

33. Salvatore SALOMONE. — Considerazioni sull'isolamento termico degli edifici.

Riassunto. — L'autore esamina il comportamento dei muri esterni dei fabbricati nei riguardi della trasmissione del calore. Cita un metodo semplificativo di confronto tra i comportamenti dei vari tipi di muratura, soffermandosi in modo particolare su quello della muratura « ad intercapedine ».

Mette in evidenza i gravi inconvenienti di natura igienica cui può dar luogo quest'ultimo tipo. Propone qualche accorgimento atto a migliorarne le condizioni e presenta alcuni esempi di pratica applicazione.

Résumé. — L'auteur étudie le comportement des murs extérieurs des édifices par rapport à la transmission de la chaleur. Il rappelle une méthode qui simplifie la comparaison entre le comportement des différents types de murs, s'arrêtant surtout sur les murs creux.

L'auteur met en évidence les inconvénients sérieux de nature hygiénique que ce dernier type peut provoquer. Il propose quelques mesures aptes à en améliorer les conditions et présente des exemples d'application pratique.

Summary. — The behaviour of the external walls of buildings is considered in respect of heat transmission. A method is described for comparing the behaviour of various types of walls with particular reference to cavity walls. The serious problems of hygiene involved in this later type are described. Devices are described to improve this condition and several examples are given of practical applications.

Zusammenfassung. — Der Autor prüft das Verhalten der Aussenwände der Gebäude in Bezug auf die Wärmetransmission. Er zitiert eine vereinfachte Methode, zu vergleichen mit dem Verhalten der verschiedenen Mauerwerktypen, wobei er sich im Besonderen über diejenigen Mauerwerke mit « Zwischenraum » aufhält.

Er hebt die schweren Übelstände mygienischer Natur hervor, zu welchem dieser letzte Typ Veranlassung geben kann. Er schlägt manche Abänderung, fähig zur Verbesserung ihrer Beschaffenheit vor, und er zeigt einige Beispiele zur praktischen Anwendung.

I. - Il problema dell'isolamento termico degli edifici è sorto, si può ben dire, da quando l'uomo, abbandonando progressivamente le abitudini del nomade, fissò stabile dimora. Fu quindi necessario costruire l'abitazione in maniera da proteggere i propri occupanti sia dai nemici esterni che dai rigori del clima.

Le abitazioni primitive stabili, a prescindere da quelle ubicate in ambienti naturali (grotte e caverne) adattati all'uopo, possono schematicamente considerarsi suddivise in due grandi categorie, e precisamente:

1) abitazioni costruite con materiali organici, quali legno, frasche, sterco essiccato ecc.;

2) abitazioni costruite con materiali inorganici quali ghiaccio, roccia, argilla essiccata al sole o entro fornaci, conglomerati naturali o artificiali ecc.

Il primo tipo di abitazioni si estese prevalentemente dalle zone a clima caldo a quelle a clima temperato; il secondo tipo dalle regioni a clima freddo a quelle a clima temperato.

Le costruzioni in materiali organici erano caratterizzate da un soddisfacente isolamento termico dovuto alla piccola conduttività dei materiali impiegati; esse però non erano atte ai climi freddi poichè, per ragioni di sicurezza, non potevano essere accesi fuochi nel loro interno; d'altra parte l'organismo umano, specialmente se ricoperto da abiti rudimentali, resiste meglio ai climi caldi che a quelli freddi. Anche per tale ragione, le abitazioni di questo tipo furono sostituite da quelle in muratura che consentivano in inverno il riscaldamento artificiale senza il pericolo del propagarsi di incendi, e quindi migliori condizioni di abitabilità specie nei climi freddi e, durante la stagione invernale, nelle regioni a clima temperato.

Si assiste quindi, in queste regioni alla progressiva scomparsa della capanna terrestre o lacustre, ed alla comparsa della vera e propria casa in muratura.

La casa primitiva ricorda in certo qual modo e sotto l'aspetto termico, l'abitazione cavernicola; abbiamo infatti muraure di grande spessore e un numero ridotto di aperture, quali porte e finestre; all'interno si ha una temperatura che non risente delle fluttuazioni termiche quotidiane esterne, ma viene influenzata in diversa maniera solo da quelle stagionali. All'incirca, come avviene tuttora nelle vecchie chiese costruite in muratura di notevole spessore e con una superficie complessiva delle aperture, piccola in confronto al volume dell'ambiente.

La muratura di forte spessore e pesante si comporta come un regolatore termico, così come un lago artificiale lascia defluire una portata co-

stante durante l'anno, regolarizzando le piene e le magre dei suoi immis-sari.

Affinando le nostre idee, possiamo fare qualche altra considerazione: una capanna è costruita con materiale leggero a basso coefficiente di conduttività termica. Tuttavia anche se lo spessore del materiale è notevole sentiremo al suo interno le fluttuazioni termiche esterne, siano esse stagionali che giornaliere. In un locale costruito con muratura spessa e pesante la quale — si noti bene — ha coefficienti di conduttività termica più elevati dei materiali organici sopraccennati, si ha invece una temperatura pressochè costante. Insomma, si giunge alla constatazione, a prima vista paradossale, che *spesso un ambiente cavo delimitato da pareti a bassa conduttività termica risente delle oscillazioni esterne di temperatura più di un ambiente delimitato da pareti costruite con materiale più conduttore del calore*, naturalmente quando l'ambiente stesso non è provvisto di proprie sorgenti di calore.

Si può quindi concludere che le variazioni di temperatura si diffondono più rapidamente attraverso un mezzo « leggero » che attraverso un mezzo « pesante ».

Il solo coefficiente di conduttività:

$$\chi \text{ (Kcal/m}^0\text{Ch)} \quad (1)$$

del materiale con cui è costruita una parete non è quindi sufficiente nel caso generale a definire le condizioni termiche all'interno di un ambiente, note quelle esterne; ciò si verifica solo nel caso del « regime permanente » cioè quando le temperature sulle facce opposte di una parete piana indefinita si mantengono rigorosamente costanti.

Nel caso del regime variabile occorre introdurre un'altra grandezza, anch'essa caratteristica del materiale, che dia un'idea del modo con il quale la temperatura si diffonde lungo l'isolamento stesso. Questa grandezza è la « diffusività termica » che viene indicata col simbolo a ed espressa dalla relazione:

$$a = \frac{\quad}{\gamma \cdot c} \quad (\text{m}^2/\text{h}) \quad (2)$$

dove γ è il peso specifico del materiale (Kg/m^3) e c il suo calore specifico ($\text{Kcal}/\text{kg}^0\text{C.}$).

Un breve esempio numerico può permetterci sin da ora di asserire che le fluttuazioni termiche all'interno di un ambiente cavo del 1° tipo (pareti in materiale organico) sono più vivaci di un ambiente del 2° tipo

(pareti in materiale inorganico). Assumiamo, per maggior chiarezza per la I costruzione pareti in canne secche e per la II pareti in pietrame:

ambiente del 1° tipo

Ambiente del 2° tipo

$$\chi = 0,04 \text{ Kcal/m } ^\circ\text{Ch}$$

$$0,90 \text{ Kcal/m } ^\circ\text{Ch}$$

$$c = 0,45 \text{ Kcal/Kg}^\circ\text{C}$$

$$0,20 \text{ Kcal/Kg}^\circ\text{C}$$

$$\gamma = 75 \text{ Kg/m}^3$$

$$2500 \text{ Kg/m}^3$$

avremo:

$$a_1 = 0,0012$$

$$a_2 = 0,0018$$

Benchè la conduttività delle pareti di canne sia 22,5 volte più bassa di quella delle pareti di muratura, la diffusività delle prime è solo del 30% inferiore a quella delle seconde. A parità di spessore ci saremmo trovati meglio, in regime variabile, con la prima parete, senonchè, nel caso di una capanna di canne, lo spessore delle pareti è di pochi centimetri, mentre nel caso della parete in muratura lo spessore è molto notevole.

Si spiega così il fatto che un ambiente cavo, pur essendo delimitato da pareti costituite da un buon isolante, si può riscaldare o raffreddare più rapidamente di un analogo ambiente delimitato da pareti in materiale pesante, anche se questo è, rispetto al primo, un miglior conduttore di calore.

La quantità oraria Q (Kcal/h) di calore che passa, in regime permanente, attraverso una parete piana indefinita risulta dalla nota formula:

$$Q = K S (t_e - t_i) \quad (3)$$

nella quale t_e e t_i sono le temperature presso le opposte facce della parete, S è la superficie (m^2) e K il coefficiente globale di trasmissione del calore della parete ($\text{Kcal/m}^2 \text{ } ^\circ\text{Ch}$), dato, a sua volta, dalla espressione:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \frac{s_1}{\gamma_1} + \dots + \frac{s_n}{\gamma_n} + \frac{1}{\alpha_e}} \quad (4)$$

nella quale α_i ed α_e i coefficienti di adduzione, s_n gli spessori dei singoli strati che compongono il muro, aventi ognuno la conduttività γ . Per una parete semplice, composta cioè da un solo strato, la (4) diviene ovviamente:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \frac{1}{\gamma} + \frac{1}{\alpha_e}} \quad (4')$$

* * *

Fino a pochi decenni or sono, la tecnica costruttiva delle abitazioni civili non aveva subito modifiche sostanziali rispetto alle prime costruzioni in muratura; le caratteristiche erano costituite da grosse mura in pietrame o in mattoni, con aperture limitate sia come numero che come ampiezza.

L'avvento delle costruzioni costituite da strutture portanti in traliccio di ferro o di cemento armato e da murature di tamponamento ha modificato sostanzialmente le cose.

Mentre nelle costruzioni del tipo antico le pareti costituiscono strutture portanti e debbono quindi essere particolarmente robuste, perciò pesanti, nelle costruzioni moderne la funzione statica viene affidata ai tralicci e quindi le pareti ed i solai hanno il solo scopo di definire gli ambienti. Interessa, ai fini economici, diminuire i carichi permanenti sulle strutture portanti. Di conseguenza, non resta altro che ridurre il peso dei solai e delle pareti, sicchè la tendenza attuale è quella di costruire i divisori interni con muri di mattoni forati in foglio o ad una testa, e le pareti esterne con le murature del tipo ad intercapedine comunemente dette « a cassetta » costituite da un muro esterno di mattoni ad una testa, per lo più pieni, da una intercapedine vuota, ed infine verso l'interno da un muro in genere ad una testa ma spesso in foglio, di mattoni comunemente forati.

In sostanza, le pareti che proteggono gli ambienti dall'esterno sono costruite con murature « leggere ».

Dal punto di vista della propagazione del calore, l'abitazione moderna è quindi più vicina alla capanna primordiale che alla casa in muratura massiccia.

* * *

II. - Una buona costruzione moderna dispone in genere di impianti di riscaldamento o di condizionamento dell'aria che hanno lo scopo di mantenere, entro le abitazioni o negli edifici civili di particolare interesse, condizioni gradevoli, che diano cioè una sensazione di « benessere fisiologico ».

Il mantenimento di queste condizioni è ancora più necessario in un ospedale in quanto l'organismo affaticato dal male non deve distogliere energie per adattarsi alle condizioni termiche ed igrometriche dell'ambiente.

Un edificio che disponga di tali impianti può quindi essere costruito con pareti, solai, soffitti, dotati di bassa capacità termica; sarà cura del costruttore quella di abbassare la conduttività delle pareti al fine di ri-

durre la potenza termica installata nell'impianto, nonchè le spese di esercizio.

In genere si può considerare soddisfacente un coefficiente globale (4) $K = 1,1 \text{ Kcal/m}^2 \text{ }^\circ\text{Ch}$ circa ⁽¹⁾ con valori dei coefficienti di adduzione esterno ed interno pari rispettivamente a 12 ed a 7 $\text{Kcal/m}^2 \text{ }^\circ\text{Ch}$. (*).

Generalmente il calcolo del calore (positivo o negativo) disperso attraverso le pareti di un edificio, si fa con la nota espressione (3) del « regime permanente ». Ciò quando le murature sono abbastanza spesse ed in materiali pesanti, non dà luogo a delusioni, in quanto la costruzione è in grado di immagazzinare grandi quantità di calore, per cui essa risente solo delle oscillazioni termiche esterne molto « lente » cioè di quelle stagionali.

Se invece la costruzione è eseguita in materiale leggero, es. strutture in cemento armato e pareti esterne « a cassetta », allora gli ambienti risentiranno delle oscillazioni di temperatura « veloci » cioè di quelle quotidiane, in modo più o meno sensibile. In questo caso, basarsi solo sulla conduttività dei materiali come se ci si trovasse di fronte al regime permanente, costituisce una semplificazione di concetto perchè ci si trova decisamente nel caso del regime variabile e quindi la diffusività deve essere tenuta in debita considerazione.

Qui di seguito esamineremo le più comuni e semplici espressioni che possono aiutarci a vedere meglio le cose e gli elementi che entrano in esse.

Cominceremo con la conduttività termica dei materiali:

a) la conduttività di un materiale è una caratteristica fisica dello stesso; dipende anche dalle temperature alle quali il materiale è sottoposto, nonchè all'umidità contenuta.

Esperienze condotte da A. FOURNOL ⁽²⁾ hanno portato alla conclusione qui riassunta:

TABELLA I.

Materiale	Limiti di umidità considerati normali. ‰ di acqua in volume	Valori più frequenti. ‰ di acqua in volume	‰ di maggioranza nella conduttività χ . (valori medi normali)
Mattoni e pietra calcarea	0,2 ÷ 1	0,5	15)
Gesso e calcestruzzo	4 ÷ 10	7	75)
Calcestruzzo di pomice	5 ÷ 17	13	7)
Terre	4 ÷ 10	7	75)

(*) Diversi autori assumono $\alpha_0 = 18$. Tale valore ci sembra eccessivo e riteniamo sufficientemente prudentiale $\alpha_0 = 12$.

La casistica sperimentale conferisce particolare attendibilità alle conclusioni della tabella; segue, come conseguenza, che nella pratica occorrerà maggiorare i valori teorici della conduttività, secondo i risultati sperimentali.

La cosa è molto più importante di quanto non appaia a prima vista. Infatti, durante la stagione invernale o anche durante le ore notturne, l'intercapedine di una costruzione con « murature a cassetta », si raffredda molto rapidamente a causa della elevata diffusività.

La temperatura della superficie interna della parete esterna si abbassa rapidamente e scende con facilità al di sotto della temperatura di rugiada dell'aria contenuta nell'intercapedine. Si ha quindi una condensazione superficiale di vapore che viene progressivamente assorbito dalle pareti. Il coefficiente di conduttività si abbassa ulteriormente ed il fenomeno si accentua.

Il muro « peggiora » si formano macchie di umidità ed efflorescenze salnitrose.

TABELLA II.

Materiali da costruzione e murature

Materiale	γ Kg/m ³	C Kcal/Kg°O	λ Kcal/m°Ch
Calcestruzzo di cemento e pietrisco . .	2000 ÷ 2200	0,26	1,10
Calcestruzzo di cemento armato . . .	2100 ÷ 2400	0,25	1,10
Calcestruzzo di cemento cellulare (leggero)	300 ÷ 600	0,26	0,08 ÷ 0,12
Calcestruzzo di cemento cellulare (pesante)	650 ÷ 900	0,26	0,10 ÷ 0,35
Calcestruzzo di cemento e pomice	800 ÷ 1000	0,24	0,40
Muratura di mattoni pieni	1700 ÷ 1900	0,20	0,60
Muratura di mattoni forati	1000 ÷ 1200	0,20	0,60
Muratura di pietrame	1300 ÷ 2500	0,20	0,90 ÷ 2,10
Intonaco civile	1400 ÷ 1650	0,28 ÷ 0,30	0,40 ÷ 0,75
Gesso	1000 ÷ 1200	—	0,35 ÷ 0,50
Legnami secchi (il valore superiore di λ è preso normalmente alle fibre):			
abete bianco	370 ÷ 750	0,65	0,13 ÷ 0,18
abete rosso	350 ÷ 600	0,65	0,13 ÷ 0,18
pitch-pine	830 ÷ 850	—	0,12 ÷ 0,18
rovere	690 ÷ 1030	0,57	0,18 ÷ 0,31

TABELLA III.

Isolanti termici

Materiale	γ Kg/m ³	c Kcal/Kg°C	χ Kcal/m°C
Amianto in fibre	400	0,25	0,12
Amianto compresso	700	0,25	0,20
Canna secca	75	0,45	0,04
Foamglas (vetro espanso)	150	0,20	0,04
Urea trattata alla formaldeide	15 ÷ 100	0,33	0,029 ÷ 0,039
Lana di roccia	56 ÷ 300	0,20	0,031 ÷ 0,045
Lana di vetro	60 ÷ 100	0,20	0,035 ÷ 0,060
Polistirolo espanso	15 ÷ 100	~ 0,30	0,027 ÷ 0,042
Sughero autoespanso autocollato	90 ÷ 140	0,49	0,030 ÷ 0,040
Sughero autoespanso catramato	160 ÷ 200	0,50	0,050 ÷ 0,055
Sughero grezzo granulato	80 ÷ 120	0,49	0,040 ÷ 0,060
Torba secca	200	0,45	0,050 ÷ 0,060
Torba in lastre pressate	220 ÷ 300	0,45	0,050 ÷ 0,060
Mica espansa	50 ÷ 120	0,21	0,032 ÷ 0,050
Mica espansa conglomerato cemen.	250 ÷ 560	~ 0,23	0,072 ÷ 0,120

Inoltre, la tensione di vapore dell'aria dell'intercapedine si abbassa e determina così un richiamo di umidità.

Nel calcolo della trasmissione del calore attraverso una parete sarà quindi opportuno tener conto dell'aumento della conduttività dei materiali e delle murature a causa della umidità in essi contenuta.

Abbiamo riportato nelle tab. II e III alcuni valori pratici che concernono materiali da costruzione e murature (asciutti) nonchè isolanti termici ⁽³⁾.

Altro elemento al quale si deve porre molta attenzione è la conduttività dell'aria contenuta entro le intercapedini. In genere, si suole attribuire il valore $\chi = 0,02$ Kcal/m°C, ovvero quello corretto che si deduce dalla formula:

$$\chi = 0,02 \left(1 + 0,3 \frac{t}{100} \right) \quad (5)$$

Nei nostri climi si ha quindi un valore medio di 0,24 Kcal/m°C.

Tuttavia, i fenomeni di irraggiamento, i moti turbolenti dell'aria ecc. fanno sì che il valore pratico della conduttività è di molto superiore a quelli accennati. Il Prof. IZAR ⁽⁴⁾ osserva che la conduttività equivalente χ_1 , che definiremo in seguito, di uno strato d'aria verticale si aggira attorno a 0,06 Kcal/m°C per uno spessore dell'intercapedine pari a cm. 1; sale a 0,10 ÷ 0,11 per uno spessore di cm. 2; a 0,23 ÷ 0,26 per

uno spessore di cm. 5; a $0,46 \div 0,56$ per cm. 10 ed infine a $0,65 \div 0,76$ per cm. 14.

Come si vede, il fenomeno della trasmissione del calore in uno strato d'aria verticale è molto più intenso di quanto si penserebbe a prima vista, anzi, si nota che l'aria, in queste condizioni si comporta in certo modo come conduttore del calore e quindi è peggiore dei veri e proprio coibenti; ciò naturalmente, a parte la diffusività termometrica che per l'aria è molto elevata.

b) Peso specifico e calore specifico.

Giocano un ruolo importantissimo nei problemi di trasmissione del calore a regime variabile, in quanto la diffusività del materiale è direttamente proporzionale alla conduttività ed inversamente proporzionale al prodotto $\gamma \cdot c$, cioè alla capacità termica, come si vede chiaramente dalla (2).

Schematizzando, la situazione può essere così riassunta:

Per ambienti privi di sorgenti di calore, positive o negative

$\gamma \cdot c$	λ	Conseguenze
1) piccolo	piccolo	Nel loro interno si sentiranno notevolmente le variazioni esterne di temperatura.
2) grande	piccolo	Si sentiranno meno che nel primo caso le oscillazioni termiche esterne che giungeranno smorzate (es. costruzioni in mattoni refrattari del tipo pesante).
3) grande	grande	Situazione peggiorata rispetto al caso 2) ma migliore del caso 1) (es. chiesa di antica costruzione).
4) piccolo	grande	Condizioni peggiorate rispetto al n. 1) (es. tende).

c) Velocità di propagazione del flusso termico.

Come è noto, la temperatura esterna segue delle leggi periodiche. Detta ω la pulsazione della temperatura sulla faccia esterna e cioè:

$$\omega = \frac{2\pi}{p} \quad (h^{-1}) \quad (6)$$

nella quale p è il periodo, la velocità di propagazione del flusso termico è data dalla nota relazione:

$$V = \sqrt{2\omega} \cdot \sqrt{a} \quad (\text{m/h}) \quad (7)$$

Nel caso di un'oscillazione diurna, $p = 24$ h, sarà $\omega = 0,26$ e quindi $\sqrt{2\omega} = 0,72$.

* * *

Dalla formula (7) che fornisce il valore della velocità di propagazione attraverso un muro piano di spessore indefinito, sembrerebbe che le oscillazioni rapide, ossia quelle caratterizzate da un periodo di piccolo valore e cioè da una pulsazione vivace, dovessero propagarsi meglio di quelle lente, in quanto la formula (7) ci dice che la velocità di propagazione è, tra l'altro, proporzionale direttamente alla radice quadrata del doppio della pulsazione.

In realtà le cose vanno in maniera assai diversa in quanto l'ampiezza Δ_t dell'oscillazione termica, alla distanza generica X dalla superficie del muro di spessore indefinito, è data dalla relazione

$$\Delta_t = B e^{-bx} \quad (8)$$

dove B è una costante, e è la base dei logaritmi naturali, ed infine:

$$b = \sqrt{\frac{\omega}{2}} \cdot \sqrt{\frac{1}{a}} = \sqrt{\frac{\pi}{p}} \cdot \sqrt{\frac{\gamma \cdot c}{\lambda}} \quad (\text{m}^{-1}) \quad (9)$$

è il « coefficiente di smorzamento ».

A parità di diffusività, si vede subito che il coefficiente di smorzamento è direttamente proporzionale alla radice quadrata della pulsazione, e quindi le « oscillazioni rapide » si smorzano per la (8) molto più rapidamente di quelle lente.

Ci troviamo quindi in presenza di « oscillazioni smorzate » tanto più quanto esse sono più rapide. Ora com'è noto, un'oscillazione non sinusoidale può scomporsi in varie oscillazioni di diverso periodo che si sovrappongono. E' appunto il caso delle oscillazioni diurne della temperatura le quali si possono considerare formate dalla fondamentale a periodo di 24 ore e da varie perturbazioni. Man mano che si penetra nella parete, le oscillazioni più rapide vanno smorzandosi sicchè, ad un certo punto, rimane praticamente la sola oscillazione fondamentale a forma sinusoidale ed avente il periodo di 24 ore.

Poichè le oscillazioni « lente » si smorzano meno di quelle veloci, e quindi si propagano più intensamente all'interno di un muro, molti ambienti sono pressochè insensibili alle oscillazioni diurne, mentre lo diventano alle oscillazioni stagionali; se la diffusività è assai piccola, anche queste oscillazioni vengono notevolmente smorzate, come si verifica nelle costruzioni con muri assai spessi (chiese, fortificazioni, ecc.). Se invece la diffusività ha un valore elevato, allora il fattore di smorzamento sarà piccolo e quindi anche le oscillazioni diurne, e cioè la fondamentale di 24 ore e le secondarie saranno sentite all'interno dell'ambiente, cosa questa quanto mai dannosa e fastidiosa. Non solo, ma si presenta anche l'inconveniente seguente: il rapido raffreddamento del muro porta ad un abbassamento della temperatura all'interno dell'ambiente e ad un aumento del grado igrometrico, che può giungere a valori inferiori a quelli limiti della zona del benessere.

La superficie interna della parete può così venirsi a trovare a temperatura inferiore a quella del punto di rugiada dell'aria, con conseguenti indesiderate condensazioni di umidità. Inconveniente questo verificatosi in alcuni edifici adibiti ad abitazioni popolari e recentemente costruiti nell'Italia settentrionale, ed al quale si è vanamente tentato di porre rimedio mediante impermeabilizzazione sulle superfici esterne mentre la migrazione di umidità procedeva dall'interno dei muri.

Per riassumere, nel caso del « regime permanente » era sufficiente conoscere il coefficiente di conduttività χ dei muri esterni di un edificio; nel caso reale del regime variabile la conoscenza della conduttività non basta; interessa principalmente la diffusività termica del materiale, la velocità di propagazione delle oscillazioni termiche più preoccupanti ed il coefficiente di smorzamento della parete. In particolare, il coefficiente di smorzamento ci dà una idea immediata del comportamento del materiale sottoposto ad un'oscillazione termica determinata.

Nella tabella IV abbiamo riportato le caratteristiche di numerosi materiali da costruzione e di isolanti termici, inoltre, abbiamo voluto calcolare, oltre alla diffusività termica, anche la velocità di propagazione dell'oscillazione all'interno del materiale, nonchè il coefficiente di smorzamento e ciò per l'oscillazione fondamentale diurna di 24 ore che è quella che più ci interessa.

Il lettore potrà agevolmente calcolare le analoghe grandezze per la oscillazione termica avente il periodo che più può interessarlo.

Calcolare le temperature all'interno dell'ambiente a seguito delle oscillazioni termiche considerate, è un problema estremamente complesso sia per gli sviluppi matematici che richiede, sia anche per la incertezza delle variabili da introdurre. Pertanto, abbiamo preferito fermarci

TABELLA IV.

Materiale	medio Kg/m ³	c Kcal/Kg°C	% Kcal/m ² Oh	a m ² /h	V m/h	b m ⁻¹
Cemento compresso	700	0,25	0,20	0,0011	0,024	10,85
Calcestruzzo di cemento e pietrisco	2200	0,26	1,10	0,0019	0,031	8,26
Calcestruzzo armato	2300	0,25	1,10	0,0019	0,031	8,26
Calcestruzzo cellulare leggero	500	0,26	0,065	0,0005	0,016	16,10
Calcestruzzo di pomice	1000	0,24	0,40	0,0016	0,029	9,00
Intonaco civile	1200	0,25	0,60	0,0020	0,032	8,05
Lana di roccia	150	0,20	0,035	0,0012	0,025	10,39
Lana di vetro	60	0,20	0,035	0,0029	0,039	6,68
Loppa d'alto forno	400	0,18	0,12	0,0016	0,029	9,00
Muratura di mattoni pieni	1800	0,20	0,45	0,0012	0,025	10,39
Muratura di mattoni forati	1100	0,20	0,35	0,0016	0,029	9,00
Muratura di pietrame	1300 ÷ 2500	0,20	0,90 ÷ 2,10	0,0018 ÷ ÷ 0,0086	0,030 ÷ ÷ 0,067	8,48 ÷ ÷ 3,88
Pietra pomice	600	0,20	0,30	0,0025	0,036	7,20
Polistirolo espanso	25	0,30	0,032	0,0042	0,047	5,55
Sughero autoespanso autocollato	110	0,49	0,032	0,0006	0,017	14,69
Sughero autoespanso caltramatato	180	0,50	0,052	0,0006	0,017	14,69
Torba in lastre pressate	250	0,45	0,06	0,0005	0,016	16,10
Mica espansa (conglomerato cementizio)	300	0,23	0,08	0,0011	0,024	10,85

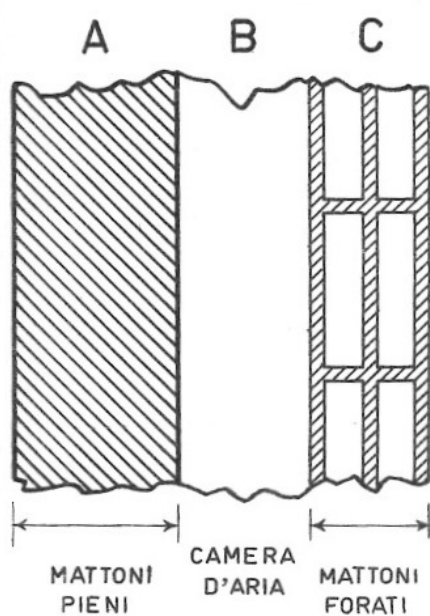


Fig. 1. - Sezione tipo di muratura ad intercapedine.

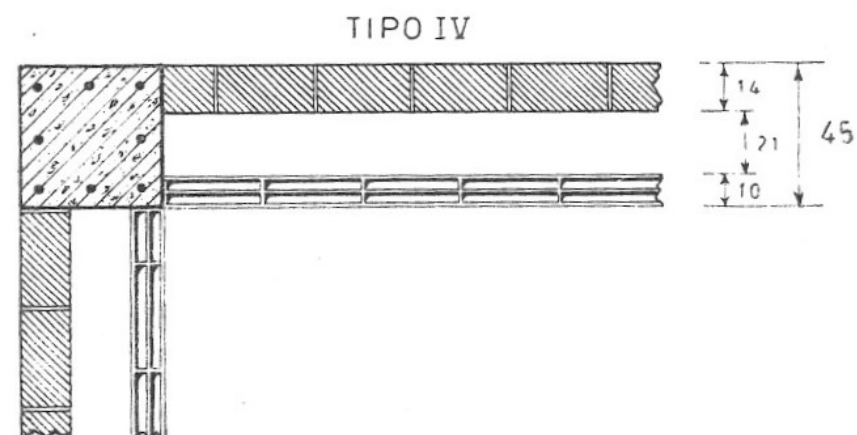
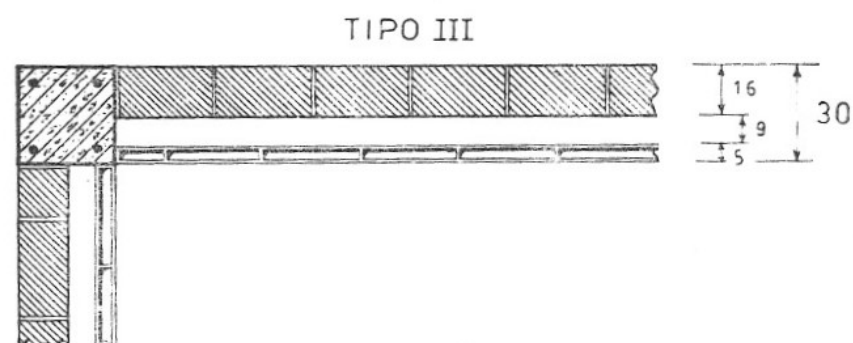
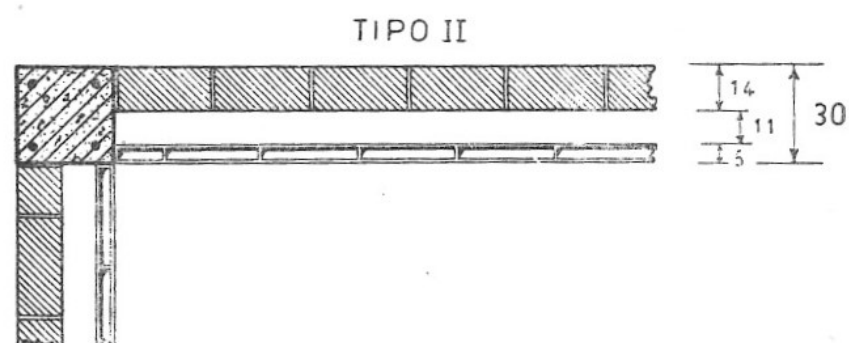
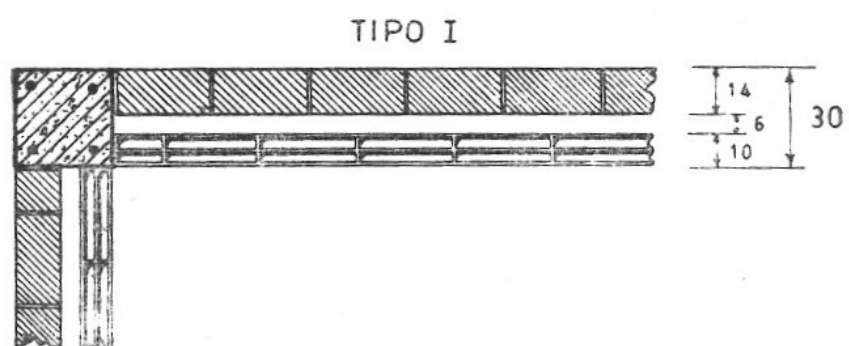


Fig. 2. - Tipi di muratura ad intercapedine.

ad un esame comparativo dei materiali da costruzione, ponendo in evidenza alcune di quelle grandezze che pur avendo un significato convenzionale possono dare un utile indirizzo.

III. - Abbiamo visto sinora cosa avviene entro una parete indefinita. E' evidente che qualora non ostassero ragioni di robustezza, i muri esterni di un edificio civile potrebbero essere costruiti con i materiali più idonei ai nostri scopi, e cioè cemento cellulare, torba in lastre, sughero variamente confezionato.

Ma una costruzione richiede materiali robusti, e quindi è necessario ricorrere alla pietra o al mattone. Allo scopo di ridurre i carichi sulle strutture portanti, e quindi i costi, sono sorte come abbiamo già detto, le « murature a cassetta » costituite verso l'esterno da una parete di mattoni pieni, da una intercapedine di aria, ed infine, verso l'interno, da una parete di mattoni forati.

Nello specchietto sono riportati, secondo le notazioni delle figure 1 e 2 alcuni tipi di muro « a cassetta »:

	Dimensioni in cm.			
	Tipo I	Tipo II	Tipo III	Tipo IV
A	14	14	16	14
B	6	11	9	21
C	10	5	5	10
Totale	30	30	30	45

Data la diffusione che vieppiù acquista questo tipo di muratura, specialmente a causa del suo basso costo e del peso leggero, è bene guardare con attenzione le sue caratteristiche.

Conosciamo già le proprietà di un muro omogeneo di mattoni, siano essi pieni o forati; qui abbiamo una struttura composta, caratterizzata dalla presenza di una camera d'aria di vario spessore interposta tra la parete esterna di mattoni pieni e quella interna di mattoni forati. Erroneamente si attribuisce a questa camera d'aria un maggior potere isolante considerando pari a circa 0,021 Kcal/m²Ch la conduttività dell'aria. Ma già a pag. 496 sulla base dei dati denunciati dal Prof. IZAR nella sua citata opera, abbiamo voluto mettere in guardia contro questa errata valutazione, facendo vedere come la conduttività di uno strato

verticale di aria è assai elevata e come il coefficiente 0,021 valga solo per aria completamente immobile.

Nel caso dell'aria contenuta in una intercapedine, si deve parlare di « conduttività equivalente » χ' definita (5) come la « quantità che mol-

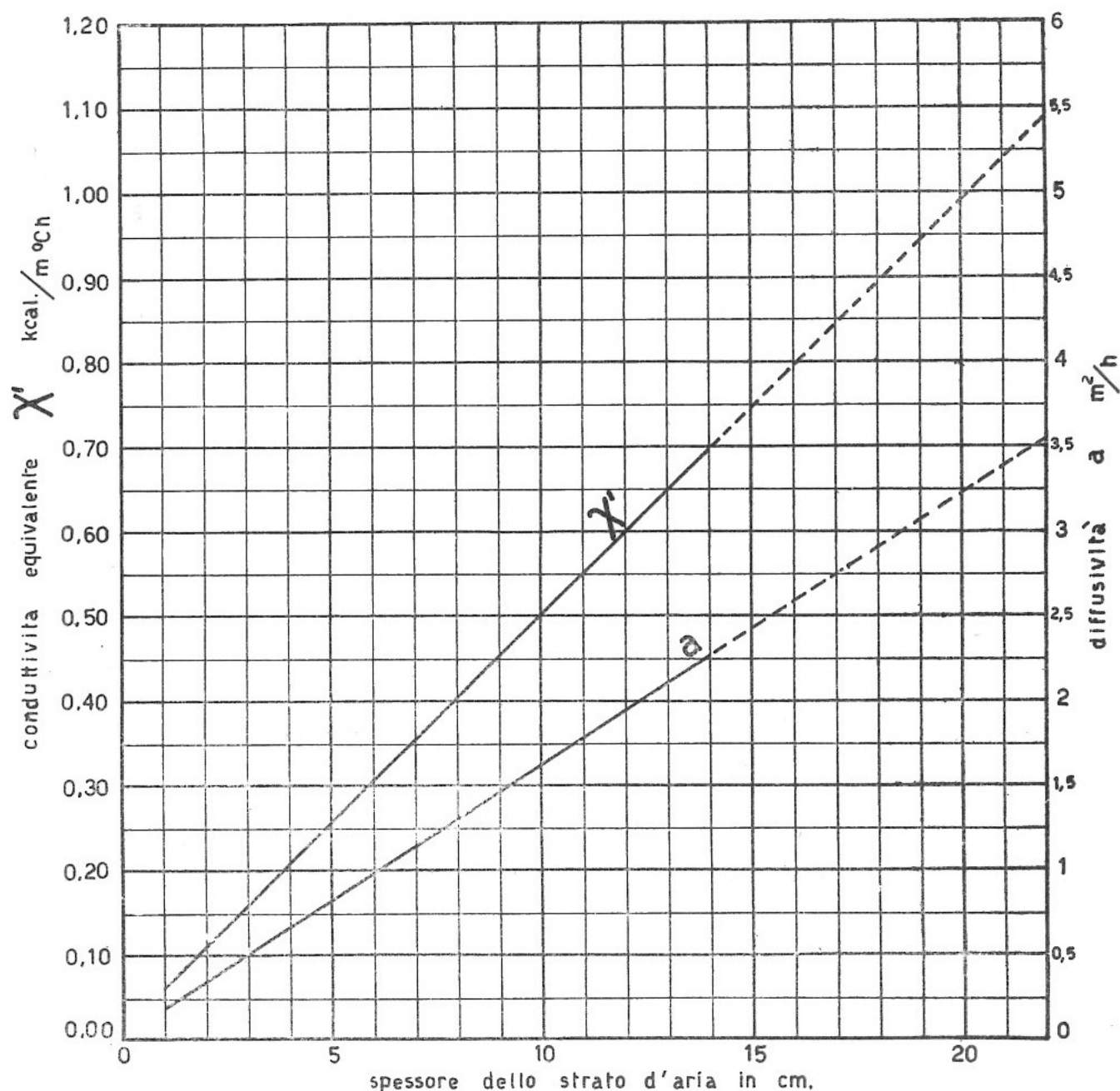


Fig. 3. - Conduttività equivalente e diffusività dell'aria contenuta entro intercapedini verticali.

tiplicata per l'area (normale alla direzione del flusso) e per la differenza di temperatura tra le facce delimitanti l'intercapedine e divisa per lo spessore, dà l'intensità del flusso»; si tiene quindi automaticamente conto dell'apporto della convezione e dell'irraggiamento e si calcola come se lo strato di aria interposto fosse costituito da un qualsiasi materiale solido avente la conduttività χ' .

Sulla scorta dei valori numerici forniti dal Prof. IZAR, abbiamo compilato il diagramma della figura 3 dal quale vediamo subito come, col crescere dello spessore dell'intercapedine, l'aria vada sempre più acquistando le caratteristiche di un buon conduttore del calore.

Inoltre, essendo pari a 0,24 Kcal/Kg°C il calore specifico dell'aria e 1,30 Kg/m³ il suo peso specifico, segue che il prodotto γc ha un valore assai piccolo, 0,31 Kcal/m³ C°, e quindi la diffusività termica assume valori elevatissimi.

Conseguentemente, in regime permanente la conduttività dello strato d'aria è elevata e quindi contribuisce poco al buon isolamento del muro, ed in regime variabile la elevata diffusività termica porta ad un trascurabile smorzamento delle oscillazioni e ad una elevata velocità di propagazione del flusso termico.

Determinate le modalità di propagazione del calore in una parete composta di tale tipo è un problema assai più complesso di quello già grave e spesso insolubile che, come si è visto, si presenta nel caso di muro omogeneo. Abbiamo pensato che si potrebbe avere tuttavia una idea, se pure approssimata, del comportamento di una simile parete, assimilandola ad un muro omogeneo che avesse delle proprietà intermedie tra quelle dei materiali che costituiscono la parete composta.

Procederemo nel seguente modo:

1) Conduttività equivalente della parete composta.

Con le notazioni della fig. 1 ed in conseguenza della (4) quando si pone $\alpha_i = \alpha_e = \infty$ e si riporta il valore finale ad uno spessore unitario, la conduttività di un muro avente uno spessore pari a quello totale della nostra parete e che equivale a quella della nostra parete composta, è data da

$$\gamma_e = (A + B + C) \frac{1}{\frac{A}{\gamma_A} + \frac{B}{\gamma_B} + \frac{C}{\gamma_C}} \quad (10)$$

2) Capacità termica equivalente della parete composta.

Quanto alla propagazione delle variazioni di temperatura, quando il mezzo è omogeneo bisogna prendere di mira la diffusività in cui sono impegnate la conduttività da un canto e la capacità termica γc dall'altro. Quando si tratta di strati la questione è molto più complessa.

Riteniamo opportuno semplificarla ai fini di un semplice orientamento introducendo insieme con la conduttività equivalente, come indicato sopra, la capacità termica equivalente calcolata come media ponderale, cioè:

$$\gamma_e c_e = \gamma_A c_A \frac{A}{(A+B+C)} + \gamma_B c_B \frac{B}{(A+B+C)} + \dots \quad (11)$$

Se l'intercapedine è piena di aria non ne terremo conto poichè il termine ad essa relativo è trascurabile rispetto agli altri.

Con questi criteri abbiamo compilato la tabella V, che si riferisce, a titolo di confronto, a murature di mattoni pieni, murature di mattoni forati, murature « a cassetta » del tipo di cui alla fig. 1 e cioè con camera d'aria; murature « a cassetta » in cui la camera d'aria è stata sostituita con isolanti termici di vario tipo.

Nella tabella V si ritrovano riportate quasi tutte le grandezze della Tabella IV, sempre riferite al fenomeno termico principale aventi il periodo di 24 ore. Inoltre abbiamo anche calcolato i coefficienti globali di trasmissione di vari tipi di parete ammettendo $\alpha_e = 12$ ed $\alpha_i = 7$ come detto in precedenza.

I risultati esposti nella tabella V sono assai interessanti; essi mostrano che il coefficiente globale di trasmissione di un muro a cassetta dei tipi I - II - III - IV aumenta fortemente col crescere dello spessore della camera d'aria, e, in genere, è più elevato di quello che presenta un muro di mattoni forati di eguale spessore.

Il coefficiente di smorzamento è notevolmente più piccolo sia di quello della muratura in mattoni pieni sia di quello della stessa muratura di mattoni forati, sicchè le oscillazioni termiche diurne verranno assai poco attenuate. Il muro, poi, con camera d'aria di 21 cm. e cioè il tipo IV, è senz'altro il peggiore.

Riempiendo l'intercapedine con qualsiasi isolante termico, le cose migliorano in maniera sensibilissima, sia per quanto si riferisce al regime permanente che al regime variabile. Col sughero autoespanso, con quello catramato, con uno spessore di almeno 8 cm. di lana di vetro, con la lana di roccia, si hanno risultati brillanti. L'esperienza ci fa ritenere che, dal lato dell'isolamento termico, un muro è pienamente soddisfacente quando $K \leq 1,00 \text{ Kcal/m}^2 \text{ }^\circ\text{Ch}$ e quando nel medesimo tempo il fattore di smorzamento è $b \geq 10 \div 12 \text{ (m}^{-1}\text{)}$.

In sostanza si ha una conferma chiara e diretta della esattezza degli ammonimenti dati dal Prof. IZAR (o.c.), il quale avvertiva già da tempo della convenienza di riempire la camera d'aria con qualsiasi coibente termico. Il Prof. FAGGIANI d'altra parte, richiamava (o.c.) l'attenzione

TABELLA V.

Tipo di muratura		Spessore	K Kcal/m ² °Ch	γ Kcal/m ³ °C	χ _e Kcal/m ² °Ch	a m ² /h	V m/h	b m ⁻¹
1)	mattoni pieni	45	0,81	360	0,45	0,0012	0,025	10,39
2)	mattoni pieni	30	1,12	360	0,45	0,0012	0,025	10,39
3)	mattoni forati	45	0,66	220	0,35	0,0016	0,029	9,00
4)	mattoni forati	30	0,92	220	0,35	0,0016	0,029	9,00
5)	a cassetta tipo I	30	0,98	253	0,37	0,0015	0,028	9,29
6)	» II	30	0,95	205	0,36	0,0017	0,030	8,73
7)	» III	30	1,08	229	0,43	0,0019	0,031	8,26
8)	» IV	45	1,00	261	0,58	0,0022	0,034	7,67
9)	» SA	29	0,42	256	0,13	0,0005	0,016	16,10
10)	» SA	32	0,30	240	0,10	0,0004	0,014	18,00
11)	» SC	29	0,56	265	0,19	0,0007	0,019	13,60
12)	» SC	32	0,42	249	0,15	0,0006	0,018	14,70
13)	» CC	29	0,63	272	0,21	0,0008	0,020	12,73
14)	» CC	32	0,49	259	0,17	0,0006	0,018	14,70
15)	» LR	29	0,44	255	0,14	0,0005	0,016	16,10
16)	» LR	32	0,32	234	0,11	0,0005	0,016	16,10
17)	» LV	29	0,44	249	0,17	0,0007	0,019	13,60
18)	» LV	32	0,32	229	0,11	0,0005	0,016	16,10
19)	» VC	29	0,69	259	0,24	0,0009	0,021	12,00
20)	» VC	32	0,55	243	0,20	0,0008	0,020	12,73
21)	» CP	29	1,05	284	0,40	0,0014	0,027	9,62
22)	» CP	32	0,98	280	0,40	0,0014	0,027	9,62

Nota: I muri SA, SC ecc. sono muri a cassetta con l'intercapedine riempita con materiale isolante. Essi hanno una parete esterna di mattoni pieni dello spessore di cm. 44 ed una parete interna di mattoni forati dello spessore di cm. 40 tra cui si trova l'intercapedine riempita con isolante, una volta presa con lo spessore di cm. 5 ed una volta con lo spessore di cm. 8 per cui la grossezza complessiva del muro composto risulta rispettivamente di cm. 29 e 32.

Abbreviazioni: SA = Sughero autoespanso autocollato
 SC = Sughero autoespanso catramato
 CC = Cemento cellulare
 LR = Lana di roccia

LV = Lana di vetro
 VC = Conglomerato cement. alla Mica espansa
 CP = Conglomerato cement. alla pomice.

Caratteristiche medie dei materiali come da tabella IV.

dei tecnici su questo problema così importante affermando: « la consuetudine di costruire i muri esterni, nelle strutture in cemento armato, eccessivamente sottili e leggeri è assolutamente da condannare perchè può rendere l'ambiente non solo freddo ma anche non igienico, data la possibilità di condensazione (specie notturna) del vapore acqueo interno ».

* * *

IV. - I miglioramenti che si ottengono con il riempimento della camera d'aria mediante un isolante, sono, come si è dimostrato, notevolissimi.

Vi è da parte dei tecnici la tema di un non trascurabile aumento nei costi. A noi sembra che questo timore sia ingiustificato, ed infatti, in primo luogo si ha una maggiore disponibilità di spazio causa il minore spessore che questo tipo di muro richiede rispetto agli stessi muri « a cassetta » con camera d'aria, ed in secondo luogo l'aumento dei costi non è poi così grande da preoccupare.

Altro fattore importante è che il costo dell'impianto di riscaldamento e dell'esercizio di esso si riduce sensibilmente e la maggiore spesa per l'isolamento verrà ammortizzata in un breve periodo di tempo.

Il lieve peso degli isolanti non porta infine alla necessità di irrobustire le strutture portanti.

Ammettiamo di voler isolare i muri esterni dei seguenti tipi di edifici:

1) Fabbricato a tipo popolare in zona urbanistica a costruzioni intensive.

2) Fabbricato a tipo medio in zona urbanistica a costruzioni intensive.

3) Fabbricato a tipo mediamente signorile in zona urbanistica a costruzioni semintensive (palazzina).

Per il tipo 1) considereremo un edificio delle seguenti dimensioni

$$L = \text{m. } 80 \qquad P = \text{m. } 30 \qquad h = \text{m. } 32$$

In base ad un indice di fabbricabilità di $\frac{\text{m}^3 20}{\text{m}^2 1}$ corrispondente a normali rapporti tra ampiezza cortili e superfici delle pareti che li limitano, daremo ai muri verso cortile uno sviluppo lineare di m. 120.

La superficie dei muri esterni sarà quindi: $m. 340 \times 32 = m^2 10.880$. Tenendo conto dei vani di finestra e delle superfici afferenti alle strutture in cemento armato possiamo apportare una detrazione del 20%. Si avrà quindi una superficie effettiva dei muri da isolare pari a $m^2 8.700$. La cubatura vuoto per pieno del fabbricato sarà di $m^2 (2400 - 800) \times m. 32 = m^3 51.200$. Il costo della costruzione di questo tipo riferito ai prezzi correnti si può valutare in L. 6.500 al m^3 vuoto per pieno e per $m^3 51.200$, L. 332.800.000. Ammesso per il materiale isolante (sughero autoespanso catramato in lastre dello spessore di cm. 5) un costo, in opera, di L. 1000 al m^2 , si avrà una spesa di $m^2 8700 \times L. 1000 = L. 8.700.000$.

L'incidenza totale sarà quindi del 2,61% sul costo totale della costruzione e di L. 170 per ogni metro cubo vuoto per pieno.

Per il fabbricato del tipo 2) assumendo la stessa cubatura vuoto per pieno del tipo precedentemente considerato e valutando il costo della costruzione in L. 8.500 per m^3 vuoto per pieno, si avrà un costo totale di L. 435.200.000 ed una incidenza per il materiale isolante del 2% e di L. 170 per ogni metro cubo vuoto per pieno.

Per un edificio del tipo 3) delle dimensioni di:

$$L = 30 \text{ m} \quad P = 20 \text{ m} \quad h = 22 \text{ m}$$

avremo una superficie di muri esterni pari a $m. (100 + 28) \times 22 = m^2 2816$. Detraendo il 20% per le superfici corrispondenti ai vani di finestra e delle strutture in cemento armato si avrà una superficie effettiva di muri esterni da isolare pari a $m^2 2253$.

La cubatura vuoto per pieno sarà di $m^2 (600 - 80) \times m. 22 = m^3 11.440$. Valutando in L. 10.000 il costo per m^3 vuoto per pieno si avrà un costo totale di L. 114.400.000.

La spesa per il materiale isolante sarà di $L. 1000 \times m^2 2253 = L. 2.253.000$ con una incidenza dell'1,97% e di L. 197 per m^3 vuoto per pieno.

Dalla tabella V si rileva che una costruzione, con muri di tamponamento « a cassetta » dello spessore di cm 29 con intercapedine riempita con lastre di sughero autoespanso dello spessore di cm 5, ha un coefficiente di trasmissione di poco inferiore alla metà di un analogo muro a « cassetta » senza isolamento, ed anche sensibilmente inferiore di un muro di mattoni pieni o forati dello spessore di cm 30. In quest'ultimo caso la maggiore spesa rispetto al muro a cassetta senza riempimento compenserebbe totalmente quella per l'isolamento del muro a cassetta, non tenendo conto dei maggiori oneri per l'aumento di peso.

Un ultimo interessante esempio può riguardare le costruzioni ospedaliere.

Consideriamo un ospedale di 300 posti letto del tipo costruttivo a doppio T con ala posteriore raccorciata e composto di 6 piani fuori terra dell'altezza totale di m 22, corrispondente allo schema qui sotto indicato (fig. 4).

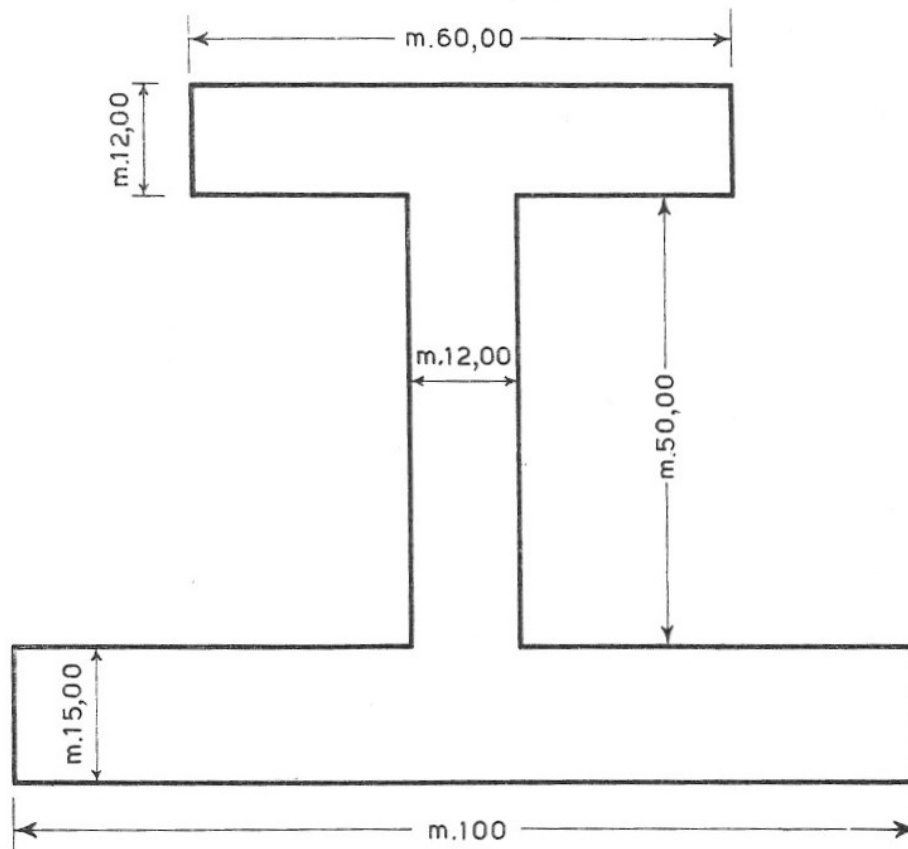


Fig. 4. - Planimetria schematica di un edificio destinato ad ospedale.

La superficie dei muri esterni sarà di m² 9900 da cui detraendo il 20% si ottiene una superficie effettiva di muri esterni pari a m² 7920.

Il costo medio per questi tipi di ospedali è di L. 2.000.000 per posto letto e quindi un costo totale di L. 600.000.000.

L'incidenza della maggiore spesa per la superficie dei muri da isolare (m² 7920) è dell'1,32% sul costo totale della costruzione e di L. 128 al m³ vuoto per pieno.

V. - CONCLUSIONI. - La presente analisi si basa, fondamentalmente su concetti già messi in luce e ribaditi da illustri studiosi e tecnici italiani, e purtroppo, quasi sempre dimenticati nella assillante febbre del costruire.

Le costruzioni con muratura ad intercapedine « vuota » costituiscono oggi, in Italia ed all'Estero, un diffuso sistema che presenta grandi inconvenienti, specialmente quando si tratta di ospedali, ovvero, in genere, di abitazioni civili e di edifici di pubblico interesse siti in zone con variazioni climatiche brusche e con clima freddo ed umido.

Agli inconvenienti in questione si può porre agevolmente efficace rimedio.

Richiamata nuovamente l'attenzione dei tecnici sul problema, si è cercato nello stesso tempo di suggerire qualche accorgimento atto a migliorare questo diffuso tipo di costruzione.

Roma — Istituto Superiore di Sanità - Laboratorio di Ingegneria.

BIBLIOGRAFIA

- (¹) BELAKHOWSKY S. - Chauffage des locaux habités - Ed. Technique et Vulgarisation - Paris, 1937.
- (²) FOURNOL A. - Les méthodes d'essais thermique des matériaux de construction au Laboratoire - Cahiers du Centre Scientifique et Technique du Bâtiment, n. 6, Paris, 1948.
- (³) COLOMBO - Manuale dell'Ingegnere - Hoepli, 1939.
GÖTTSCHE G. e POHLMANN W. - Formulaire du Frigoriste, Ed. Dunod, Paris, 1934.
- (⁴) IZAR - Termotecnica, Ed. Unione Tipografica, Milano, 1938.
- (⁵) DALBERTO FAGGIANI - Trasmissione del calore - Ed. Tamburini, Milano, 1946.

Direttore responsabile: Prof. DOMENICO MAROTTA

Reg. Stampa - Trib. di Roma n. 1534 del 14 luglio 1956