorgente in questione e d_2 rappresenta la componente lungo l'asse delle ascisse. Risulta evidente che $x = \sqrt{d_1^2 + d_2^2}$;
- Non è possibile sfruttare alcuna simmetria: i calcoli devono essere svolti separatamente per le sorgenti a destra e per quelle a sinistra del punto in esame;
- I risultati ottenuti sono ancora una volta in funzione di I_0 .

Ecco la tabella:

13	S1	0,019163297	I_0	8,8	3,8006989	3,7625	0,5375		
	S0	0,006324347	I_0	8,8	9,8818173	3,7625	9,1375		
	S2	0,007648257	I_0	8,8	8,8972081	3,7625	8,0625	0,034944219	I_0
	S3	0,001808317	I_0	8,8	17,082017	3,7625	16,6625		
14	S1	0,018353259	I_0	8,8	4,093478	3,7625	1,6125		
	S0	0,005227719	I_0	8,8	10,883545	3,7625	10,2125		
	S2	0,009215827	I_0	8,8	7,9360924	3,7625	6,9875	0,034926636	I_0
	S3	0,002129831	I_0	8,8	16,035166	3,7625	15,5875		
15	S1	0,016888412	I_0	8,8	4,6237498	3,7625	2,6875		
	S0	0,004329802	I_0	8,8	11,89807	3,7625	11,2875		
	S2	0,011016325	I_0	8,8	7,0081426	3,7625	5,9125	0,034757476	I_0
	S3	0,002522937	I_0	8,8	14,9923	3,7625	14,5125		
16	S1	0,015016183	I_0	8,8	5,3209785	3,7625	3,7625		
	S0	0,003598979	I_0	8,8	12,922376	3,7625	12,3625		
	S2	0,012991692	I_0	8,8	6,1284429	3,7625	4,8375	0,03461224	I_0
	S3	0,003005386	I_0	8,8	13,954312	3,7625	13,4375		
17	S1	0,016224741	I_0	8,8	4,8672695	4,8375	0,5375		
	S0	0,005795191	I_0	8,8	10,339019	4,8375	9,1375		
	S2	0,006935813	I_0	8,8	9,4024099	4,8375	8,0625	0,030691485	I_0
	S3	0,00173574	I_0	8,8	17,350513	4,8375	16,6625		
18	S1	0,015601779	I_0	8,8	5,0991727	4,8375	1,6125		
	S0	0,004835406	I_0	8,8	11,30029	4,8375	10,2125		
	S2	0,00826326	I_0	8,8	8,4986212	4,8375	6,9875	0,030735961	I_0
	S3	0,002035516	I_0	8,8	16,320893	4,8375	15,5875		
19	S1	0,014464951	I_0	8,8	5,5339012	4,8375	2,6875		
	S0	0,004038372	I_0	8,8	12,280434	4,8375	11,2875		
	S2	0,009760054	I_0	8,8	7,6393103	4,8375	5,9125	0,030662698	I_0
	S3	0,002399322	I_0	8,8	15,297518	4,8375	14,5125		
20	S1	0,012991692	I_0	8,8	6,1284429	4,8375	3,7625		
	S0	0,003381491	I_0	8,8	13,275271	4,8375	12,3625		
	S2	0,011371172	I_0	8,8	6,8412581	4,8375	4,8375	0,030586391	I_0
	S3	0,002842037	I_0	8,8	14,28173	4,8375	13,4375		
21	S1	0,013455027	I_0	8,8	5,9368815	5,9125	0,5375		
	S0	0,005227719	I_0	8,8	10,883545	5,9125	9,1375		
	S-1	0,00142197	I_0	8,8	18,696967	5,9125	17,7375	0,027941147	I_0
	S2	0,006184969	I_0	8,8	9,9980779	5,9125	8,0625		
	S3	0,00165146	I_0	8,8	17,680401	5,9125	16,6625		
22	S1	0,012991692	I_0	8,8	6,1284429	5,9125	1,6125		
	S0	0,004407984	I_0	8,8	11,800543	5,9125	10,2125		
	S2	0,007278044	I_0	8,8	9,1532952	5,9125	6,9875	0,026604538	I_0
	S3	0,001926817	I_0	8,8	16,671167	5,9125	15,5875		
23	S1	0,012138256	I_0	8,8	6,4946372	5,9125	2,6875		
	S0	0,003716334	I_0	8,8	12,742265	5,9125	11,2875		
	S2	0,008486078	I_0	8,8	8,3615377	5,9125	5,9125	0,026598745	I_0
	S3	0,002258076	I_0	8,8	15,670683	5,9125	14,5125		
24	S1	0,011016325	I_0	8,8	7,0081426	5,9125	3,7625		
	S0	0,003138119	I_0	8,8	13,703615	5,9125	12,3625		
	S2	0,009760054	I_0	8,8	7,6393103	5,9125	4,8375	0,026571703	I_0
	S3	0,002657206	I_0	8,8	14,680738	5,9125	13,4375		

Punto d)

Per determinare il valore di I_0 affinché sia garantito un illuminamento medio in R di 50 lux è sufficiente usare la formula ricavata al punto precedente.

Infatti è stato ricavato che

$$E_{medio} = I_0 \cdot 0,0325790 \text{ [lux]}$$

da cui

$$I_0 = \frac{E_{medio}}{0,0325790} \text{ [cd]}$$

Noto che $E_{medio} = 50 \text{ lux}$ si ha:

$$I_0 = \frac{50}{0,0325790} \cong 1534,73 \text{ [cd]}$$

che è il valore cercato.

Punto f)

Si vuole ora calcolare il fattore di utilizzazione del flusso, definito come:

$$C_U = \frac{\phi_{utile}}{\phi_{emesso\ dalle\ sorgenti}}$$

Supponendo di avere un tratto di strada lungo 1000 m, in tale tratto si trovano n sorgenti luminose, dove

$$n = \frac{1000}{\frac{L}{2}} = \frac{2000}{L} = \frac{2000}{17,2} \cong 116,279 \cong 116\ \text{sorgenti}$$

In tale contesto la superficie utile equivale all'area della strada (larga L e lunga 1000 m) e vale

$$S_{utile} = 1000 \cdot L = 1000 \cdot 17,2 = 17200\ m^2$$

Dalla teoria è noto che ϕ_{utile} si ottiene moltiplicando il valore dell'illuminamento medio (che è stato precedentemente calcolato al punto c) per la superficie utile. Pertanto si ha:

$$\phi_{utile} = E_{medio} \cdot S_{utile} = I_0 \cdot 0,0325790 \cdot 17200 = 560,35827 \cdot I_0\ [lumen]$$

Osservazioni:

- Sebbene I_0 sia stato espressamente calcolato al punto *d*, si osservi che sia il flusso utile che quello emesso dalle sorgenti dipendono da tale "parametro". Pertanto, poiché il fattore di utilizzazione del flusso è un rapporto tra i due, il valore di I_0 al numeratore si eliderà con quello al denominatore e non risulta necessario scrivere espressamente il suo valore nei calcoli. Ciò fa riflettere come il problema proposto sia essenzialmente di tipo geometrico.;
- Mentre per il calcolo di ϕ_{utile} è stato utilizzato un solo procedimento (quello sopra riportato), per il calcolo di $\phi_{emesso\ dalle\ sorgenti}$ è possibile affrontare il problema in due modi: uno di tipo analitico e uno di tipo (ancora una volta) geometrico/grafico.

Si badi che il flusso emesso dalle sorgenti è pari alla sommatoria del flusso emesso da ogni singola sorgente; nel nostro caso, avendo calcolato il numero di sorgenti luminose presenti in un tratto lungo 1000 m si ha:

$$\phi_{emesso\ dalle\ sorgenti} = n \cdot \phi_{emesso\ da\ una\ sorgente} = 116 \cdot \phi_{emesso\ da\ una\ sorgente}$$

Il problema si riduce ora al calcolo di $\phi_{emesso\ da\ una\ sorgente}$.

Metodo analitico di calcolo di $\phi_{emesso\ da\ una\ sorgente}$

Nota l'indicatrice fotometrica risulta evidente che

$$\phi_{emesso\ da\ una\ sorgente} = \int_0^{4\pi} I_0(1 + \cos \varepsilon) d\omega$$

Questa è la formula generale, *ma non bisogna dimenticare che è stata imposta una importante condizione:*

$$-80^\circ < \varepsilon < +80^\circ \quad \text{al di fuori di questo intervallo } I = I_0(1 + \cos \varepsilon) = 0$$

Si ha:

$$\phi_{emesso\ dalle\ sorgenti} = 116 \cdot \phi = 955,72211 \cdot I_0 \quad [lumen]$$

In definitiva:

$$C_U = \frac{\phi_{utile}}{\phi_{emesso\ dalle\ sorgenti}} = \frac{560,35827 \cdot I_{\frac{\pi}{4}}}{955,72211 \cdot I_{\frac{\pi}{4}}} \cong 0,5863$$

Si noti che si tratta di un numero puro, poiché nasce come rapporto tra due grandezze fisiche con la stessa unità di misura.

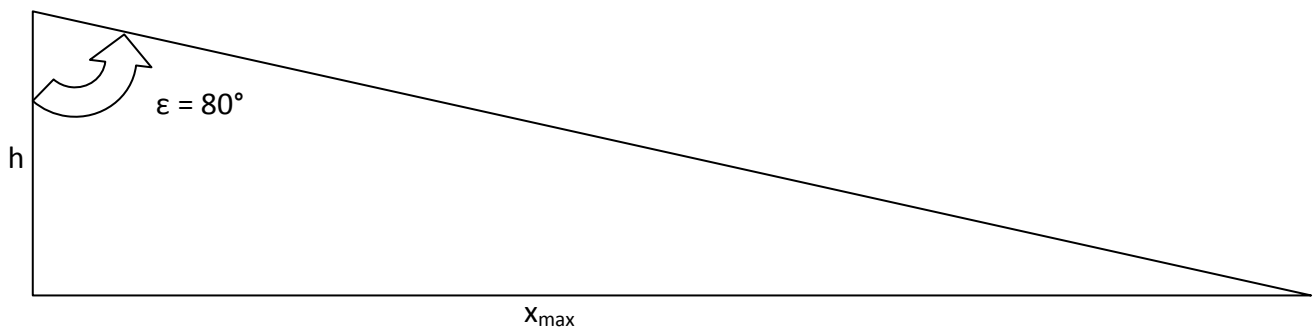
Metodo geometrico/grafico di calcolo di $\phi_{emesso\ da\ una\ sorgente}$

Si ricordi l'importante condizione

$$-80^\circ < \varepsilon < +80^\circ$$

Quando ε raggiunge il suo valore massimo, il cono di luce proietta sul piano della strada una circonferenza di raggio

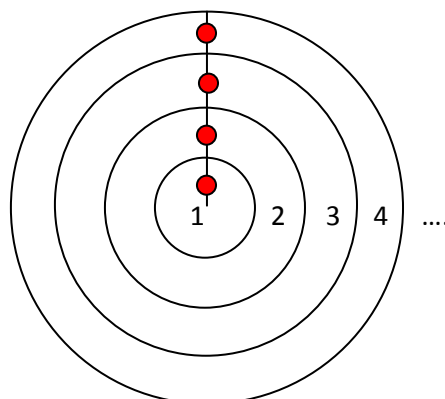
$$x_{max} = h \cdot \tan \varepsilon = 8,8 \cdot \tan \frac{4}{9}\pi \cong 49,907 \text{ m}$$



È possibile suddividere x_{max} in 50 parti di uguale lunghezza $r = \frac{x_{max}}{50} = \frac{49,907}{50} \cong 0,998 \text{ m}$

In questo modo la porzione di piano racchiusa dalla circonferenza di raggio x_{max} sarà divisa in 50 corone circolari ad uguale illuminamento. In analogia a quanto fatto nel punto c, questo ragionamento aiuta nel calcolo dell'illuminamento medio sulla regione circolare di raggio x_{max} .

Ecco uno schema (per ovvie ragioni non sono rappresentate tutte le corone circolari):



26	25,9517856	25,4527128	8,8	0,000597745	_0	159,6275478	0,095416611	_0
27	26,9499312	26,4508584	8,8	0,000534476	_0	165,8874517	0,088662787	_0
28	27,9480768	27,449004	8,8	0,000479596	_0	172,1473555	0,082561237	_0
29	28,9462224	28,4471496	8,8	0,000431796	_0	178,4072593	0,077035607	_0
30	29,944368	29,4452952	8,8	0,000389997	_0	184,6671632	0,072019605	_0
31	30,9425136	30,4434408	8,8	0,000353306	_0	190,927067	0,067455606	_0
32	31,9406592	31,4415864	8,8	0,000320982	_0	197,1869708	0,063293435	_0
33	32,9388048	32,439732	8,8	0,000292407	_0	203,4468747	0,059489329	_0
34	33,9369504	33,4378776	8,8	0,000267064	_0	209,7067785	0,056005038	_0
35	34,935096	34,4360232	8,8	0,000244515	_0	215,9666823	0,052807062	_0
36	35,9332416	35,4341688	8,8	0,000224393	_0	222,2265862	0,049865995	_0
37	36,9313872	36,4323144	8,8	0,000206384	_0	228,48649	0,047155969	_0
38	37,9295328	37,43046	8,8	0,000190223	_0	234,7463939	0,044654176	_0
39	38,9276784	38,4286056	8,8	0,000175682	_0	241,0062977	0,042340461	_0
40	39,925824	39,4267512	8,8	0,000162566	_0	247,2662015	0,040196974	_0
41	40,9239696	40,4248968	8,8	0,000150706	_0	253,5261054	0,038207871	_0
42	41,9221152	41,4230424	8,8	0,000139958	_0	259,7860092	0,036359058	_0
43	42,9202608	42,421188	8,8	0,000130195	_0	266,045913	0,034637973	_0
44	43,9184064	43,4193336	8,8	0,000121310	_0	272,3058169	0,033033392	_0
45	44,916552	44,4174792	8,8	0,000113206	_0	278,5657207	0,03153527	_0
46	45,9146976	45,4156248	8,8	0,000105800	_0	284,8256245	0,030134595	_0
47	46,9128432	46,4137704	8,8	0,000099020	_0	291,0855284	0,028823272	_0
48	47,9109888	47,411916	8,8	0,000092801	_0	297,3454322	0,027594009	_0
49	48,9091344	48,4100616	8,8	0,000087087	_0	303,6053361	0,026440229	_0
50	49,90728	49,4082072	8,8	0,000081829	_0	309,8652399	0,02535599	_0

Si ricava facilmente che:

Atot (m2)	$\Sigma(E_i \cdot A_i)$ [lumen]
7824,879795	8,24578925 _0

Da cui

$$E_{medio} = \frac{8,2457892 \cdot I_0}{7824,879795} \cong 0,0010538 \cdot I_0 \text{ [lux]}$$

Il valore del flusso emesso da una sorgente sarà pertanto:

$$\phi_{emesso da una sorgente} = E_{medio} \cdot A_{tot} = I_0 \cdot 0,0010538 \cdot 7824,879795 = 8,2457879 \cdot I_0 \text{ [lumen]}$$

Ricordando che

$$\phi_{emesso dalle sorgenti} = n \cdot \phi_{emesso da una sorgente} = 116 \cdot \phi_{emesso da una sorgente}$$

Si ha:

$$\phi_{emesso dalle sorgenti} = 116 \cdot \phi_{emesso da una sorgente} = 956,51140 \cdot I_0 \text{ [lumen]}$$

In definitiva:

Punto g)

Si chiede ora di valutare i costi di gestione dell'illuminamento lungo 1000 m della strada in oggetto date le seguenti ipotesi:

- Costo energia elettrica = 0,13 €/kWh
- Utilizzo orario al giorno = 12 ore
- Utilizzo mensile dell'illuminazione = 30 giorni
- Efficienza luminosa $\eta = 120$ lumen/W
- Vita media delle lampadine = 7000 h
- Costo di una sorgente luminosa = 75,00 €

Per poter effettuare la valutazione dei costi di gestione è necessario ricavare:

- 1) La superficie della strada in oggetto:

avendo un tratto di strada lungo 1000 m, si ha:

$$S = L \cdot 1000 = 17,2 \cdot 1000 = 17200 \text{ m}^2$$

- 2) La potenza emessa ϕ_{utile} :

è data dal prodotto dell'illuminamento medio (reso noto nel punto d e pari a 50 lux) per la superficie utile (si potrebbe, in effetti, anche sfruttare la relazione trovata nel precedente punto f: le due relazioni, infatti, sono del tutto equivalenti):

$$\begin{aligned} \phi_{utile} &= E_{medio} \cdot S = 50 \cdot 17200 \cong 860000 \text{ [lumen]} \\ &= 560,35827 \cdot I_0 = 560,35827 \cdot 1534,73 \cong \end{aligned}$$

- 3) Il numero n delle lampadine:

è dato dal rapporto tra la lunghezza di 1000 m della strada e la distanza tra una lampada e l'altra:

$$n = \frac{1000}{\frac{L}{2}} = \frac{2000}{L} = \frac{2000}{17,2} \cong 116,279 \cong 116 \text{ sorgenti}$$

- 4) La potenza assorbita da una lampadina:

è data dal rapporto tra la potenza emessa da una lampadina e la sua efficienza luminosa. Si ricordi che il flusso emesso da una lampadina è stato ricavato al punto precedente. Si ottiene:

$$W = \frac{\phi_{emesso \text{ da una sorgente}}}{\eta} = \frac{8,238983669 \cdot I_0}{120} = \frac{8,238983669 \cdot 1534,732422}{120} \cong 105,37 [W]$$

In modo del tutto analogo si sarebbe giunti allo stesso risultato sfruttando la formula:

$$W = \frac{\phi_{utile}}{C_U} \cdot \frac{1}{\eta} \cdot \frac{1}{n}$$



ESERCITAZIONE DI ACUSTICA ARCHITETTONICA

Progetto acustico di massima di una sala per conferenze



POLITECNICO DI TORINO

I Facoltà di Ingegneria

Corso di laurea in Ingegneria Civile

Prof. Ing. Cesare Boffa

Ing. Gianluca Toso

Anno accademico 2010/2011

Alunno: Rosario Sicari

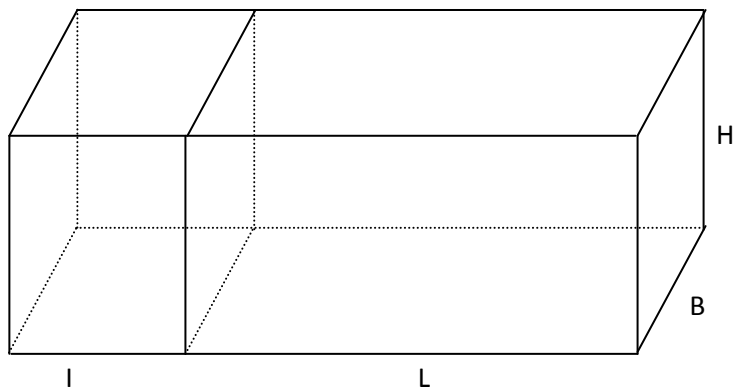
Matricola: 163513

Indice

Premessa	4
Testo e richieste dell'esercitazione	5
Discussione preliminare	7
Punto 1.	8
Dimensionamento superfici	9
Pianta	9
Soffitto	11
Tramezzo	12
Parete frontale.....	12
Pareti laterali destra e sinistra.....	12
Scelta rivestimenti	12
Poltrone totalmente occupate dagli uditori.....	12
Metà poltrone occupate.....	14
Punto 2.	16
Punto 3.	17
Bibliografia.....	20

Testo e richieste dell'esercitazione

Sia data una sala per conferenze di forma parallelepipedica avente lunghezza L , altezza H e larghezza B , come schematizzato in figura.



$$L = 10 + 0,4 N \text{ [m]}$$

$$B = 6 + 0,3 N \text{ [m]}$$

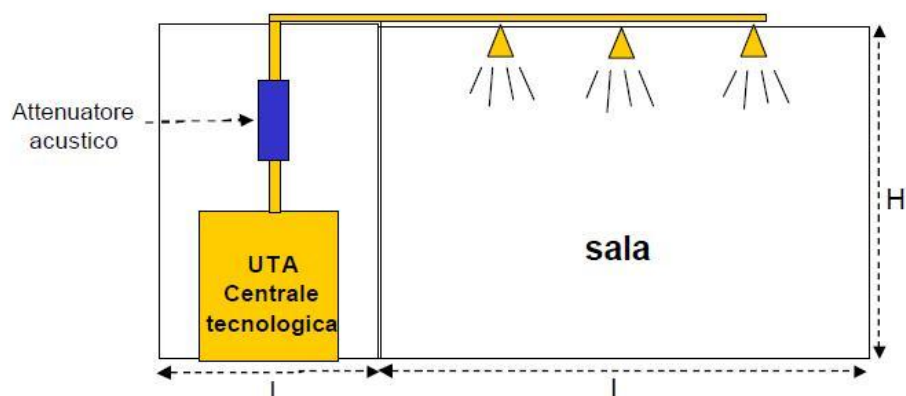
$$H = 4 + 0,1 N \text{ [m]}$$

$$I = 6 + 0,2 C \text{ [m]}$$

N e C rappresentano il numero d'ordine alfabetico delle lettere iniziali del nome e del cognome dell'allievo. Si considera l'alfabeto italiano comprese le lettere straniere ($j k w x y$).

Adiacente alla sala si trova la centrale tecnologica che alloggia gli impianti di climatizzazione della sala stessa.

Le dimensioni della centrale sono lunghezza I , larghezza B ed altezza H .



Discussione preliminare

Occorre innanzitutto stabilire i valori da assegnare ad N e C.

a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o	p	q	r	s	t	u	v	w	x	y	z
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26

Nel mio caso (**Rosario Sicari**):

$$N = 18$$

$$C = 19$$

Ne segue che:

$$L = 10 + 0,4 \cdot 18 = \mathbf{17,2 \text{ m}}$$

$$B = 6 + 0,3 \cdot 18 = \mathbf{11,4 \text{ m}}$$

$$H = 4 + 0,1 \cdot 18 = \mathbf{5,8 \text{ m}}$$

$$I = 6 + 0,2 \cdot 19 = \mathbf{9,8 \text{ m}}$$

$$W_{UTA} = 6 + 0,1 \cdot 19 = \mathbf{7,9 \text{ W}}$$

$$k = \frac{\tau_{60ott1000}}{\sqrt[9]{V}} = \frac{0,8}{\sqrt[9]{1137,264}} = 0,366 \frac{s}{m^3}$$

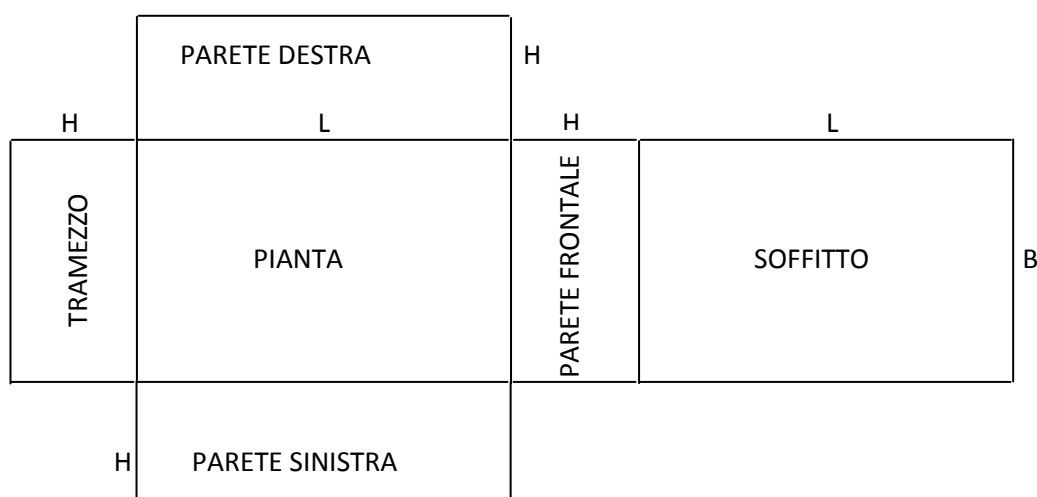
Nell'ipotesi di densità di energia sonora uniforme in ogni punto (ambiente riverberante, α piccoli) è possibile applicare la formula di Sabine:

$$\tau_{60} = \frac{0,16 V}{\sum \alpha_i A_i}$$

Poiché si vuole raggiungere il tempo ottimale poniamo τ_{60} pari al $\tau_{60ott1000}$ prima calcolato. Per formula inversa si ha:

$$\sum \alpha_i A_i = \frac{0,16 \cdot V}{\tau_{60}} = \frac{0,16 \cdot 1137,264}{0,8} \cong 227,453 \text{ m}^2$$

Suppongo di sviluppare la sala per conferenze come se distendessi su un unico piano le sei facce del parallelepipedo:



Dimensionamento superfici

Pianta

La superficie della sala conferenze denominata "pianta" ha una estensione di

$$A_{pianta} = L \cdot B = 17,2 \cdot 11,4 = 196,08 \text{ m}^2.$$

Dopo un attento studio, alla luce di dover considerare:

- un certo numero di posti a sedere (al cui numero esatto si è giunti solo dopo un lungo studio circa la suddivisione degli spazi);
- la presenza di un tavolo (con relative poltrone) posto su una pedana rialzata dal quale gli oratori possano parlare;

Dove:

U indica una uscita di sicurezza;

$P = 0,50$ m

$S = 0,48$ m.

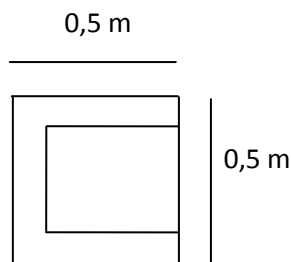
Si procede con i calcoli:

$$n_{poltrone\ sala} = 16 \cdot 12 = 192\ poltrone$$

$$n_{poltrone\ tavolo} = 5\ poltrone$$

In totale sono presenti

$$n_{poltrone} = n_{poltrone\ sala} + n_{poltrone\ tavolo} = 192 + 5 = 197\ poltrone$$



Poltrona vista in pianta

L'area di ogni **poltrona** vale:

$$A_{poltrona} = 0,5^2 = 0,25\ m^2$$

L'area del **tavolo** vale:

$$A_{tavolo} = 4,8 \cdot 0,7 = 3,36\ m^2$$

L'area **utile** ai fini dei calcoli della **pedana rialzata** vale:

$$A_{rialzo} = (2,5 \cdot 9,2) - A_{tavolo} - 5A_{poltrona} = 23 - 3,36 - 5(0,25) = 18,39\ m^2$$

Allo stesso modo, l'area **utile** ai fini dei calcoli del **pavimento** vale:

$$A_{pavimento} = A_{pianta} - (2,5 \cdot 9,2) - 192 \cdot A_{poltrona} = 196,08 - 23 - 192(0,25) = 125,08\ m^2$$

Soffitto

$$A_{soffitto} = L \cdot B = 196,08\ m^2$$

Tavolo in legno:

Per il legno $\alpha = 0,05$

$$\alpha \cdot A_{tavolo} = 0,05 \cdot 3,36 = 0,168 \text{ m}^2$$

Pedana rialzata in moquette media (pelo 6 mm):

Per la moquette $\alpha = 0,3$

$$\alpha \cdot A_{rialzo} = 0,3 \cdot 18,39 = 5,517 \text{ m}^2$$

Pavimento in linoleum:

Per il linoleum $\alpha = 0,03$

$$\alpha \cdot A_{pavimento} = 0,03 \cdot 125,08 = 3,752 \text{ m}^2$$

Soffitto:

Per l'intonaco a calce $\alpha = 0,04$

$$\alpha \cdot A_{soffitto} = 0,04 \cdot 196,08 = 7,843 \text{ m}^2$$

Tramezzo:

Per le lastre di cemento poroso $\alpha = 0,40$

$$\alpha \cdot A_{tramezzo} = 0,40 \cdot 66,12 = 26,448 \text{ m}^2$$

Parete frontale:

Per l'intonaco a calce $\alpha = 0,04$

$$\alpha \cdot A_{parete\ frontale} = 0,04 \cdot 61,80 = 2,472 \text{ m}^2$$

Per le tende pesanti a 20 cm dalla parete $\alpha = 0,50$

$$\alpha \cdot A_{porta} = 0,50 \cdot 4,32 = 2,16 \text{ m}^2$$

Pareti laterali:

Per le lastre in cemento poroso $\alpha = 0,40$

$$\alpha \cdot 2A_{parete\ lat} = 0,40 \cdot 2_{pareti} \cdot 91,12 = 72,896 \text{ m}^2$$

Per le tende pesanti a 20 cm dalla parete $\alpha = 0,50$. Applicandole alle uscite di sicurezza si ha:

$$\alpha \cdot 3 \cdot A_{uscita} \cdot 2_{pareti} = 0,50 \cdot 3 \cdot 2,88 \cdot 2 = 8,64 \text{ m}^2$$

Sommando i vari contributi si ha:

$$\sum \alpha_i A_i = 94,56 + 0,168 + 5,517 + 3,752 + 7,843 + 26,448 + 2,472 + 2,16 + 72,896 + 8,64 =$$

Il valore ottenuto della sommatoria sembrerebbe discostarsi da quello calcolato tramite la formula di Sabine, tuttavia non c'è da preoccuparsi.

Infatti per questo valore di sommatoria si ottiene

$$\tau_{60} = \frac{0,16 \cdot 1137,264}{211,456} \cong 0,86 \text{ s}$$

un valore assai prossimo a quello ottimale (non si dimentichi il fatto che il grafico la cui lettura ha permesso di ricavare il valore del tempo ottimale presenta una sensibilità - lungo l'asse delle ordinate - del decimo di secondo e che la scala dei volumi è di tipo logaritmico, innalzando notevolmente l'errore in fase di lettura; in effetti il tempo ottimale cade a metà tra 0,8 e 0,9 secondi, "più vicino" al primo valore. Per tale motivo non si può dire che il valore ottimale è di 0,83 ÷ 0,86 secondi (non è possibile apprezzare questa sensibilità nella scala) ma ci si deve limitare a darne il valore più prossimo a quello rappresentato in scala, con la inevitabile conseguenza di portare con sé un certo "errore" che influisce nei calcoli sopra svolti).

Punto 3.

Si vuole ora scegliere il materiale e dimensionare la parete divisoria affinché il livello di intensità acustica indotta nella sala conferenze dal rumore proveniente dalla centrale tecnologica sia ≤ 28 dB.

Per ipotesi è noto che

$$W_{UTA} = 7,9 \text{ W}.$$

L'intensità acustica massima ammissibile nella sala per conferenze vale I_{MAX} . Dalla definizione di decibel si ha:

$$28 = 10 \log_{10} \frac{I_{MAX}}{I_0} \quad \text{da cui} \quad 2,8 = \log_{10} I_{MAX} - \log_{10} I_0$$

Da cui ancora

$$\log_{10} I_{MAX} = 2,8 + \log_{10} I_0 = 2,8 - 12 = -9,2$$

Per cui risulta:

$$I_{MAX} = 10^{-9,2} = 6,31 \cdot 10^{-10} \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

La potenza sonora massima ammissibile, pertanto, risulta essere:

$$W_{MAX} = I_{MAX} \cdot \sum \alpha_i A_i = 6,31 \cdot 10^{-10} \cdot 227,453 = 1,435 \cdot 10^{-7} \text{ W}$$

Noto il valore della potenza sonora emessa dalla UTA, è possibile calcolare l'intensità sonora presente (in condizioni di regime) nella "sala macchine". Per far ciò, bisogna prima stabilire i rivestimenti della stanza stessa.

È logico pensare che la stanza abbia almeno una porta di accesso, che possiamo supporre essere in legno ($\alpha = 0,05$). Le dimensioni della porta sono:

$$l = 1,20 \text{ m}$$

$$h = 2,40 \text{ m}$$

Per cui l'area della porta vale:

$$A_{porta} = 1,20 \cdot 2,40 = 2,88 \text{ m}^2$$

Il pavimento (trascurando la superficie su cui poggia la UTA) ha estensione

$$A_{pavimento} = l \cdot B = 9,8 \cdot 11,4 = 111,72 \text{ m}^2$$

Supponiamo che esso sia in cemento non verniciato a finitura ruvida: $\alpha = 0,06$.

Il soffitto, la cui estensione è pari a quella del pavimento viene spruzzato con fibra di cellulosa da 25 mm (su supporto solido).

Immaginando che la mia parete abbia densità costante vale la relazione

$$\rho = \frac{M}{s} = \text{cost} \quad \text{dove } s \text{ è lo spessore della parete}$$

Per cui

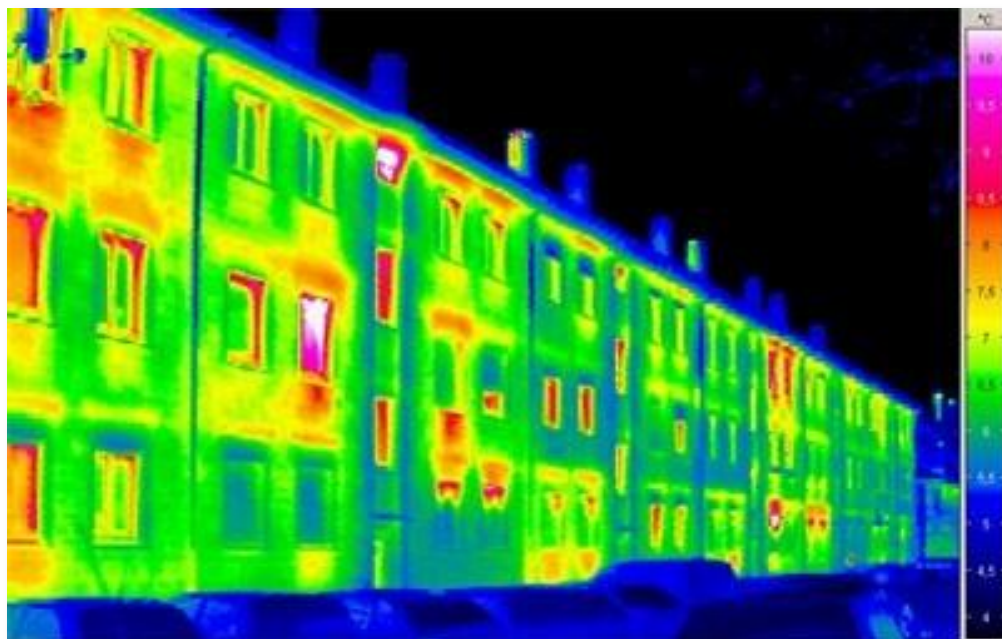
$$\frac{M}{s} = \frac{M'}{s'} \quad \rightarrow \quad s = \frac{M}{M'} \cdot s' = \frac{371,5}{380} \cdot 0,3 = 0,293 \text{ m}$$

È stato necessario rivestire la stanza adibita ad alloggiare la UTA perché il livello di intensità sonora generato dalla macchina nell'ambiente è molto elevato (dai calcoli, qui non riportati, risulta essere di circa 102 dB) ed in assenza di una adeguata scelta di rivestimenti si sarebbe giunti (affinché venisse garantito il livello sonoro massimo indotto nella sala conferenze di 28 dB) alla conclusione di realizzare una parete divisoria con elevata massa frontale ma soprattutto elevato spessore (circa 80 cm). Si è preferito, quindi, "insonorizzare" la "sala macchine" (con i relativi costi) ed avere una parete normalmente spessa, piuttosto che avere una sala macchine poco assorbente ed una parete divisoria spessa 80 cm e costituita esclusivamente da materiali come lamiera zincata (o comunque materiali ad alto potere fono isolante) il cui utilizzo avrebbe senz'altro determinato conseguenze negative dal punto di vista strutturale (per ovvie ragioni) nonché dal punto di vista funzionale (ad esempio, una parete costituita esclusivamente da lamiera continua zincata, anche supposto che resista agli sforzi alla quale è sottoposta, impedisce alle onde elettromagnetiche (o comunque ne ostacola molto) il passaggio da una parte all'altra della parete stessa per effetto gabbia di Faraday).



ESERCITAZIONE DI TRASMISSIONE DEL CALORE

Bilancio energetico di un edificio



POLITECNICO DI TORINO

I Facoltà di Ingegneria

Corso di laurea in Ingegneria Civile

Prof. Ing. Cesare Boffa

Ing. Gianluca Toso

Anno accademico 2010/2011

Alunno: Rosario Sicari

Matricola: 163513

Indice

Premessa	5
Testo e richieste dell'esercitazione	6
Discussione preliminare	8
Punto 1: calcolo potenza stufa	9
Flusso attraverso le superfici laterali opache e il soffitto.....	9
Flusso attraverso il pavimento	10
Flusso attraverso le superfici vetrate	11
Flusso relativo ai ricambi d'aria	12
Flusso complessivo	12
Punto 2: calcolo costo energia.	13
Punto 3: calcolo potenza stufa a seguito di singoli interventi.....	15
Primo intervento	15
Flusso totale.....	15
Secondo intervento	16
Flusso totale.....	16
Terzo intervento	16
Flusso totale.....	16
Punto 4: calcolo costo energia a seguito di singoli interventi.....	17
Primo intervento	17
Secondo intervento	17
Terzo intervento	17
Punto 5: calcolo Δ costo massimo	18
Primo intervento	18
Secondo intervento	18
Terzo intervento	18
Punto 6: indagine di mercato.	19
Primo intervento	19
Secondo intervento	19
Terzo intervento	20
Punto 7: calcolo effetti prodotti dal ricorso a più interventi.....	21
Primo e secondo intervento	21

Premessa

Scopo di questa esercitazione è quello di applicare le conoscenze acquisite in materia di trasmissione del calore ad un caso pratico quale quello di stilare un bilancio energetico di un edificio.

Per raggiungere il suddetto scopo, la pura e “meccanica” applicazione delle formule apprese dalla teoria non è stata sufficiente; infatti, alcune questioni, non previste in fase di assegnazione della esercitazione, sono prontamente balzate fuori e per poterle risolvere è stato necessario coinvolgere nozioni apprese da altri corsi, in particolare da quello di Analisi Matematica I. A tutto ciò si è dovuta integrare una sorta di ricerca di “mercato” che consentisse di poter rapportare i costi da noi calcolati con quelli realmente offerti dai venditori/produttori. Ciò ha reso accattivante lo studio proposto, evitando così che si ricorresse in una mera e noiosa applicazione di formule (il cui studio e la cui derivazione, tuttavia, risultano ben altro che noiosi).

Stilare un bilancio energetico deve essere motivato, ancor prima che imposto dalla legge, da un profondo senso di responsabilità poiché un edificio che soddisfa appieno determinati standard energetici non solo consente un notevole risparmio economico nei costi di energia, di gestione e manutenzione degli impianti di riscaldamento/condizionamento e di gestione e manutenzione dell’edificio stesso, ma aiuta (in parte) anche ad affrontare quella che a buon diritto può essere considerata la sfida attuale del mondo intero: ***l’ecosostenibilità.***

Si presenta ora il testo e le richieste dell’esercitazione.

Si supponga ora che sia possibile eseguire i seguenti interventi di contenimento dei consumi energetici:

- introduzione, nella intercapedine, di un materiale isolante avente conducibilità pari a $0,04 \text{ W/m } ^\circ\text{C}$;
- sostituzione dei vetri semplici con vetri doppi aventi trasmittanza $K = 2 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$;
- introduzione di un recuperatore sull'aria di ricambio che consenta un recupero del 50% della potenza fornita all'aria stessa.

Calcolare, dopo ciascun intervento:

3. la potenza che deve avere la stufa elettrica per mantenere all'interno una temperatura di $20 \text{ } ^\circ\text{C}$;
4. il costo della energia elettrica per una stagione di riscaldamento;
5. il Δ costo massimo che può avere ciascun intervento di contenimento dei consumi affinché possa essere "recuperato" in un periodo di 5 anni (si trascuri il costo del denaro e si suppongano costanti nel tempo il costo dell'energia elettrica ed i profili di utenza).
6. facoltativo: confrontare i costi ricavati al punto 5 con quelli di mercato, indicando le fonti utilizzate;
7. facoltativo: valutare gli effetti prodotti dal ricorso a più di uno dei tre interventi di risanamento indicati.

Punto 1: calcolo potenza stufa.

Calcolare, supponendo il regime stazionario, la potenza che deve avere la stufa elettrica per mantenere all'interno una temperatura di 20 °C

Dalla teoria è noto che, *supponendo il regime stazionario*, la potenza della stufa deve compensare (o meglio equiparare) il flusso termico totale "in uscita". Si noti che quanto appena detto è coerente anche dal punto di vista di fisico, in quanto sia potenza che flusso termico sono grandezze la cui unità di misura è il watt (*si faccia attenzione a non confondere il flusso termico ϕ [W] con il flusso termico per unità di superficie $\varphi = \phi/A$ [W/m²]).*

Per quanto appena detto si deve avere:

$$P_{stufa} = \frac{\phi_{TOT}}{\eta}$$

dove η è il rendimento della stufa elettrica che supporremo pari ad 1 (ossia rendimento del 100%).

Il problema si risolve, quindi, calcolando il valore del flusso termico totale in uscita.

Quest'ultimo è misurabile in quanto dato dalla somma di due termini: il flusso in uscita relativo alle dispersioni e quello relativo ai ricambi d'aria. Si vuole sottolineare l'importanza del ricambio d'aria: essa è indispensabile per garantire un apporto di aria pulita e ossigenata all'ambiente dove, altrimenti, le concentrazioni di CO₂ e di germi tenderebbero ad aumentare, minando la salubrità dell'ambiente stesso.

$$\phi_{TOT} = \phi_{dispersioni} + \phi_{ricambi\ aria}$$

Il primo addendo vale:

$$\phi_{dispersioni} = \sum \varphi_i S_i = \sum K_i (t_i - t_e) S_i = \phi_{pavimento} + \phi_{pareti\ opache\ e\ soffitto} + \phi_{vetrate}$$

dove K_i è il coefficiente globale di scambio termico della superficie i -esima (di area S_i); t_i è la temperatura interna, supposta costante a 20 °C e t_e è la temperatura esterna minima di progetto che vale -8 °C.

Occorre a questo punto studiare il flusso termico attraverso il pavimento, le vetrate, le pareti laterali opache e il soffitto (quest'ultimi due flussi – pareti laterali opache e soffitto – vengono inglobati in un unico flusso, poiché sono caratterizzati dagli stessi parametri; in effetti questo flusso equivale a quello attraverso le superfici opache, fatta eccezione del pavimento che ha parametri - in particolare lo spessore - diversi. Per meglio tenere presente questa distinzione si continuerà ad usare la notazione sopra riportata).

Flusso attraverso le superfici laterali opache e il soffitto

Il flusso attraverso le superfici laterali opache e il soffitto vale:

$$\phi_{pareti\ opache\ e\ soffitto} = K \cdot (t_i - t_e) \cdot S_{pareti\ opache\ e\ soffitto}$$

Occorre innanzitutto trovare l'area complessiva delle superfici laterali (ossia verticali) dell'edificio.

$$\phi_{pavimento} = K \cdot (t_i - t_e) \cdot S_{pavimento}$$

La superficie del pavimento vale:

$$S_{pavimento} = l \cdot b = 5,9 \cdot 11,8 = 69,62 \text{ m}^2$$

Anche in questo caso il valore della trasmittanza vale:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{2\Delta x_{pavimento}}{\lambda_{acciaio}} + \frac{1}{C} + \frac{1}{h_e}}$$

con l'unica avvertenza che, stavolta, lo spessore di una singola lamina di acciaio non è più di 2 mm ma di 3 mm (in accordo, tra le altre cose, ad una funzione strutturale di sostegno del pavimento). Pertanto si ha:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{10} + \frac{2 \cdot 0,003}{45,24} + \frac{1}{4} + \frac{1}{20}} = 2,499171362 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \cong 2,5 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$$

In conclusione si ha:

$$\phi_{pavimento} = K \cdot (t_i - t_e) \cdot S_{pavimento} = 2,5 \cdot (20 - (-8)) \cdot 69,62 = 4873,4 \text{ W} = 4,8734 \text{ kW}$$

Flusso attraverso le superfici vetrate

Il flusso attraverso le superfici vetrate vale:

$$\phi_{vetrate} = K \cdot (t_i - t_e) \cdot S_{vetrate}$$

Si già detto che l'estensione delle superfici vetrate vale:

$$S_{vetrate} = 40\% S_{laterali} = 66,55 \text{ m}^2$$

Si supponga che lo spessore del vetro sia di 3 mm (*trattandosi di vetro semplice, infatti, poco cambierebbe se lo spessore raddoppiasse*) e che la sua conducibilità termica valga $\lambda_{vetro} = 0,76 \frac{W}{m \cdot ^\circ C}$ (valore letto da tabella allegata a slide del corso). Pertanto si ha che:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{\Delta x_{vetro}}{\lambda_{vetro}} + \frac{1}{h_e}} = \frac{1}{\frac{1}{10} + \frac{0,003}{0,76} + \frac{1}{20}} = 6,495726496 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \cong 6,5 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$$

Segue che:

$$\phi_{vetrate} = K \cdot (t_i - t_e) \cdot S_{vetrate} = 6,5 \cdot (20 - (-8)) \cdot 66,55 = 12112,464 \text{ W} \cong 12,1125 \text{ kW}$$

Dai ragionamenti appena conclusi si ricava per semplice somma il valore complessivo del flusso relativo alle dispersioni:

$$\phi_{dispersioni} = \phi_{pavimento} + \phi_{pareti opache e soffitto} + \phi_{vetrate} = 4,8734 + 11,8615 + 12,1125 =$$

Punto 2: calcolo costo energia.

Calcolo del costo dell'energia elettrica per una stagione di riscaldamento

Per calcolare il costo dell'energia elettrica per una stagione di riscaldamento occorre, prima di tutto, quantificare l'energia totale consumata in una stagione di riscaldamento.

Si ricorda che, tipicamente, la stagione di riscaldamento va dal 15 Ottobre al 15 Aprile.

Per convertire la potenza in energia occorre, da un punto di vista analitico, andare a moltiplicare la potenza per l'intervallo di tempo che interessa. Ciò presuppone, però, che determinati parametri restino costanti su tutto l'intervallo di tempo (che noi identifichiamo con l'intera stagione di riscaldamento). Tuttavia, così facendo, si eseguirebbe una notevole semplificazione che rischierebbe di compromettere la veridicità dei valori trovati. In primis, è la temperatura esterna a non essere costante durante tutta la stagione di riscaldamento e questo fa sì che per risalire all'energia assorbita dalla stufa durante tutta la stagione bisogna sfruttare un importante strumento dell'Analisi Matematica: l'integrale.

$$E = \int_{15\text{ Ottobre}}^{15\text{ Aprile}} \phi_{TOT} d\tau$$

Abbiamo già visto che

$$\phi_{TOT} = \phi_{dispersioni} + \phi_{ricambi\text{ aria}}$$

E che

$$\phi_{dispersioni} = \sum \varphi_i S_i = \sum K_i (t_i - t_e) S_i$$

Ossia

$$\begin{aligned} \phi_{TOT} &= \sum K_i (t_i - t_e) S_i + V \cdot \frac{n}{3600} \cdot \rho_{aria} \cdot c_{aria} \cdot (t_i - t_e) = \\ &= \left(\sum K_i S_i + V \cdot \frac{n}{3600} \cdot \rho_{aria} \cdot c_{aria} \right) \cdot (t_i - t_e) \end{aligned}$$

Quanto presente nella prima parentesi è costante e può essere portato fuori dal segno di integrale:

$$E = \left(\sum K_i S_i + V \cdot \frac{n}{3600} \cdot \rho_{aria} \cdot c_{aria} \right) \int_{15\text{ Ottobre}}^{15\text{ Aprile}} (t_i - t_e) d\tau$$

L'integrale si risolve facilmente grazie all'introduzione dei gradi giorno (GG).

$$\int_{15\text{ Ottobre}}^{15\text{ Aprile}} (t_i - t_e) d\tau = GG$$

Si tratta di valori tabulati e nel nostro caso i GG hanno valore numerico di 2500. Si presti attenzione che la quantità nella prima parentesi può essere ricavata facilmente senza effettuare nuovamente tutti i calcoli: essa è infatti pari a

Punto 3: calcolo potenza stufa a seguito di singoli interventi.

Calcolare, a seguito di ogni singolo intervento, la potenza che deve avere la stufa elettrica per mantenere all'interno una temperatura di 20 °C

Primo intervento

Introduzione, nella intercapedine, di un materiale isolante avente conducibilità pari a 0,04 W/m °C.

A seguito dell'intervento sopra descritto $\phi_{vetrate}$ e $\phi_{ricambi\ aria}$ rimangono invariati. Mutano, invece, il flusso attraverso il pavimento e quello attraverso le pareti opache laterali ed il soffitto.

Flusso attraverso le pareti laterali opache ed il soffitto

Ciò che varia è il valore della trasmittanza K:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{2\Delta x_{pareti\ laterali\ e\ soffitto}}{\lambda_{acciaio}} + \frac{\Delta x_{intercapedine}}{\lambda_{isolante}} + \frac{1}{h_e}} = \frac{1}{\frac{1}{10} + \frac{2 \cdot 0,002}{45,24} + \frac{0,05}{0,04} + \frac{1}{20}} =$$

$$= 0,714240606 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$$

Segue che:

$$\phi_{pareti\ opache\ e\ soffitto} = K \cdot (t_i - t_e) \cdot S_{pareti\ opache\ e\ soffitto} = 0,714240606 \cdot (20 - 8) \cdot 169,45 =$$

$$\cong 3,3888 \text{ kW}$$

Flusso attraverso il pavimento

Anche in questo caso ciò che varia è la trasmittanza K:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{2\Delta x_{pavimento}}{\lambda_{acciaio}} + \frac{\Delta x_{intercapedine}}{\lambda_{isolante}} + \frac{1}{h_e}} = \frac{1}{\frac{1}{10} + \frac{2 \cdot 0,003}{45,24} + \frac{0,05}{0,04} + \frac{1}{20}} =$$

$$= 0,714218054 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$$

Segue che:

$$\phi_{pavimento} = K \cdot (t_i - t_e) \cdot S_{pavimento} = 0,714218054 \cdot (20 - 8) \cdot 69,62 \cong 1,3923 \text{ kW}$$

Flusso totale

Con i nuovi valori sopra calcolati si ha che:

Punto 4: calcolo costo energia a seguito di singoli interventi.

Calcolare, a seguito di ogni singolo intervento, il costo dell'energia elettrica per una stagione di riscaldamento.

Si utilizza la stessa formula ricavata al punto 1, cioè:

$$E = \frac{\phi_{TOT}}{(t_i - t_e)} \cdot GG \cdot 24 \text{ [kWh]}$$

e

$$\text{Costo energia} = E \cdot \frac{0,2 \text{ €}}{\text{kWh}} \text{ [€]}$$

Primo intervento

Introduzione, nella intercapedine, di un materiale isolante avente conducibilità pari a 0,04 W/m °C.

$$\begin{aligned} \text{Costo energia} &= \frac{\phi_{TOT}}{(t_i - t_e)} \cdot GG \cdot 24 \cdot 0,2 = \frac{25,6431}{28} \cdot 2500 \cdot 24 \cdot 0,2 = \\ &= 10989,92 \frac{\text{€}}{\text{stagione riscaldamento}} \end{aligned}$$

Secondo intervento

Sostituzione dei vetri semplici con vetri doppi aventi trasmittanza $K = 2 \text{ W/m}^2 \text{ °C}$.

$$\begin{aligned} \text{Costo energia} &= \frac{\phi_{TOT}}{(t_i - t_e)} \cdot GG \cdot 24 \cdot 0,2 = \frac{29,2113}{28} \cdot 2500 \cdot 24 \cdot 0,2 = \\ &= 12519,11 \frac{\text{€}}{\text{stagione riscaldamento}} \end{aligned}$$

Terzo intervento

Introduzione di un recuperatore sull'aria di ricambio che consenta un recupero del 50% della potenza fornita all'aria stessa.

$$\begin{aligned} \text{Costo energia} &= \frac{\phi_{TOT}}{(t_i - t_e)} \cdot GG \cdot 24 \cdot 0,2 = \frac{33,2221}{28} \cdot 2500 \cdot 24 \cdot 0,2 = \\ &= 14238,04 \frac{\text{€}}{\text{stagione riscaldamento}} \end{aligned}$$

Punto 6: indagine di mercato.

Confrontare i costi ricavati al punto 5 con quelli di mercato, indicando le fonti utilizzate.

Primo intervento

Introduzione, nella intercapedine, di un materiale isolante avente conducibilità pari a 0,04 W/m °C.

Un isolante che soddisfa il requisito sopra indicato, ossia ha conducibilità pari a 0,04 W/m °C, in accordo con quanto riportato dal seguente sito internet

<http://www.arch-sis.com/bioarchitettura/materiali-termoisolanti/conduktivita-termica-di-materiali-da-costruzione>

è il polietilene espanso in lastre o polistirene espanso in lastre (tra gli altri).

Il prezzo per un pannello spesso 5 cm di polistirene espanso è di 11,78 €/m²

(<http://www.regione.vda.it/OperePubbliche/prezzario/Download/civili/isolant.pdf>).

Noto che la superficie utile interessata da tale intervento è di

$$S_{\text{utile}} = S_{\text{TOT}} - S_{\text{vetrate}} = S_{\text{laterali}} + 2S_{\text{pavimento}} - S_{\text{vetrate}} = 166,38 + 2 \cdot 11,8 \cdot 5,9 - 66,55 = 239,07 \text{ m}^2$$

si ricava che:

$$\text{Costo intervento} = S_{\text{utile}} \cdot 11,78 = 2816,24 \text{ €}$$

Il risparmio vale quindi:

$$\text{Risparmio} = \Delta \text{Costo max} - \text{Costo intervento} = 25615 - 2816,24 = 22798,76 \frac{\text{€ risparmiati}}{5 \text{ anni}}$$

Secondo intervento

Sostituzione dei vetri semplici con vetri doppi aventi trasmittanza $K = 2 \text{ W/m}^2 \text{ °C}$.

I dati che seguono sono stati dichiarati da "Sicari art legno s.r.l." (www.sicari.it)

Per infissi in alluminio con vetro camera basso emissivi tipo 494 (4mm vetro, 9 mm intercapedine, 4mm vetro), il cui valore di trasmittanza è addirittura $\leq 2 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ °C}}$, il prezzo può essere stimato intorno a

48 ÷ 50 €/m² compreso di posa in opera e sigillatura (con minimo di fatturazione di 0,35 m²). Sono anche disponibili in versione "antinfortunistica", per vetri dalla base fino a 1 m (in accordo con la normativa vigente), del tipo 6794 il cui prezzo sale a 63 €/m². Tuttavia considereremo la prima offerta.

Punto 7: calcolo effetti prodotti dal ricorso a più interventi.

Valutare gli effetti prodotti dal ricorso a più di uno dei tre interventi di risanamento indicati.

Si devono ora considerare gli effetti relativi al ricorso di più interventi contemporaneamente. In tutto le ulteriori combinazioni possibili sono quattro.

Primo e secondo intervento

Introduzione, nella intercapedine, di un materiale isolante avente conducibilità pari a 0,04 W/m °C.

Sostituzione dei vetri semplici con vetri doppi aventi trasmittanza $K = 2 \text{ W/m}^2 \text{ °C}$.

In questo caso tenendo conto dei valori già calcolati in precedenza si ha:

$$\phi_{TOT} = \phi_{pavimento} + \phi_{pareti\ opache\ e\ soffitto} + \phi_{vetrate} + \phi_{ricambi\ aria} = 17,2573 \text{ kW}$$

$$\text{Costo energia} = \frac{\phi_{TOT}}{(t_i - t_e)} \cdot GG \cdot 24 \cdot 0,2 = 7395,99 \frac{\text{€}}{\text{stagione}}$$

$$\Delta\text{Costo energia} = \text{Costo energia prima} - \text{Costo energia dopo} = 16112,92 - 7395,99 =$$

$$= 8716,93 \frac{\text{€}}{\text{stagione riscaldamento}}$$

Da cui segue:

$$\Delta\text{Costo max} = \Delta\text{Costo energia} \cdot 5 = 43584,65 \text{ €}$$

In definitiva si ha:

$$\text{Risparmio} = \Delta\text{Costo max} - \text{Costo intervento} = 43584,65 - 2816,24 - 3327,50 =$$

$$= 37440,91 \frac{\text{€ risparmiati}}{5 \text{ anni}}$$

Primo e terzo intervento

Introduzione, nella intercapedine, di un materiale isolante avente conducibilità pari a 0,04 W/m °C.

Introduzione di un recuperatore sull'aria di ricambio che consenta un recupero del 50% della potenza fornita all'aria stessa.

In questo caso tenendo conto dei valori già calcolati in precedenza si ha:

$$\phi_{TOT} = \phi_{pavimento} + \phi_{pareti\ opache\ e\ soffitto} + \phi_{vetrate} + \phi_{ricambi\ aria} = 21,2682 \text{ kW}$$

$$\text{Costo energia} = \frac{\phi_{TOT}}{(t_i - t_e)} \cdot GG \cdot 24 \cdot 0,2 = 9114,96 \frac{\text{€}}{\text{stagione}}$$

Introduzione di un recuperatore sull'aria di ricambio che consenta un recupero del 50% della potenza fornita all'aria stessa.

In questo caso tenendo conto dei valori già calcolati in precedenza si ha:

$$\phi_{TOT} = \phi_{pavimento} + \phi_{pareti\ opache\ e\ soffitto} + \phi_{vetrate} + \phi_{ricambi\ aria} = 12,8827\ kW$$

$$Costo\ energia = \frac{\phi_{TOT}}{(t_i - t_e)} \cdot GG \cdot 24 \cdot 0,2 = 5521,15 \frac{\text{€}}{\text{stagione}}$$

$$\begin{aligned} \Delta Costo\ energia &= Costo\ energia\ prima - Costo\ energia\ dopo = 16112,92 - 5521,15 = \\ &= 10591,77 \frac{\text{€}}{\text{stagione\ riscaldamento}} \end{aligned}$$

Da cui segue:

$$\Delta Costo\ max = \Delta Costo\ energia \cdot 5 = 52958,84\ \text{€}$$

In definitiva si ha:

$$\begin{aligned} Risparmio &= \Delta Costo\ max - Costo\ intervento = 52958,84 - 2816,24 - 3327,50 - 5940,00 = \\ &= 40875,10 \frac{\text{€ risparmiati}}{5\ anni} \end{aligned}$$

Ovviamente dai soldi risparmiati andrebbero detratte anche eventuali spese legate alla gestione, manutenzione ed eventuale revisione degli interventi effettuati. Ma nel complesso si può notare ugualmente come l'essere intervenuti a migliorare l'efficienza energetica dell'edificio abbia portato notevoli vantaggi di tipo economico. Questi, tuttavia, rappresentano solo i vantaggi "immediati", a breve termine; esistono, infatti, anche dei vantaggi a lungo termine. Si tratta del minor consumo di risorse del pianeta con conseguente riduzione delle emissioni di CO₂. È questo un aspetto che deve necessariamente essere tenuto in considerazione in ogni attività umana, alla luce del fatto che l'incremento demografico esponenziale già iniziato porterà inevitabilmente ad un consumo sempre più sfrenato delle risorse di cui il pianeta dispone e agli attuali livelli di crescita esse scarseggeranno in breve tempo. Per risolvere questo problema occorre innanzitutto frenare i livelli di consumo attuali, spesso troppo alti perché legati ad una cattiva progettazione/realizzazione ed in secondo luogo sarà necessario un radicale cambiamento del concetto di "vivere sul pianeta Terra". Si tratta di scelte sociali, economiche e persino etiche che avranno, nel bene o nel male, determinate conseguenze. Ma sono scelte necessarie.