

## **Analisi comparativa sul comportamento termoigrometrico di pareti costituite da vari materiali abitualmente impiegati nell'edilizia**

(Comparative analysis of the hygrothermometric behaviour of walls made of various materials commonly used in buildings)

G. PAGLIARINI, G. RAFFELLINI

Istituto di Fisica Tecnica, Facoltà di Ingegneria, Università di Bologna, Italia

### Sommario

Nella nota viene presentato un confronto, sotto il profilo termoigrometrico ed energetico, fra alcuni tipi di prodotti in laterizio ed altri materiali di diversa natura, abitualmente utilizzati nell'edilizia civile per la realizzazione di pareti opache esterne.

Sulla base delle proprietà termofisiche dei vari materiali considerati, viene condotta un'analisi comparativa riguardante alcune possibili soluzioni costruttive utilizzanti i suddetti materiali, anche accoppiati a strati isolanti.

Tale analisi ha lo scopo di fornire indicazioni pratiche riguardanti il risparmio di energia, l'equilibrio termoigrometrico delle pareti ed il loro comportamento in regime termico variabile.

### Abstract

The paper presents a comparison, from the hygrothermometric and energetic viewpoints, of several types of external walls made of bricks and other materials of various kinds which are commonly used in civil buildings.

On the basis of the thermophysical properties of the various materials considered, a comparative analysis is made concerning some possible building solutions using the mentioned materials, also combined with insulating layers.

The aim of these analyses is to provide some practical indications especially concerning the energy saving, the hygrothermometric equilibrium of the walls and their behaviour in variable temperature conditions.

### 1. PREMESSA

L'attuale crisi energetica e l'opportuna Legge Nazionale N. 373 /1/, peraltro assai deludente nell'applicazione e nelle verifiche per il comportamento pressochè inadempiente della maggioranza dei Comuni italiani, hanno inciso, in questi ultimi anni, in modo profondo sulla progettazione degli edifici e nell'utilizzazione dei materiali impiegati. La presente nota si propone di valutare i principali aspetti del comportamento termoigrometrico dei materiali e delle soluzioni costruttive di interesse pratico, in quanto frequentemente utilizzate nell'edilizia odierna per la realizzazione di pareti opache esterne.

## 2. COMPORTAMENTO IN REGIME TERMOIGROMETRICO STAZIONARIO

### 2.1 Trasmittanza termica e temperatura superficiale interna in zona corrente

In questa prima fase d'indagine è stato valutato innanzitutto il comportamento termico in regime stazionario, ai fini del risparmio d'energia e del benessere termico dell'ambiente interno di una serie di pareti (casi A ÷ M), assai diverse per i materiali impiegati e per i sistemi di posa in opera adottati. Infatti, mentre i primi tre casi considerati (A, B, C) sono caratteristici dell'edilizia antecedente le disposizioni di legge sul risparmio energetico /1/ e quindi senza l'adozione di particolari misure per limitare le dispersioni termiche, e qui considerati soprattutto come riferimento, tutti gli altri costituiscono esempi di realizzazioni attuali, differenti principalmente per la presenza e la posizione di strati isolanti oppure per il tipo di materiale adottato.

Nella tabella 1 sono riportati i valori delle proprietà termofisiche dei materiali componenti le pareti in esame, desunti dalla letteratura specializzata /2,3,4/ ed assunti per i calcoli. In particolare i valori di conduttività termica sono relativi ai

TABELLA 1

	Conduttività termica $\lambda$ $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$	Densità $\rho$ $\text{kgm}^{-3}$	Calore spec. a p = costante $c_p$ $\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$	Coeff. resist. diffusione vapore rela- tivo all'aria $\mu$
AMIANTO (LASTRE)	0,60	1800	1000	20
ARIA (CAMERA D')	0,19 (eq.)	1,3	1000	1
CLS ARMATO	2,15	2400	880	50
CLS CELLULARE	0,21	600	800	6
GESSO	0,70	1200	840	10
INTONACO	0,90	1800	860	15
LANA MINERALE	0,04	30	840	1,5
LATERIZI PORIZZATI	0,28	700	950	6
MATTONI FORATI	0,36 (eq.)	1000	920	8
MATTONI PIENI	0,86	1800	1050	10
POLIURETANO ESPANSO	0,025	35	1400	30

materiali posti in opera /2/.

Assumendo i valori di temperatura esterna minima ed umidità relativa, tipici per molte città del Nord Italia:  $t_e = -5^\circ\text{C}$ ;  $\varphi_e = 80\%$ , e per l'ambiente interno:  $t_i = 20^\circ\text{C}$ ;  $\varphi_i = 60\%$  e delle adduttanze unitarie interna ed esterna suggerite dalla norma /5/:  $\alpha_i = 8 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$  ed

$\alpha_e = 23 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ , sono stati desunti dapprima i valori della trasmittanza termica unitaria (K), delle temperature superficiali interne ( $t_{si}$ ) ed esterne ( $t_{se}$ ) e della densità superficiale ( $\Sigma$ ). I risultati riportati nella tabella 2 mostrano la sensibile differenza dei valori di K e  $t_{si}$  tra pareti isolate e non, con valori in termodi per quelle costituite da materiali di per sé parzialmente isolanti.

TABELLA 2

	K/Wm <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> /	t <sub>se</sub> /°C/	t <sub>si</sub> /°C/	Σ/kgm <sup>-2</sup> /
A	1,94	- 2,9	13,9	540
B	1,03	- 3,9	16,8	316
C	3,96	- 0,7	7,8	402
D	0,79	- 4,2	17,6	246
E	0,72	- 4,2	17,8	186
F	0,46	- 4,5	18,6	333
G	0,65	- 4,3	18,0	541
H	0,65	- 4,3	18,0	541
I	0,79	- 4,2	17,6	421
L	0,79	- 4,2	17,6	421
M	0,53	- 4,4	18,4	60

Nell'ipotesi teorica di regime stazionario, la posizione dell'isolante non ha alcuna influenza sulle dispersioni termiche (vedasi casi G, H ed I, L).

I valori di temperatura superficiale interna sono significativi per quanto riguarda il rischio del manifestarsi di condensa superficiale, che, nelle condizioni ipotizzate, si formerebbe per valori di  $t_{si} < 12^\circ\text{C}$  e per quanto riguarda il benessere termico interno, che potrebbe essere compromesso da scambi radiativi interni troppo intensi.

## 2.2 Trasmittanza lineare e temperatura superficiale in zona ponte termico

Mediante un programma di calcolo già elaborato /6/, utilizzando il metodo numerico degli elementi finiti, sono stati desunti i valori del coefficiente lineare ( $K_L$ ) e gli andamenti delle linee isotermitiche rispettivamente a  $0^\circ\text{C}$  (linea tratteggiata),  $12^\circ\text{C}$  (linea continua),  $14^\circ\text{C}$  (linea tratto e punto), relativi ad alcuni esempi di ponte termico che si verificano all'intersezione parete verticale-solaio di piano, anche passante.

Le pareti verticali considerate sono alcune fra quelle già esaminate al precedente paragrafo.

I risultati sono riportati nelle Figg. 1 ÷ 7; il loro esame suggerisce le seguenti considerazioni:

- i casi a, b, c, presentando disuniformità geometrica, ma limitate disomogeneità della conduttività termica dei materiali, sono caratterizzati da modesto effetto di ponte termico;
- il caso d, esempio di isolamento dall'esterno con solaio aggettante, pur presentando evidenti distorsioni delle linee isotermitiche, che stanno a testimoniare della presenza di sensibili flussi termici non perpendicolari alla parete, e di conseguenza un elevato valore di  $K_{\ell}$ , non evidenziano rischio di condensazione superficiale interna;
- al contrario del caso d, i casi e ed f, con isolamento dall'interno, presentano anche questo rischio. Va sottolineato che questa differenza nei risultati dipende molto più dalla posizione dell'isolante che dal tipo di materiale portante impiegato;
- il caso g, in cui la presenza dell'intercapedine d'aria senza inserimento di isolante è caratteristico dell'edilizia antecedente le disposizioni di Legge /1/, evidenzia un comportamento intermedio fra quelli considerati precedentemente.

### 2.3 Comportamento termoigrometrico di pareti

E' stato valutato per le pareti in esame il comportamento termoigrometrico secondo il metodo grafico approssimato di Glaser /7/, per verificare la possibilità di condensazione del vapor d'acqua all'interno delle stesse e l'entità del fenomeno, quantificato dall'area compresa fra le linee rappresentative rispettivamente della pressione parziale del vapor d'acqua ( $P_v$ ) e della pressione di saturazione ( $P_s$ ) nelle zone in cui  $P_v > P_s$ .

I risultati sono riportati, unitamente all'andamento della temperatura, negli schemi delle Figg. 8 ÷ 18, dove si può osservare come questo problema insorga nei casi in cui gli strati di materiale isolante sono posti verso l'interno dei locali riscaldati (H, I, M) od in posizione intermedia (F) e richiedano in questi casi la messa in opera di barriere al vapore, mentre nessun problema insorge in tutti gli altri casi considerati.

### 3. Comportamento in regime termico variabile

Pur essendo molto frequentemente valutate le prestazioni delle pareti solo in regime termico stazionario, tuttavia in fase di progettazione, sarebbe opportuno non trascurare le variazioni delle condizioni ambientali a cui esse sono sottoposte.

A tale scopo, nella presente nota, si è supposto che le condizioni ambientali siano le medesime a due istanti di tempo  $\tau$  e  $\tau + \tau_0$ , per ogni valore di  $\tau$ , e per un intervallo di tempo  $\tau_0$  costante; tale regime è comunemente detto periodico stabilizzato e  $\tau_0$  ne è il periodo.

Inoltre se si trascurano le non linearità presenti nel processo di scambio termico che avviene tra parete e ambiente, è possibile comprendere in un solo parametro i fattori che determinano le condizioni ambientali esterne: temperatura dell'aria ed irraggiamento solare. Questo fattore è noto come temperatura aria-sole ed è espresso dalla relazione:

$$t_{as} = t_e + \frac{\alpha I}{\alpha_e}$$

dove è  $t_e$ : temperatura dell'aria esterna,  
 $I$ : potenza termica, dovuta alla radiazione solare, incidente sulla unità di superficie di parete considerata,  
 $a$ : coefficiente di assorbimento della superficie esterna della parete,  
 $\alpha_e$ : adduttanza unitaria esterna.

Per semplicità di trattazione, l'ambiente interno è assunto a temperatura costante. In tali condizioni è possibile calcolare la potenza termica che attraversa la parete istante per istante, al fine di un più corretto dimensionamento degli impianti, ovvero, in assenza di impianto di condizionamento dell'aria, per valutare se la parete considerata è in grado di assicurare un sufficiente benessere termico agli utenti, attenuando e ritardando opportunamente l'onda termica esterna. Pertanto è utile calcolare la riduzione d'ampiezza ( $\sigma$ ) e il ritardo di fase ( $\psi$ ), relativi alla superficie interna della parete /8/, di una sollecitazione sinusoidale, di dato periodo, verificantesi nell'ambiente esterno, con l'ambiente interno mantenuto a temperatura costante. I valori di  $\sigma$  e  $\psi$  possono essere assunti come indice delle prestazioni della parete esterna ed inoltre, la loro conoscenza in funzione del periodo  $\tau_0$ , consente, mediante la tecnica dell'analisi di Fourier, di determinare i flussi termici che istante per istante attraversano la parete in corrispondenza di una qualsivoglia variazione periodica della temperatura dell'aria esterna e dell'irraggiamento solare. Per le pareti già considerate ai precedenti paragrafi, A ÷ M, sono riportati in Tabella 3 i valori di  $\sigma$  e  $\psi$  calcolati con il metodo analitico dell'analogia elettrica /8/, per una sollecitazione esterna sinusoidale, di ampiezza unitaria. Insieme ai valori relativi all'armonica fondamentale (periodo 24 ore), è parso opportuno riportare anche quelli relativi alla seconda armonica (periodo 12 ore), poichè negli orientamenti EST ed OVEST, a causa dell'irraggiamento solare dissimmetrico, nella temperatura aria-sole è presente una componente non trascurabile avente periodo di 12 ore. Nell'orientamento SUD e su superfici orizzontali, invece, la sola prima armonica approssima sufficientemente, per i fini pratici, la variazione delle condizioni esterne nell'arco delle 24 ore. Contrariamente a quanto avviene nel caso del regime stazionario, la risposta delle pareti a sollecitazioni termiche variabili nel tempo dipende non solo dalle caratteristiche termofisiche e dagli spessori dei materiali costituenti la parete ma anche dall'ordine con il quale questi sono disposti. Infatti, vedasi ad esempio, le pareti G ed L e quelle H ed I, per le quali i valori di  $\sigma$  e  $\psi$  sono sensibilmente diversi, ed in particolare per le pareti I ed L. In generale la disposizione dell'isolante termico verso l'esterno esalta le caratteristiche di attenuazione e di sfasamento della parete. Le pareti considerate presentano valori di riduzione d'ampiezza dell'armonica fondamentale inferiori a 0,07, con l'eccezione del caso C a causa dell'elevata conduttività termica del calcestruzzo. I valori relativi alla seconda armonica risultano molto inferiori a questi, se si eccettua la parete M che, a causa della bassa densità superficiale, è particolarmente sensibile alle sollecitazioni di breve periodo.

TABELLA 3

	$\sigma$ armonica fondamentale	$\sigma$ 2 <sup>a</sup> armonica	$\tau$ armonica fondamentale	$\tau$ 2 <sup>a</sup> armonica
A	0,067	0,024	9,4	7,0
B	0,043	0,015	9,6	7,4
C	0,326	0,193	4,2	3,2
D	0,034	0,012	9,7	7,5
E	0,047	0,021	7,4	6,0
F	0,019	0,006	9,5	6,9
G	0,007	0,002	11,9	8,4
H	0,010	0,003	11,5	8,3
I	0,046	0,024	5,7	4,1
L	0,027	0,013	6,4	4,1
M	0,064	0,057	1,7	1,7

Analogamente, per quasi tutte queste pareti, il ritardo di fase è tale da garantire un sufficiente intervallo di tempo tra gli istanti in cui si verificano i valori massimi della sollecitazione termica esterna e del flusso che attraversa la superficie interna della parete. Fanno ancora eccezione le pareti C ed M per i motivi già esposti.

Per alcune delle pareti considerate è parso infine di qualche interesse calcolare i flussi termici che attraversano le superfici esterna ( $\phi_e$ ) ed interna ( $\phi_i$ ) quando la temperatura aria-sole varia come rappresentato in Fig. 19, (valori teorici relativi a Bologna nel mese di Marzo per orientamento SUD) mentre l'ambiente interno è mantenuto alla temperatura costante di 20°C. Il flusso termico mediamente disperso ( $\phi_m$ ) dall'ambiente interno verso l'esterno nelle 24 ore, indicato nelle Figg. 20 ÷ 26 da un segmento a tratto discontinuo è pari al valore calcolabile nel regime stazionario, caratterizzato dal valore medio della temperatura aria-sole considerata. Dalle figure si può tuttavia osservare come, con la sola esclusione della parete G, durante le ore del soleggiamento, penetrino nella parete quantità di calore ingenti. Una piccola parte di questo raggiunge l'ambiente interno, mentre la restante viene immagazzinata dalla parete. In questa ipotesi di trasmissione del calore, più che i valori minimi e massimi di  $\phi_e$  e  $\phi_i$ , appaiono significativi i valori del rapporto fra il valore massimo di  $\phi_e$  ed il relativo valore medio  $\phi_m$ . Come è desumibile dagli andamenti riportati nelle figure, tale rapporto assume per queste pareti valori che vanno da un minimo di 11,5 per la parete C fino ad un massimo di 84 per la parete H, isolata verso l'ambiente interno. Tale calore, accumulato nella parete durante il giorno, se si potesse evitare il suo ritorno allo



ambiente esterno durante la notte, risulterebbe esuberante rispetto alle dispersioni dell'ambiente. E' peraltro possibile costruire la parete in modo tale che il flusso termico che l'attraversa abbia una direzione preferenziale: dall'ambiente esterno verso l'interno. Ciò è ottenibile sovrapponendo alla parete una o più lastre di vetro, onde sfruttare l'effetto serra, come avviene in alcune applicazioni di edilizia passiva (serre, spazi solari, muri di Trombe). Può inoltre risultare utile, utilizzare fluidi vettori per trasportare il calore dalla massa della parete, in cui è stato accumulato, all'ambiente interno evitando la resistenza termica di conduzione, particolarmente elevata qualora siano presenti strati isolanti in corrispondenza della superficie interna della parete, come è il caso della parete H.

Dall'esame delle figure 21,25,26 si può vedere come vari il comportamento delle pareti utilizzando lo stesso materiale (CLS) in diversi spessori, mentre confrontando i diversi andamenti nelle Figg. 20, 22,25, si può rilevare, a parità di spessore, l'influenza di alcuni tipi di materiali diversi, ed ancora, esaminando gli andamenti di  $\varnothing_e$  ed i valori delle differenze  $(\varnothing_i - \varnothing_m)_{\max}$  riportate nelle Figg. 23 e 24, come influisca la posizione di uno strato isolante.

#### BIBLIOGRAFIA

- /1/ L. 30/4/76, n. 373: Norme per il contenimento del consumo energetico per usi termici negli edifici - G.U. 7/6/1976, n° 148; D.P.R. 28/6/1978, n. 1052; D.M. 10/3/1977, G.U. 6/2/1978, n. 36.
- /2/ Progetto di norma CTI 1/121, Aggiornamento della tabella riportata al punto 7.1.2. della Norma UNI 7357 (vedasi /5/): Conducibilità termica dei materiali isolanti (in inchiesta pubblica).
- /3/ K.RAZNJEVIC: Tabelle termodinamiche - Ed. Del Bianco, Milano, 1971.
- /4/ Normativa Tecnica Regionale per l'edilizia residenziale pubblica della Regione Emilia Romagna, ricerca ICIE-IFT, Vol. 3, Libro delle specifiche, Bologna, 1978.
- /5/ Norma UNI 7357: Calcolo del fabbisogno termico per il riscaldamento di edifici, Milano, 1975.
- /6/ G.PAGLIARINI, A.MUNARI: I ponti termici nelle strutture edili ed il calcolo della distribuzione della temperatura per particolari geometrie spaziali - Atti dell'Accademia delle Scienze di Bologna, Anno 268, Serie XIII, Tomo VII pag. 99-116, Bologna, 1980.
- /7/ GLASER: Graphisches verfahren zur untersuchung von diffusionsvorgängen - Kaltetechnik n. 11, 1959.
- /8/ P.BONDI, P. DI FILIPPO, G.REALE: Thermal performance of walls, Ed. PEG, Milano, 1977.

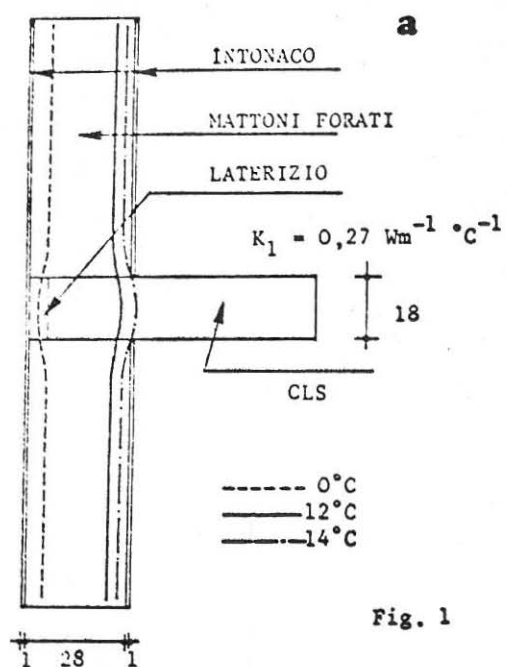


Fig. 1

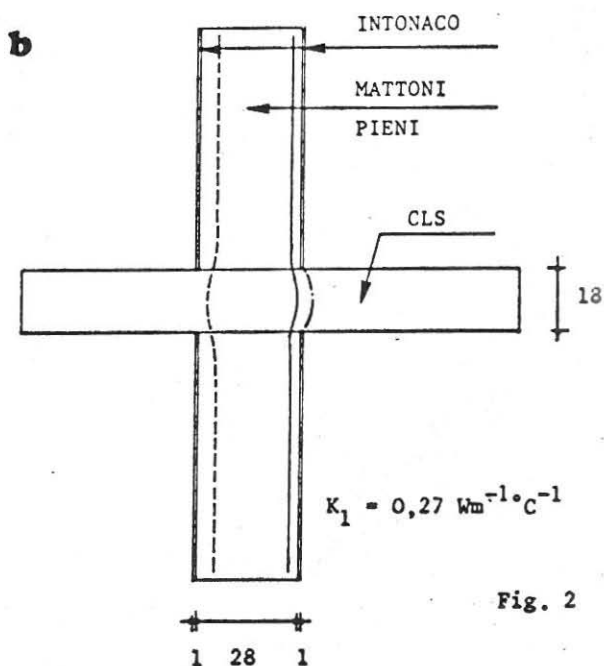


Fig. 2

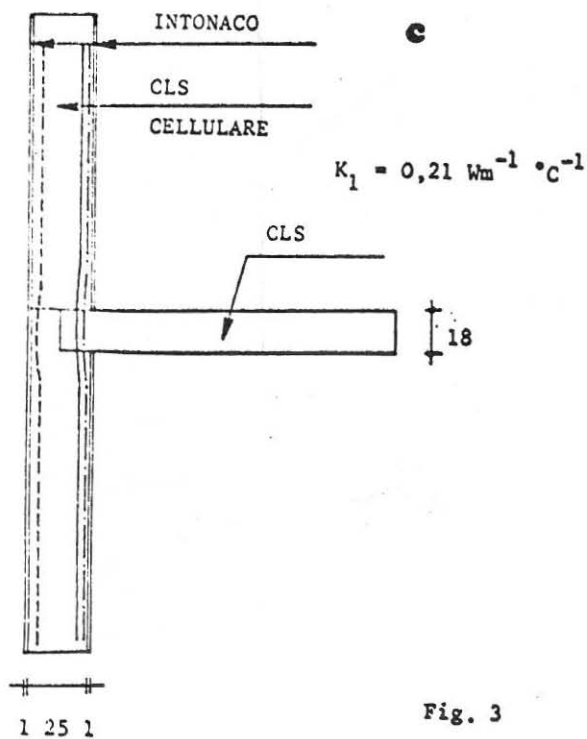


Fig. 3

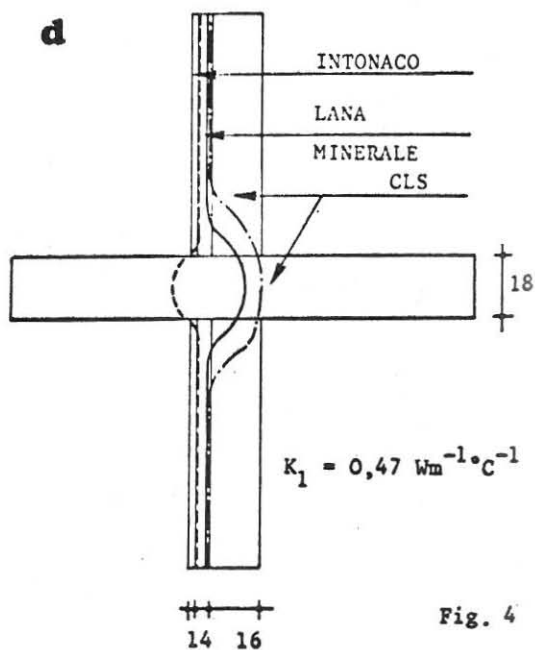


Fig. 4



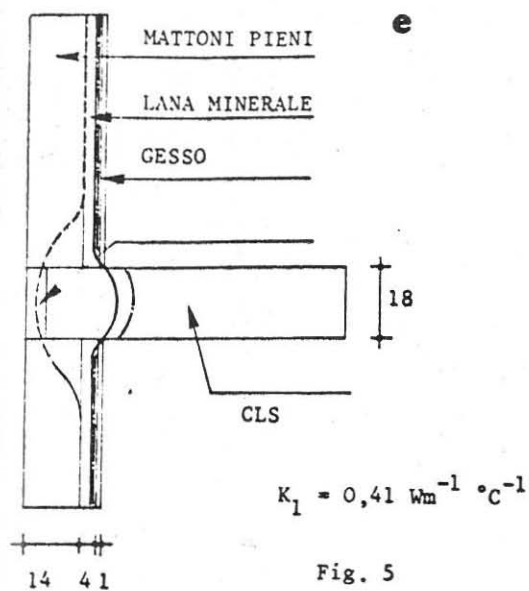


Fig. 5

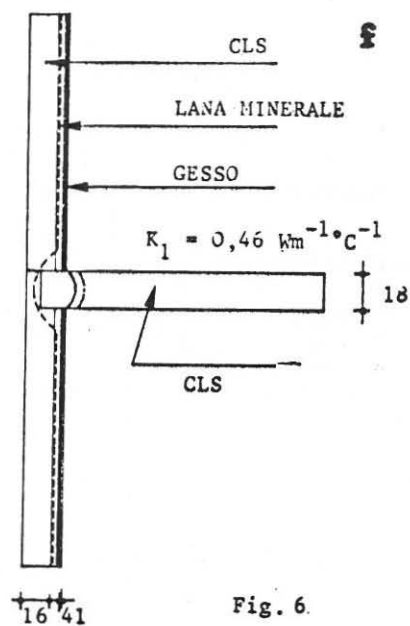


Fig. 6

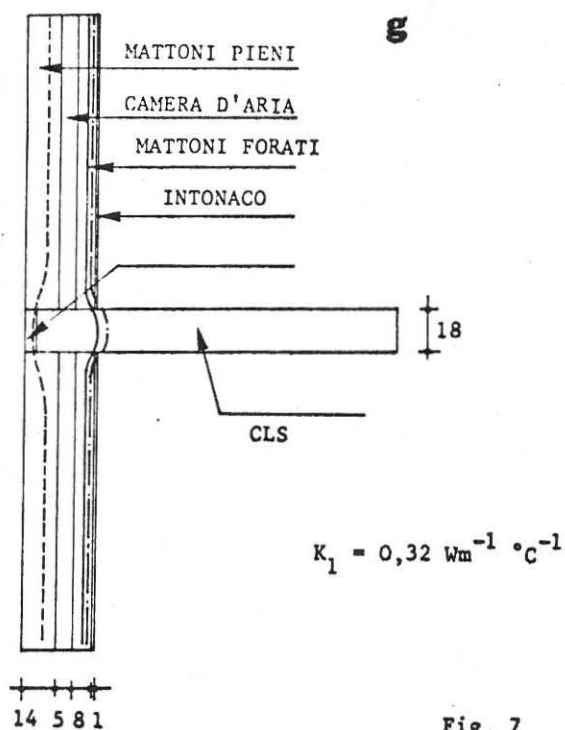


Fig. 7

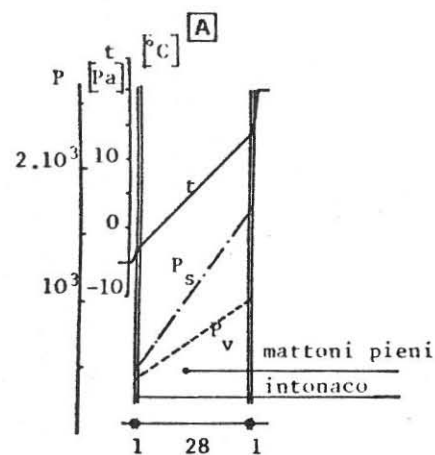


Fig. 8

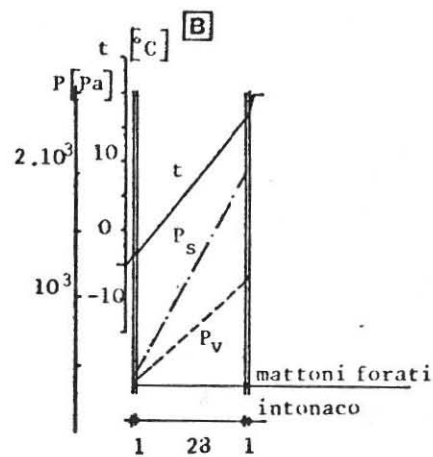


Fig. 9

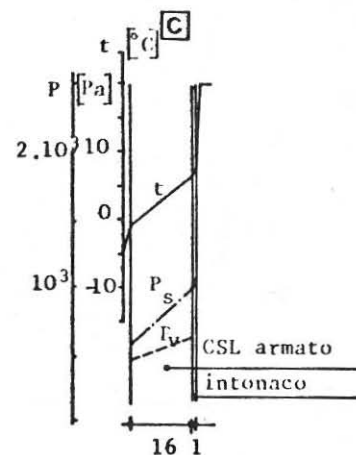


Fig. 10

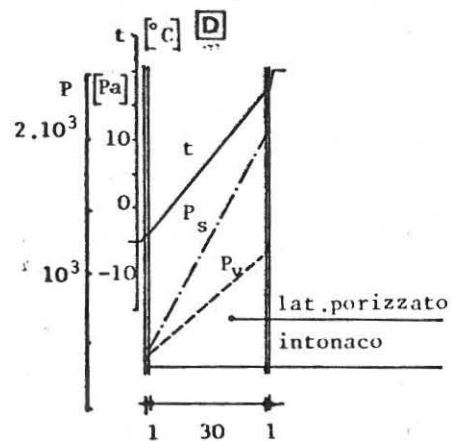


Fig. 11

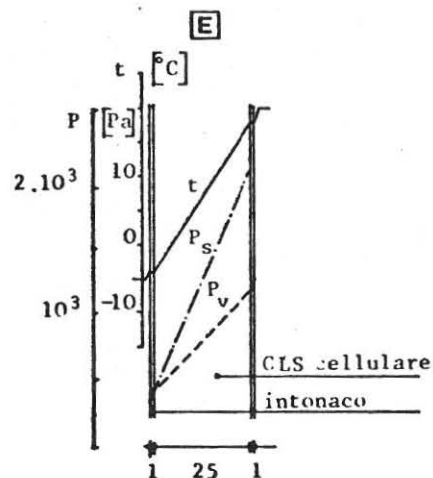


Fig. 12

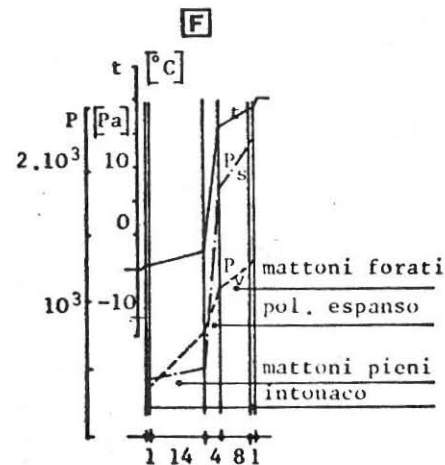


Fig. 13

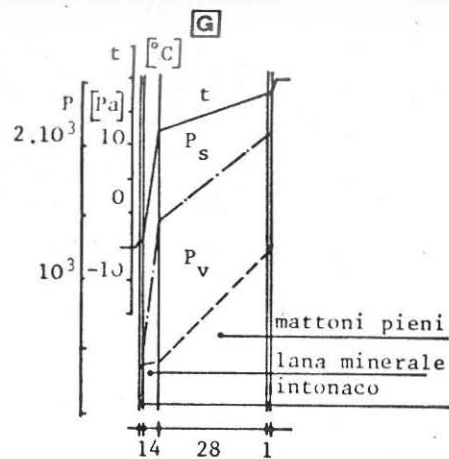


Fig. 14

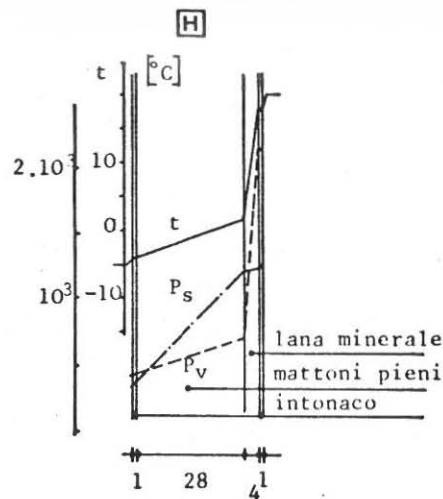


Fig. 15

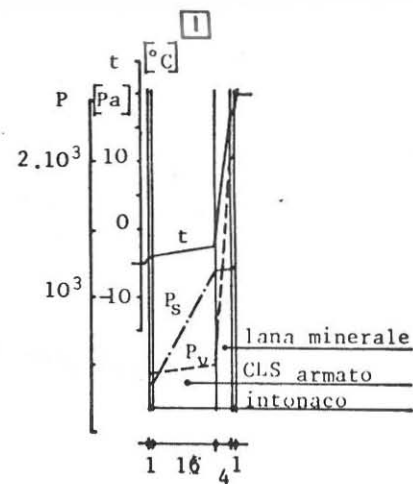


Fig. 16

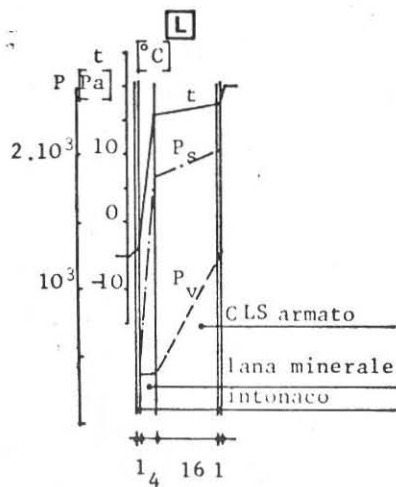


Fig. 17

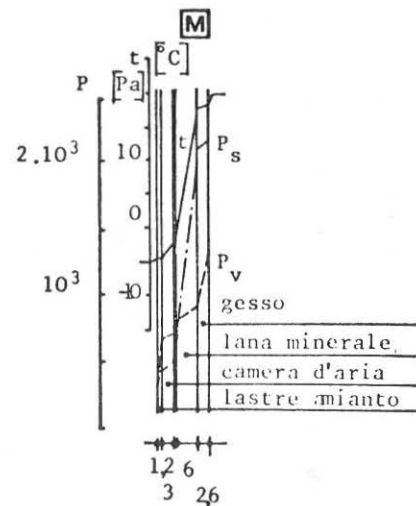


Fig. 18

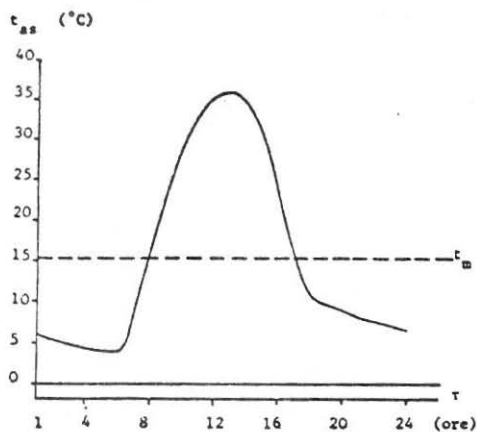


Fig. 19

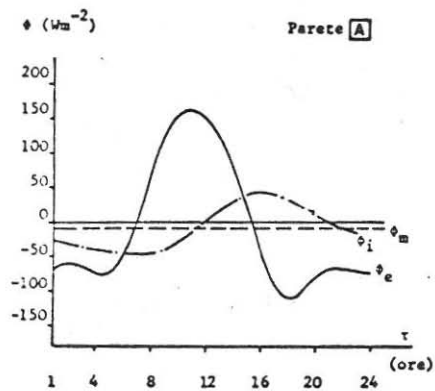


Fig. 20

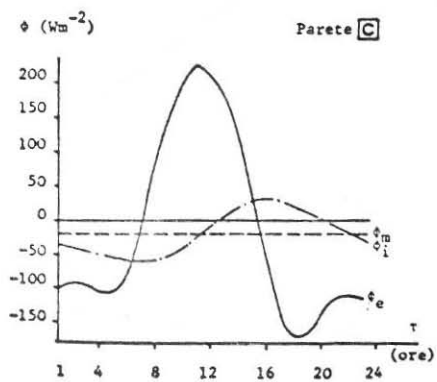


Fig. 21

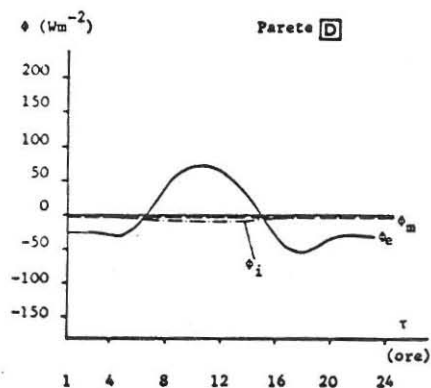


Fig. 22

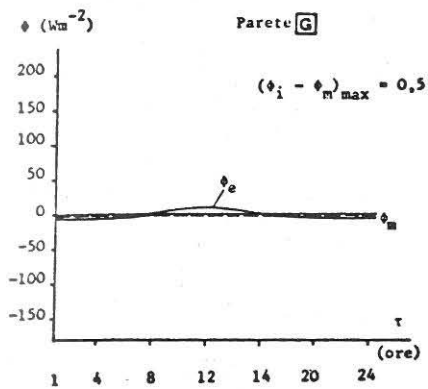


Fig. 23

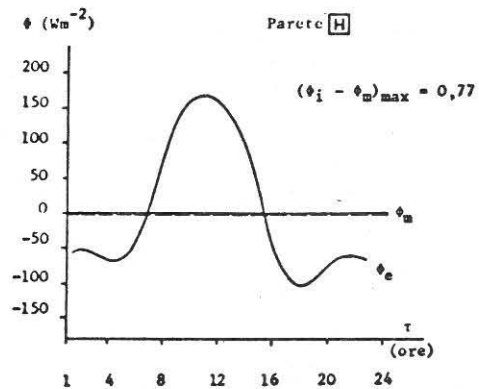


Fig. 24

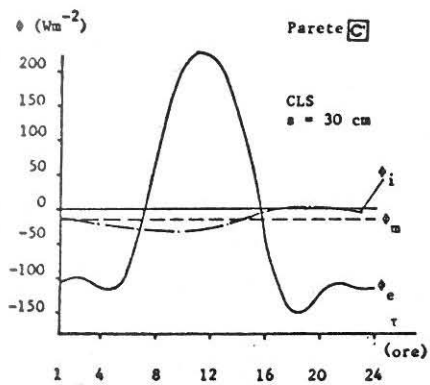


Fig. 25

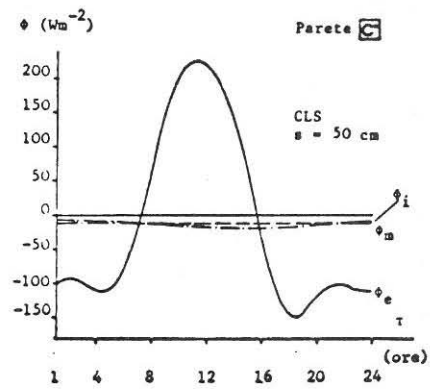


Fig. 26