

21. Ugo SELLERIO. — **Struttura e caratteristiche del polistirolo espanso autocollato.**

Riassunto. — Si analizzano le caratteristiche di struttura dei conglomerati di polistirolo espanso — molto adoperati, tra l'altro, per l'isolamento termico — ponendone in rilievo l'affinità con gli autoespansi-autocollati di sughero in conseguenza di procedimenti di lavorazione sostanzialmente non molto diversi.

Si mostra come dalle caratteristiche di struttura del polistirolo espanso dipendano buona parte delle proprietà fisiche di questo materiale ed i conseguenti accorgimenti per una posa in opera corretta.

Summary. — The Author studied the structure characteristics of the conglomerate of expanded polystyrol — which are largely employed for thermic insulation — and outlined their affinity with selfexpanded and selfdressed cork in consequence of similar working proceedings.

The Author demonstrates that many physical properties of expanded polystyrol and the consequent proceedings for correct installation depend on the structure characteristics of this material.

1) GENERALITA'.

Lo sviluppo impetuoso della Tecnica del Freddo negli ultimi decenni ha determinato un crescente fabbisogno di isolanti termici, e, di conseguenza, ha indirizzato numerosi Studiosi alla ricerca assidua di nuovi materiali atti alla protezione dal calore. Gli anni successivi alla prima guerra mondiale, ma soprattutto il recente periodo post-bellico, ci hanno posto dinnanzi ad una fioritura di nuovi coibenti dalle origini più disparate ma aventi in comune — salvo poche eccezioni — una caratteristica e precisamente quella riguardante la loro struttura che tende artificialmente ad imitare la struttura cellulare del sughero.

Già pochi anni dopo la prima guerra mondiale l'U.R.S.S., sprovvista di sughero ed allora praticamente esclusa dalle correnti internazionali di traffico, perfezionò talmente la tecnica di preparazione delle malte cementizie aerate da poterle impiegare per l'isolamento termico di buona parte dei suoi impianti frigoriferi. In altri Paesi, invece, il continuo affermarsi delle materie plastiche aveva attirato l'attenzione su queste ultime e si era quindi iniziata la messa a punto di numerosi procedi-

menti di espansione o di schiumaggio delle medesime, sì da trasformare la loro struttura da compatta a cellulare. Queste ricerche proseguono oggi a ritmo accelerato di pari passo con la sintesi e con la diffusione di nuove materie plastiche. Molti dei nuovi isolanti hanno riscosso un successo più o meno rilevante, altri hanno fatto solo una brève apparizione; in sostanza, tutto fa ritenere che, nel campo della coibentazione delle apparecchiature frigorifere, ci si trovi in un vero e proprio periodo di transizione.

Tra gli isolanti cellulari più recenti, possiamo citare, tra gli altri:

a) *di origine organica*

- schiume di resine epossidiche (Epikote o Araldit)
- schiume di siliconi
- schiume di resine fenoliche
- schiume di poliuretano
- schiuma di urea trattata alla formaldeide (iporka)
- schiume di acetati di cellulosa
- schiume di cloruro di polivinile
- polistirolo autoespanso autocollato

b) *di origine inorganica*

- schiuma di vetro (foamglas)
- aerogel di silice
- vermiculite
- perlite.

* * *

Uno dei nuovi isolanti termici che ha incontrato un indiscusso favore è il polistirolo autoespanso autocollato, più brevemente detto polistirolo espanso, la cui struttura fisica nonchè i procedimenti di preparazione presentano notevoli affinità con quelli del sughero autoespanso autocollato. Per meglio chiarire le cose, diamo un breve cenno sui conglomerati di sughero autoespanso autocollato.

Il sughero è costituito nella maggior parte nei paesi che si affacciano sul Mediterraneo oltre che nel Portogallo (che è il più forte produttore europeo) dalla corteccia della quercia da sughero (*Quercus Suber*) che raggiunge spessori di 10 cm; nella Nuova Caledonia, dalla corteccia del Niaouli (*Malaleuca Leucodendron*) che raggiunge spessori di ben 15 cm.

Nei riguardi della quercia da sughero, si procede nel mondo seguen-

te: si asporta dalla pianta giovane la prima scorza, costituita da un materiale bruno, piuttosto consistente e bucherellato detto « sughero primario » o anche sughero maschio o sugherone, mettendo così a nudo lo strato produttivo di color rosso sangue virante al bruno; questo strato dà origine al « sughero secondario » o sughero femmina che viene staccato dalla pianta in primavera ogni $6 \div 12$ anni ⁽¹⁾. Il sughero secondario è più chiaro, più soffice e più leggero del sughero primario, ed inol-

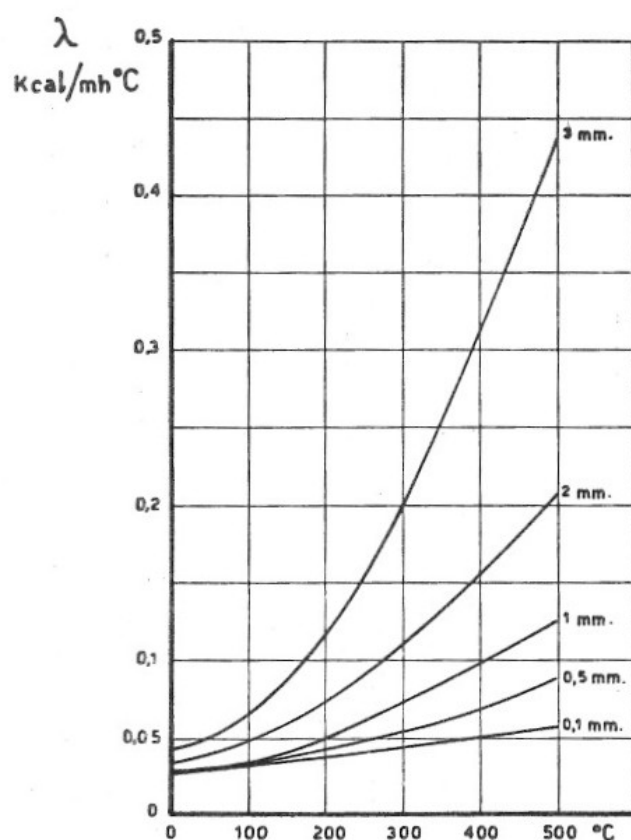


Fig. 1. - Conduttività dell'aria imprigionata entro alveoli, in funzione della temperatura.

tre si presta alla confezione di una quantità di prodotti, tra i quali gli isolanti termici. Esso è caratterizzato da una struttura cellulare con cellule a forma poliedrica normalmente in numero di circa 12.000.000 per cm^3 ⁽²⁾, ma raggiungente talvolta anche 30.000.000 per cm^3 ⁽³⁾. Pertanto l'aria si trova imprigionata entro alveoli del diametro compreso tra $4,6 \times 10^{-2}$ mm e 3×10^{-2} mm. In tali condizioni i moti convettivi dell'aria vengono fortemente frenati e quindi la conducibilità termica varia di poco al variare della temperatura, come è indicato nella figura 1 ⁽⁴⁾. Per tale ragione, il coefficiente di conduttività del sughero e dei suoi conglomerati è, in relazione alle temperature di esercizio, tra i meno variabili.

Il sughero naturale contiene resine e materie volatili di cui si appro-

fitta per la confezione di derivati, e, in primo luogo dell'autoespanso autocollato. Questo, sommariamente, viene preparato triturando minutamente il sughero e sottoponendo il granulato all'azione del calore o entro forni di torrefazione o, più recentemente, entro autoclavi a vapore. Le resine formano così un « essudato » che, col raffreddamento, cementa i granuli fra di loro, mentre, d'altra parte, le materie volatili vaporizzano espandendosi e dilatando leggermente gli alveoli. Col procedimento a vapore, esse vengono asportate e quindi, nella fase di raffreddamento, non ricondensano nel conglomerato.

Si ottengono così dei pani di sughero autoespanso autocollato che vengono segati e trasformati in lastre. In sostanza, il processo si può riassumere schematicamente nel seguente modo:

- preparazione del granulato;
- espansione;
- cementazione.

A questo punto è bene osservare come sia entrata nell'uso comune la distinzione tra i coibenti in *isolanti cellulari* ed *isolanti fibrosi*; ci sembra però opportuna, tra gli isolanti cellulari, l'ulteriore suddivisione in *isolanti cellulari a struttura granulare* (a grani cementati) e *isolanti cellulari a struttura omogenea*. Il sughero ed anche, come vedremo, il polistirolo, dovrebbero far parte della prima categoria che presenta differenze sostanziali con la seconda; infatti, mentre le « schiume » sono costituite da una massa cellulare omogenea, qui la struttura è discontinua, a granelli saldati tra di loro e le zone di saldatura costituiscono — se imperfette — altrettanti punti deboli per la penetrazione del vapore e dell'acqua.

Questo difetto, se così si può chiamare, è caratteristico del sughero e del polistirolo che anche qui presentano forti affinità in virtù delle quali si può asserire che il polistirolo autoespanso autocollato può considerarsi, sotto molti aspetti, un vero e proprio sughero artificiale.

2) IL POLISTIROLO ESPANSO.

Il polistirolo o polistirene è un polimero dello stirolo o stirene, prodotto naturale contenuto nel balsamo « storace » che si estrae dal *Liquidambar Orientalis*, pianta originaria dell'Asia Minore. Il monomero, liquido incolore e di odore gradevole che bolle a $142,5^{\circ}\text{C}$ ed ha un peso molecolare 104, tende a polimerizzare lentamente sotto l'azione della luce, fenomeno questo noto sin dal 1839 e scoperto dal Simon. Lo stirolo venne ottenuto per la prima volta artificialmente dal Berthelot nel 1869, partendo dall'etilbenzolo ed oggi viene prodotto su vasta scala per sinte-

si dell'etilene e del benzolo in presenza di catalizzatori come il cloruro di alluminio.

Il fenomeno della polimerizzazione è stato utilizzato dalla tecnica solo in epoca recente; esso avviene in maniera assai rapida e con l'ausilio di catalizzatori ovvero con procedimenti termici, e la reazione è accompagnata da un forte sviluppo di calore conseguente all'apertura del doppio legame etilenico. Il peso molecolare passa dal valore 104 del monomero a un valore prossimo a 100.000 per il polimero, mentre le proprietà generali variano in quanto si passa da un liquido aromatico ad un polimero amorfo, estremamente viscoso, duro ed atossico di elevato peso molecolare ⁽⁵⁾.

Il polistirolo ha le seguenti proprietà fisiche ⁽⁵⁾:

peso specifico	kg/litro	1,95 ÷ 1,06
resistenza alla trazione	kg/cm ²	400 ÷ 500
allungamento a rottura	%	1 ÷ 2
resistenza alla compressione	kg/cm ²	800 ÷ 1000
resistenza Izod (senza intaglio)	kg/cm	10 ÷ 15
durezza Rockwell	scala M	65 ÷ 80
costante dielettrica (da 60 a 10 Hz)		2,45 ÷ 2,65
resistività	ohm/cm	10 ¹⁷ ÷ 10 ¹⁹
resistenza all'arco	sec	70 ÷ 135
trasmissione della luce	%	88 ÷ 93
indice di rifrazione		1,59 ÷ 1,60
temperatura di distorsione	°C	75 ÷ 85
coefficiente di dilatazione lin.	cm/cm/°C	6 ÷ 8x10 ⁻⁵
calore specifico	kcal/kg°C	0,32
assorbimento acqua in 24 h	%	0,03 ÷ 0,04
permeabilità al vapore	g/cm/hmm Hg	3.3x10 ⁻⁸
effetto della luce solare		debo'e Ingiallim.
infiammabilità	mm	1,8 ÷ 2,5
sostanze volatili	%	0,5

Molte di queste qualità si ripercuotono favorevolmente negli espansi.

Così come abbiamo visto per i conglomerati autoespansi di sughero, anche nel caso del polistirolo la materia prima viene suddivisa in granuli di forma sferica o poliedrica irregolare che vengono sottoposti ad un trattamento termico preliminare durante il quale avviene la « preespansione »; senonchè, mentre nel caso del sughero questa era dovuta alla presenza di materie volatili naturalmente contenute nella corteccia secondaria, nel caso del polistirolo la materia prima viene preventivamente mescolata a particolari « agenti rigonfianti » che sono dei solventi del polistirolo, come benzolo, toluolo, ecc. aventi temperature di ebollizione non molto distanti da quella dell'acqua alla pressione atmosferica (benzolo 80°C, toluolo 110°C), ovvero a sali volatili (es. sali di ammonio) alle stesse temperature.

La particolare natura dei solventi ha dato origine a numerosi brevetti, inizialmente negli U.S.A. ad opera della « The Dow Chemical Co. » di Midland nel Michigan e quindi nella Germania Occidentale ad opera della « Badische Anilin & Soda Fabrik » di Ludwigshafen am Rhein.

Sottoponendo i granuli all'azione del calore, vuoi per mezzo di acqua calda, vuoi per mezzo di vapore o di aria calda, avvengono contemporaneamente due fenomeni e, precisamente, il rammollimento del polistirolo che assume una consistenza plastica e l'evaporazione del solvente o del sale, accompagnata ovviamente da un forte aumento di volume a causa del cambiamento di stato dell'agente rigonfiante. I vapori del solvente rigonfiano i granelli del polistirolo, trasformandone la struttura da compatta a cellulare.

Col raffreddamento le membrane che costituiscono le pareti degli alveoli o cellule si induriscono ed il granello di polistirolo si trasforma in un grano di dimensioni molto più grandi di quelle dell'originale.

Un successivo trattamento termico ad acqua calda o a vapore consente l'autocementazione dei granuli espansi per parziale fusione e conseguente autocollaggio delle membrane esterne, e si ottengono così per raffreddamento blocchi o pani che vengono segati in lastre di vario spessore.

Il polistirolo autoespanso autocollato fece per la prima volta la sua apparizione nel 1937 ⁽⁶⁾ negli U.S.A., ma il suo successo impetuoso ebbe inizio nell'immediato dopoguerra; in Europa, la produzione del polistirolo espanso si iniziò nel 1950, quando i Laboratori di ricerca della BASF misero a punto particolari solventi atti ad ottenere una buona mescolazione con la materia prima ed una favorevole preespansione. Oggi il granulato espandibile viene prodotto in quattro differenti qualità, e precisamente ⁽⁷⁾:

— polistirolo «P»: è la varietà più diffusa per la confezione degli autoespansi atti all'isolamento termico, e si presenta sotto forma di gra-

nelli sferoidali aventi diametri compresi tra 4 e 6 mm, con un peso specifico reale di 1010 kg/m^3 ed un peso specifico apparente compreso tra 350 e 650 kg/m^3 . E' combustibile; resiste all'azione del calore sino alla temperatura massima di 75°C ;

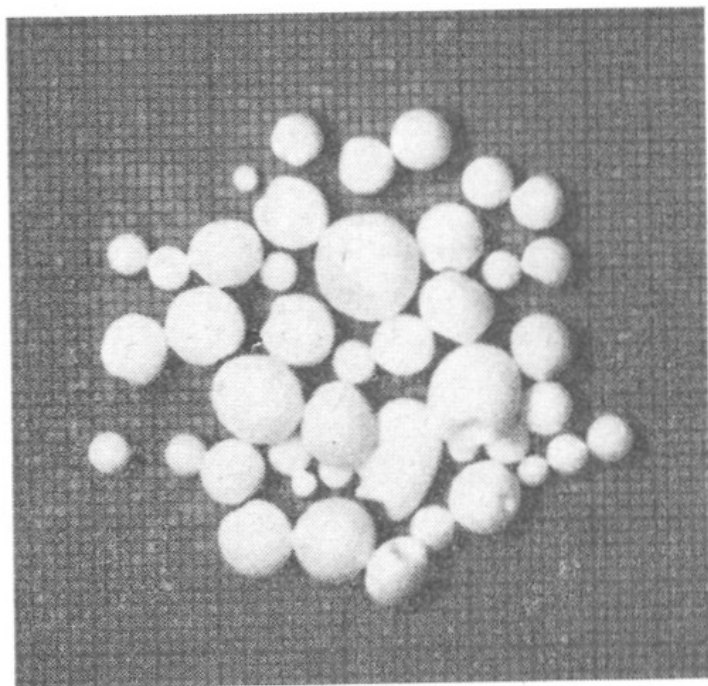


Fig. 2. - Granuli sferoidali di polistirolo «P» non espanso.

— polistirolo «K»: si presenta sotto forma di granelli poliedrici irregolari nella forma e nelle dimensioni, e con lo stesso peso specifico reale della qualità precedente. Il peso specifico apparente, causa la scabrezza dei grani, è lievemente inferiore essendo compreso tra 500 e 600 kg/m^3 . Una volta questa varietà veniva usata per la preparazione degli isolanti termici, ma adesso il suo uso è diretto verso la preparazione di oggetti decorativi, pannelli, sculture, ecc. Il polistirolo «K» differisce da quello «P» solo per la forma dei granelli, rimanendo inalterate le altre proprietà;

— polistirolo «F»: si presenta come il polistirolo «P» ed ha lo stesso peso specifico apparente, mentre quello reale è di 1100 kg/m^3 . E' assai poco infiammabile e non arde con fiamma propria. Si presta alla preparazione di autoespansi classificati come «difficilmente infiammabili». Resiste al calore sino alla temperatura di 75°C ;

— polistirolo «H»: si presenta sotto forma di granuli sferici, come le varietà «P» e «F», ma ha un peso specifico reale di 1050 kg/m^3 e lo stesso peso specifico apparente. E' combustibile e sopporta l'azione del calore fino alla temperatura di 95°C . Resiste all'azione solvente degli olii

	" P "	" K "	" F "	" H "
acqua	+	+	+	+
acqua di mare	+	+	+	+
acido cloridrico 18%	+	+	+	+
» cloridrico 36%	+	+	+	+
» solforico dal 48 al 95%	+	+	+	—
» fosforico al 50%	+	+	+	—
» fosforico al 90%	+	+	+	—
» fluoridrico al 25%	+	+	+	—
» nitrico al 34%	+	+	+	+
» nitrico al 68%	+	+	+	—
» formico al 40%	+	+	+	+
» formico all'80%	+	+	+	—
» acetico al 30%	+	+	+	+
» acetico al 70%	+	+	+	—
idrossido di sodio dal 20 al 40%	+	+	+	+
idrossido di potassio dal 25 al 50%	+	+	+	+
soluzione ammoniacale al 25%	+	+	+	+
alcool metilico	+	+	+	—
» etilico	+	+	+	+
» propilico	+	+	+	—
acetone	—	—	—	—
estere acetico	—	—	—	—
idrocarburi clorurati	—	—	—	—
benzina	—	—	—	—
oli minerali	—	—	—	+
oli vegetali	—	—	—	—
oli animali	—	—	—	—
tetracloruro di carbonio	—	—	—	—
essenza di trementina	—	—	—	—
benzolo	—	—	—	—
etere	—	—	—	—
miscele di carburanti minerali	—	—	—	+
+ comportamento stabile .				
— » instabile (cede, si scioglie o si distrugge)				

minerali e della gasolina e si presta per la confezione di oggetti d'uso nautico, salvagenti, ecc.; inoltre, per la sua maggior resistenza all'azione del calore, viene adoperato per la coibentazione di parti sottoposte a temperature notevoli, come superfici soleggiate, depositi e tubazioni di acqua calda, ecc.

Il polistirolo espanso presenta in genere una buona resistenza all'azione aggressiva di numerosi prodotti chimici, come si desume dalla tavola precedente (°):

3) CENNO SULLA PREPARAZIONE DEGLI AUTOESPANSI AUTOCOLLATI.

Come è stato accennato, i procedimenti per la espansione e la cementazione dei granuli di polistirolo sono assai simili a quelli in uso per i conglomerati di sughero; in sostanza si tratta di attuare il rigonfiamento dei granuli e quindi di cementarli tra di loro. Ora, mentre nel sughero l'autoespansione fa leggermente aumentare la grandezza delle cellule esistenti, nella preespansione del polistirolo avviene invece una vera e propria trasformazione della struttura del granello che da compatta diviene cellulare. In sostanza, durante questo processo avviene la formazione degli alveoli, i quali sono estremamente suddivisi e di piccole dimensioni poichè l'agente rigonfiante è uniformemente disperso nel polistirolo.

Per il polistirolo, dunque, troviamo due operazioni distinte e, precisamente, la preespansione e la cementazione, mentre per il sughero le due operazioni sono pressochè coincidenti.

La preespansione può essere effettuata con procedimenti termici differenti e, precisamente, in acqua calda, in atmosfera di vapore e, infine, in aria calda, come riassunto nello specchietto seguente (7):

Qualità	Procedimento di preespansione		
	acqua calda	vapore	aria calda
polistirolo «P»	possibile	possibile	possibile
» «K»	»	»	»
» «F»	impossibile	necessario	»
» «H»	possibile	possibile	

In tutti e tre i procedimenti il grado della preespansione dipende, oltre che dalla temperatura, dalla durata dell'operazione e i fenomeni che si svolgono possono essere così riassunti: rammollimento del materiale; evaporazione del solvente; formazione nella massa di numerose cellule e conseguente rigonfiamento del granello con trasformazione della sua struttura da compatta a cellulare.

La formazione degli alveoli è accompagnata dal sorgere di tensioni interne nelle sottili membrane di polistirolo che ne costituiscono gli involucri.

Ora, se la fase di preespansione dura più del tempo necessario a raggiungere un determinato peso specifico, si ha in un primo tempo la continuazione del processo di rigonfiamento ma in un secondo tempo, per effetto del crescere delle tensioni interne, le membrane possono « scoppiare ». Avviene più o meno lo stesso fatto che si verifica gonfiando eccessivamente un palloncino di vetro portato al color rosso il quale scoppia mantenendo pressochè inalterate le dimensioni esterne; in corrispondenza al punto dove è avvenuto lo scoppio l'involucro si accartoccia e il materiale ai bordi della ferita si ingrossa.

Anche nel polistirolo le membrane, dopo lo « scoppio » si comportano in modo simile al vetro, e quindi, per effetto del raffreddamento, si induriscono dando luogo a granuli espansi di polistirolo aventi lo stesso peso specifico apparente della qualità « sana » e, per di più, un aspetto forse più soddisfacente che trae spesso in inganno; il polistirolo « scoppiato » presenta il grave inconveniente rappresentato dalla formazione di canali capillari permeabili all'acqua ed al vapore, a seguito della rottura delle pareti delle cellule.

Il fenomeno è difficilmente apprezzabile ad occhio nudo e per metterlo in evidenza è necessario ricorrere ad indagini di laboratorio complesse e di varia natura; in sostanza, ci si deve affidare alla serietà ed al credito delle ditte fornitrici, e comunque si deve resistere agli allettamenti delle varietà con pesi specifici inferiori a 15 kg/m^3 .

Anche la errata espansione del granulato di sughero può portare ad inconvenienti simili dovuti, ad esempio, all'arrostimento eccessivo dei granuli nei procedimenti a torrefazione, con la conseguenza dell'indurimento e della successiva rottura delle membrane delle cellule e quindi anche qui si può riscontrare una notevole affinità tra sughero e polistirolo.

I procedimenti più usati per la preespansione dei granuli di polistirolo sono quelli con acqua calda e con vapore; il metodo con acqua calda si presta per ottenere varietà più pesanti, quello con vapore per le varietà più leggere. Per riassumere, si ha (7):

1) procedimento ad acqua calda.

Il granulato viene agitato per $3 \div 5$ minuti primi in acqua calda, dopo di che la temperatura del bagno viene leggermente innalzata per accelerare l'espansione. Poichè il peso specifico dell'espanso dipende

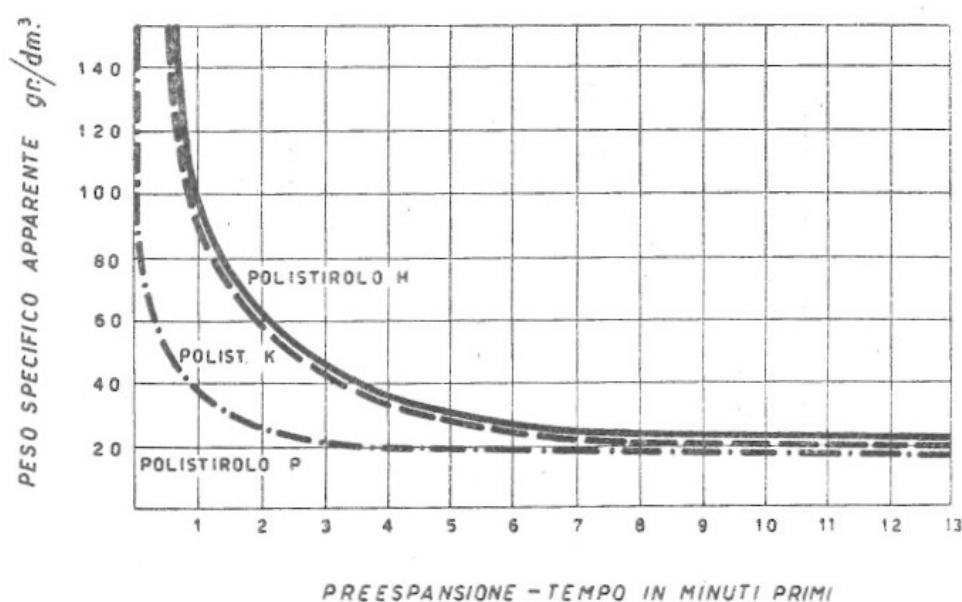


Fig. 3.° - Diagramma pesi specifici apparenti - Tempi per la preespansione in acqua calda.

dalla durata dell'operazione, è possibile, come si comprende dalla fig. 3, stabilirlo in anticipo;

2) procedimento a vapore:

Il granulato viene introdotto entro un apposito recipiente dove viene immesso vapore in un primo tempo ad una certa temperatura ed in un secondo tempo a temperatura più elevata, così come avveniva nel caso precedente. Si può, ancora, effettuare la preespansione in un solo tempo, introducendo per brevi istanti nel recipiente vapore a una temperatura più elevata che nel caso precedente. Questo secondo procedimento dà risultati analoghi ed ha il vantaggio di essere più rapido. Variando

la durata del trattamento e la pressione del vapore, si ottengono autoespansi della densità voluta, come indicato nel diagramma della fig. 4;

3) procedimento ad aria calda.

E' simile a quello con il vapor d'acqua, senonchè questo viene sostituito da aria calda. I corpi espansi hanno una scorza più dura, chiu-

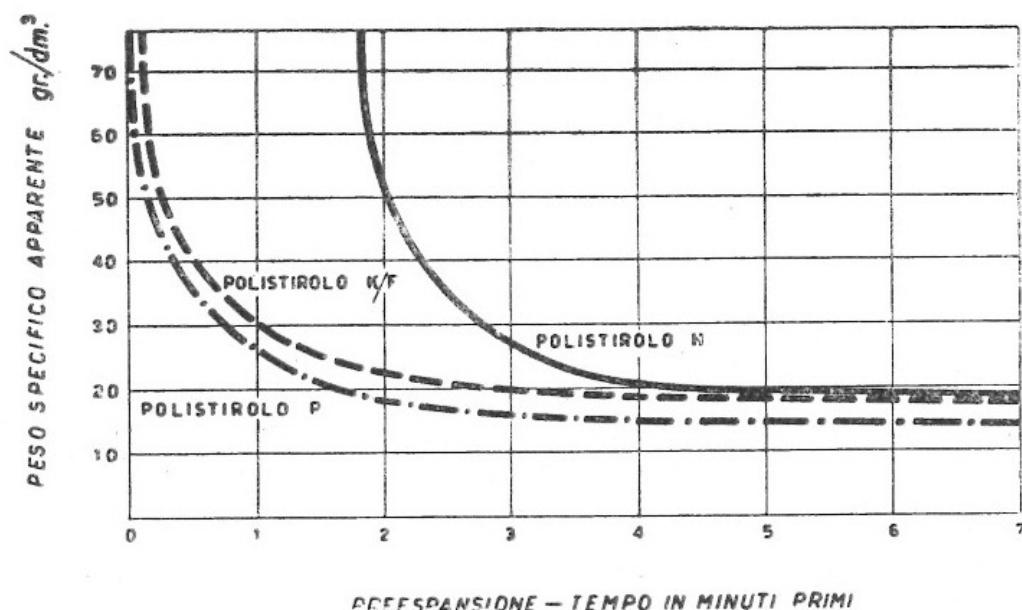


Fig. 4. - Diagramma pesi specifici apparenti - Tempi, per la preespansione a vapore.

sa e leggermente vitrea. Questo procedimento è meno usato dei precedenti.

* * *

Ottenuta la preespansione, il granulato preespanso deve stagionare per un certo tempo prima di essere sottoposto ancora una volta all'azione del calore per la cementazione.

Al termine della stagionatura viene introdotto entro stampi metallici a pareti forate e quindi trattato con acqua calda ovvero sottoposto per breve tempo all'azione del vapor d'acqua. Questo ultimo procedimento è chiamato, per la sua brevità, procedimento a « colpo di vapore ».

In questa fase finale, comunque essa venga realizzata, si ha una ulteriore espansione del granulato, ma, soprattutto, data la rapidità del

processo, i granuli si riscaldano specialmente in superficie e si saldano fortemente tra di loro dando origine, dopo il raffreddamento, ad una massa solida, compatta e sonora che può venire segata o scolpita.

Importanza riveste, in questa fase, la pressione finale all'interno dello stampo dovuta alla quantità di materiale introdotto in relazione ai pesi specifici finali del conglomerato. In particolare, per il polistirolo «P» che è il più usato per l'isolamento termico, si ha ⁽⁸⁾:

pesi specifici Kg/dm ³	pressioni all'interno dello stampo Kg/cm ²
0,02	0,6 ÷ 0,8
0,03	0,7 ÷ 0,9
0,05	0,8 ÷ 1,0
0,1	1,0 ÷ 1,3
0,15	1,4 ÷ 1,6
0,20	1,8 ÷ 2,0
0,30	2,5 ÷ 2,8

La cementazione dei granelli di sughero avviene invece, come si è detto, per condensazione delle resine alla superficie dei granuli durante la fase di raffreddamento.

Tuttavia, in entrambi i casi, il processo di cementazione può dar luogo ad inconvenienti dovuti all'incompleto riempimento degli stampi e quindi alla presenza di cavità tra granello e granello con la conseguente formazione di vie aperte al passaggio di acqua o di vapore. Si può concludere che anche nella fase di cementazione le analogie tra sughero e polistirolo sono assai notevoli e gli inconvenienti che si possono verificare a causa di deficienze nella lavorazione sono del tutto simili per i due materiali, che si dimostrano strettamente imparentati tra loro.

Nella tavola seguente vengono riassunte le varie operazioni inerenti la confezione degli autoespansi autocollati di polistirolo ⁽⁷⁾.

i = impossible

4) PROPRIETÀ FISICHE DEGLI AUTOESPANSI AUTOCOLLATI DI POLISTIROLO.

a) *conducibilità, calore specifico e diffusività.*

Il polistirolo è un corpo a struttura cellulare con alveoli; le dimensioni degli alveoli sono molto variabili da qualità a qualità in quanto esse dipendono dai processi usati per la preespansione e, in primo luogo, dalla durata di questa operazione. Le qualità più leggere hanno cellule « grandi », le più pesanti — che possono raggiungere i 300 kg/m^3 — hanno alveoli di dimensioni più piccole; poichè i moti convettivi dell'aria imprigionata sono tanto più vivaci quanto più grandi sono gli alveoli (fig. 1), la conduttività delle varietà più leggere di polistirolo cresce fortemente al crescere della temperatura, mentre la conduttività delle qualità più pesanti cresce molto più lentamente, caratteristiche, queste, comuni a tutti gli isolanti cellulari.

In generale la conduttività, alla temperatura ambiente, di un buon polistirolo è alquanto inferiore a quella di un buon sughero espanso, ma si tratta di differenze non molto forti; ad esempio, si possono avere con un ottimo polistirolo conduttività a 0°C dell'ordine di $0,024 \div 0,026 \text{ Kcal/m}^\circ\text{Ch}$ contro $0,027 \div 0,028 \text{ Kcal/m}^\circ\text{Ch}$ per un buon sughero. Tuttavia, quando il salto di temperatura tra le due facce del materiale è elevato, è opportuno immaginare l'isolante come suddiviso in strati a temperatura progressivamente crescente, man mano che ci si sposta dalla faccia fredda a quella calda; conseguentemente, si dovrà tener conto, per quanto si è detto, del graduale aumento della conduttività al crescere della temperatura nella valutazione preventiva del coefficiente di conduttività.

Generalmente si adoperano varietà di polistirolo aventi pesi specifici di 15 e di 20 kg/m^3 e quindi, a causa della conseguente bassa capacità termica, esse sono molto adatte nel caso di installazioni soggette a variazioni rapide di temperatura ovvero richiedenti un tempo di avviamento molto breve. Sotto questi aspetti ed entro un intervallo di temperatura esteso sino a -100°C , il polistirolo si è dimostrato un isolante eccellente anche senza particolari protezioni esterne ⁽¹⁰⁾. Si tenga presente che negli impianti di refrigerazione o di congelamento in cui il volano termico è costituito prevalentemente dal carico, la capacità termica del materiale isolante non riveste una particolare importanza.

La scelta della qualità di polistirolo va fatta in relazione all'impiego ed al costo, che cresce rapidamente con la densità. Per quanto si è detto, le qualità del peso di 15 kg/m^3 vanno usate con attenzione, ed i materiali del genere debbono essere acquistati presso fabbricanti in grado di offrire serie garanzie sull'accuratezza dei procedimenti di fabbricazione, che esigono un controllo rigoroso e costante. Fare conglomerati

di polistirolo autocollato autoespanso è ormai facile, ma farli bene richiede una buona attrezzatura di strumenti di controllo e di regolazione ed una scrupolosità a tutta prova.

La conduttività del polistirolo è, come si è visto, intimamente legata al diametro medio delle cellule e cresce fortemente al crescere della temperatura per le varietà molto espanse e cioè con cellule di diametro relativamente grande; per questa ragione, le qualità più leggere sono ca-

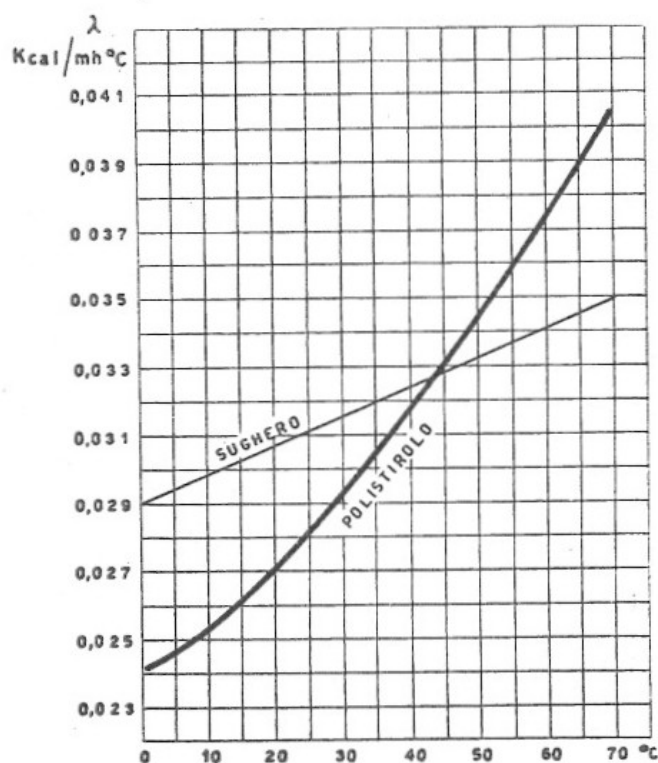


Fig. 5. - Variazione della conduttività del polistirolo ($15 \div 20 \text{ kg/m}^3$) e del sughero autoespansi autocollati in funzione della temperatura.

ratterizzate da una variabilità notevole della conduttività, come appare evidente dal diagramma della fig. 5 dove questa è espressa in funzione delle temperature ⁽¹¹⁾.

Nel diagramma è riportata anche la variazione della conduttività del sughero autoespanso autocollato di densità compresa tra 90 e 100 Kg/m^3 ; come si vede, inizialmente la conduttività del sughero è superiore a quella del polistirolo, ma essa cresce meno rapidamente al crescere della temperatura a causa delle minori dimensioni delle cellule. Allo « Stryfoam » gli americani attribuiscono una conduttività a 4°C di $0,028 \text{ Kcal/m}^\circ\text{Ch}$ per le qualità da 26 kg/m^3 ⁽¹²⁾; in generale, noti il peso specifico del materiale-supporto, la natura dell'aeriforme occluso nelle cellule e la dimensione media delle stesse, è possibile calcolare con una buona appros-

simazione la conduttività con l'aiuto del diagramma della fig. 1 e della formula di ODELEVSKY ⁽¹³⁾ o di quella di RUSSELT ⁽¹⁴⁾. Per la prima si ha:

$$\lambda = \lambda_1 \left(1 + \frac{v_2}{3} + \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} \right)$$

dove λ_1 , λ_2 e v_2 sono rispettivamente la conduttività della fase solida e la conduttività ed il volume della fase gassosa, cioè del polistirolo e dell'aria. Si trascura, di fronte a v_2 , il volume della fase solida, cioè del polistirolo.

I valori che si ottengono con la formula di Odelevsky si scostano, rispetto a quelli sperimentali, nella misura del 4%.

Secondo la formula di Russelt si ha:

$$\lambda = \frac{P^{2/3} + \frac{\lambda_1}{\lambda_2} (1 - P^{2/3})}{P^{2/3} - P + \frac{\lambda_1}{\lambda_2} (1 - P^{2/3} + P)} \lambda_1$$

nella quale P è la « porosità » (volume dei pori) del materiale che, per le varietà più leggere può, con buona approssimazione, considerarsi uguale al volume v_2 della fase gassosa.

Accurate esperienze eseguite da LEVIN e VOLMIR ⁽¹³⁾ hanno attribuito al polistirolo espanso un calore specifico $c = 0,326$ Kcal/kg°C; pertanto, la diffusività termica del materiale

$$\left(a = \frac{\lambda}{c \gamma} \text{ (m}^2/\text{h)} \right)$$

varia sia a seconda del peso che della conduttività. Ammettendo per quest'ultima un valore medio di 0,028 Kcal/m°C alla temperatura di 25°C, si hanno, rispettivamente per le varietà da 15 e da 20 kg/m³, i valori 0,00372 e 0,00429 m²/h contro 0,00066 m²/h per il sughero da 95 kg/m³ (calore specifico 0,49 Kcal/Kg°C). In sostanza, quando l'isolante è sottoposto a variazioni notevoli di temperatura e la capacità termica del sistema da refrigerare è trascurabile, è opportuno ricorrere ai polistiroli più « pesanti » se si vogliono evitare frequenti arresti ed inserzioni delle apparecchiature frigorifere.

Pertanto si può concludere che, dal punto di vista della conduttività termica, il polistirolo autoespanso autocollato di peso corrente tra i 15

ed i 25 kg/m^3 è un po' migliore del sughero autoespanso autocollato; dal punto di vista della diffusività, invece, i polistiroli più correnti si trovano alquanto in svantaggio rispetto al sughero e pertanto, là dove è necessario che l'isolante abbia una diffusività piccola è opportuno ricorrere o al sughero ovvero alle varietà di polistirolo aventi densità più elevate. Conseguentemente, nelle installazioni dove è richiesta una piccola inerzia termica il polistirolo è nettamente superiore al sughero, mentre in quelle che affidano all'isolante una grande inerzia sono più efficaci i materiali pesanti, come il sughero ovvero come le varietà di polistirolo non inferiori a $20 \div 25 \text{ kg/m}^3$.

b) *Diffusione del vapore; assorbimento di acqua.*

Nei riguardi della diffusione del vapore, sughero e polistirolo si comportano in maniera assai simile a causa delle loro simiglianze strutturali. Se la cementazione tra i granuli è completa e non presenta discontinuità e se la espansione è stata condotta con cura, allora sughero e polistirolo manifestano un comportamento soddisfacente in quanto il manto isolante non presenta soluzioni di continuità. Ma se la cementazione è fatta in maniera grossolana ed il processo di espansione dei granuli è stato spinto sino allo scoppio o all'arrostimento delle membrane, allora, anche nel caso di una buona autocementazione, polistirolo e sughero presentano soluzioni di continuità per la presenza di canali e quindi l'acqua ed il vapore penetrano e si diffondono agevolmente in tutta la massa.

Come è stato più volte sottolineato da insigni studiosi ⁽¹⁵⁾ non è sufficiente fare affidamento sulla « barriera contro il vapore » quale esclusiva difesa dalla migrazione di umidità, ma è bene che lo stesso materiale isolante sia dotato di qualità intrinseche tali da proteggerlo da questa migrazione. Anche sotto tali aspetti un buon sughero ed un buon polistirolo si comportano più o meno allo stesso modo, anzi i polistiroli da 20 kg/m^3 in su presentano una struttura più uniforme di quella del sughero e sono meno permeabili di quest'ultimo sia nei riguardi dell'acqua che del vapore e dei gas in generale. La barriera contro il vapore è tuttavia da considerarsi sempre opportuna in quanto anche l'isolante più perfetto può avere difetti non manifesti ed inoltre le giunzioni tra gli elementi di coibente costituiscono dei punti deboli nei confronti della penetrazione di vapore o di acqua di condensa.

Le esperienze per la determinazione della diffusione del vapore negli isolanti, sono in genere molto complesse e tali comunque da non potersi affrontare con leggerezza. Molti dei metodi oggi usati sono suscettibili

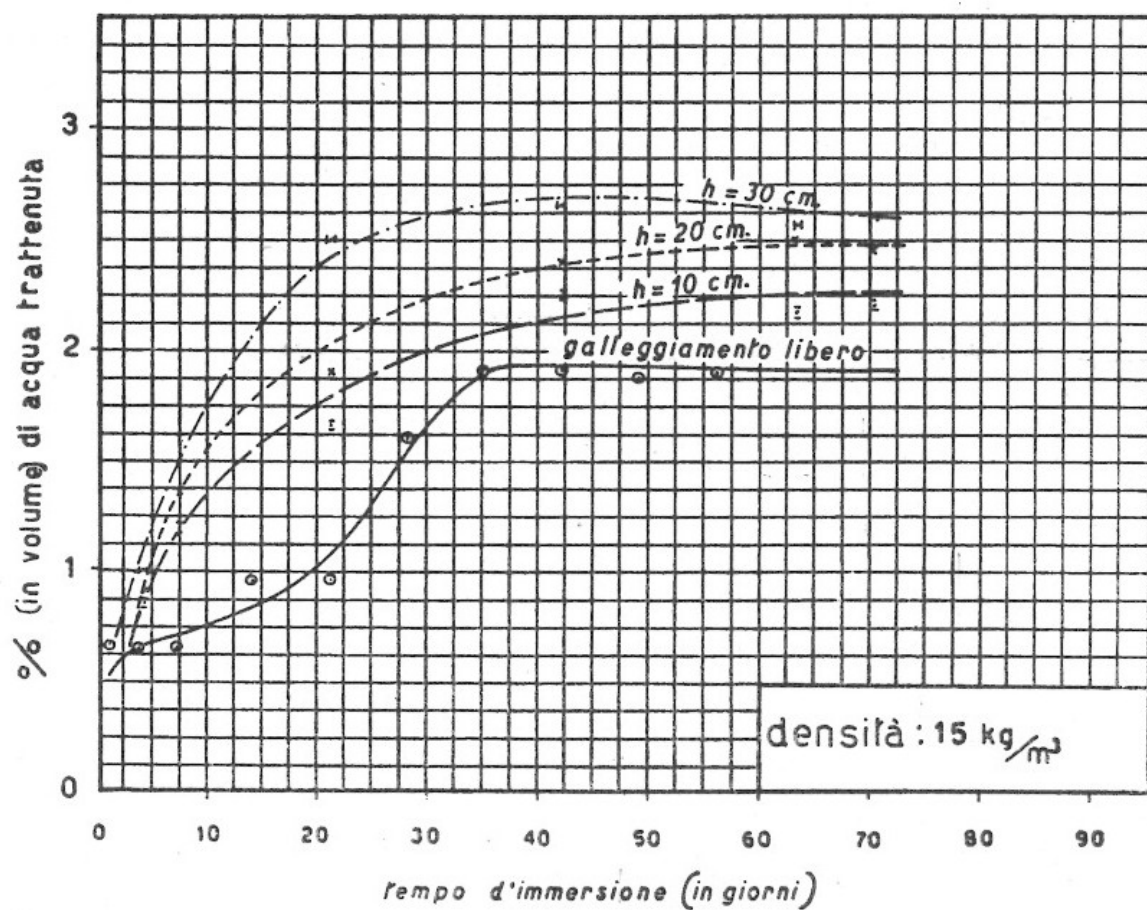


Fig. 6. - Imbibizione per immersione del polistirolo espanso da 15 kg/m^3 .

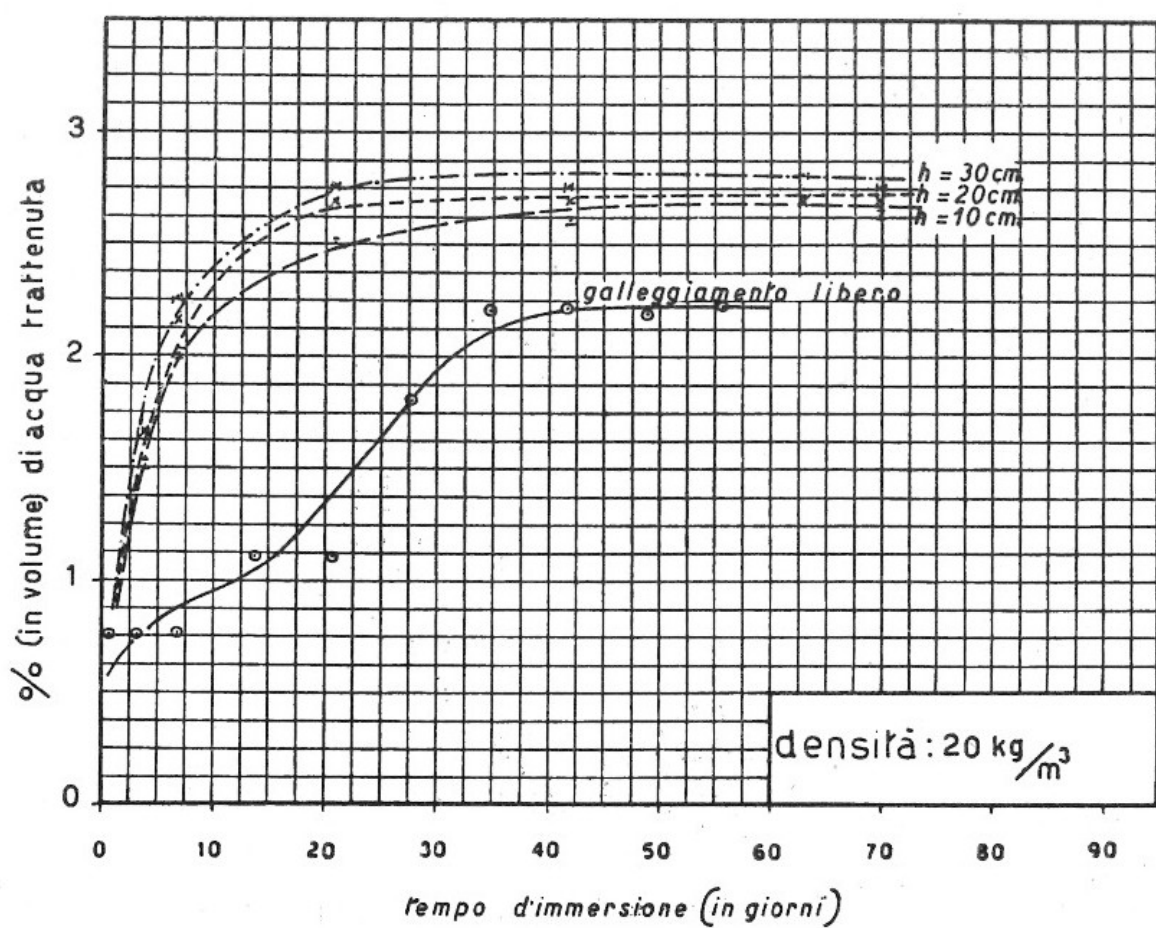


Fig. 7. - Imbibizione per immersione del polistirolo espanso da 20 kg/m^3 .

di critiche e pertanto ci ripromettiamo di tornare sull'argomento in un secondo tempo se saremo confortati dai risultati di ricerche sperimentali in corso.

* * *

Molto è stato scritto sull'assorbimento di acqua da parte del polistirolo autocollato autoespanso; in effetti l'impiego di questo materiale per la costruzione di galleggianti, zattere, salvagenti ed altri equipaggiamenti del genere, dimostra che questo assorbimento non è — s'intende per materiali di buona qualità — preoccupante. Esperienze accurate condotte presso i Laboratori d'Ingegneria dell'Istituto Superiore di Sanità ⁽¹⁶⁾ hanno mostrato (figg. 6 e 7) che esso non supera il 3% in volume con un battente d'acqua di 30 cm, e dopo ben 70 giorni d'immersione; i risultati sono assai prossimi a quelli ottenuti da altri ricercatori ^(17, 18).

Altre esperienze in immersione condotte con soluzioni coloranti ⁽¹⁶⁾ hanno confermato l'importanza della completa cementazione tra i granuli poichè, diversamente, come anche nel caso dei polistiroli « scoppiati » l'acqua ed il vapore trovano agevoli vie di infiltrazione. Di conseguenza aumenta in generale la conduttività e, nel caso di impiego del coibente a temperature inferiori a 0°C, i fenomeni di gelo possono portare alla distruzione dell'isolante.

c) Costante dielettrica.

La costante dielettrica del polistirolo autoespanso autocollato è notevolmente inferiore a quella del materiale compatto e cresce al crescere

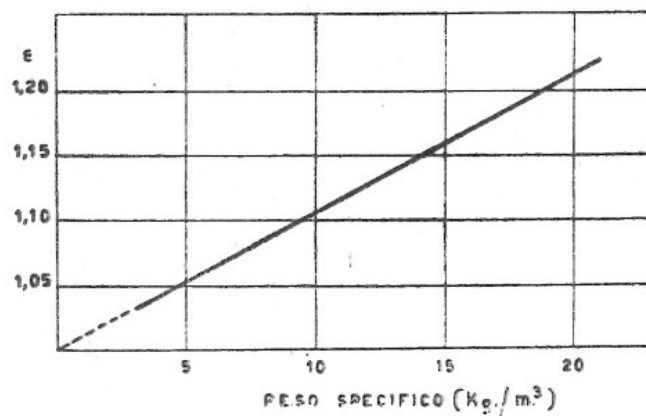


Fig. 8. - Costante dielettrica del polistirolo espanso in funzione del peso.

del peso specifico ⁽¹⁹⁾; ciò appare evidente quando si pensa che più basso è il peso specifico maggiori sono le dimensioni delle cellette d'aria e quindi maggiore è l'influenza della costante dielettrica di quest'ultima che è nettamente inferiore a quella del polistirolo.

d) *Proprietà meccaniche:*

I - RESISTENZA ALLA COMPRESSIONE.

La resistenza alla compressione degli autoespansi autocollati di polistirolo cresce al crescere del peso specifico ⁽¹¹⁾ poichè, con l'aumentare

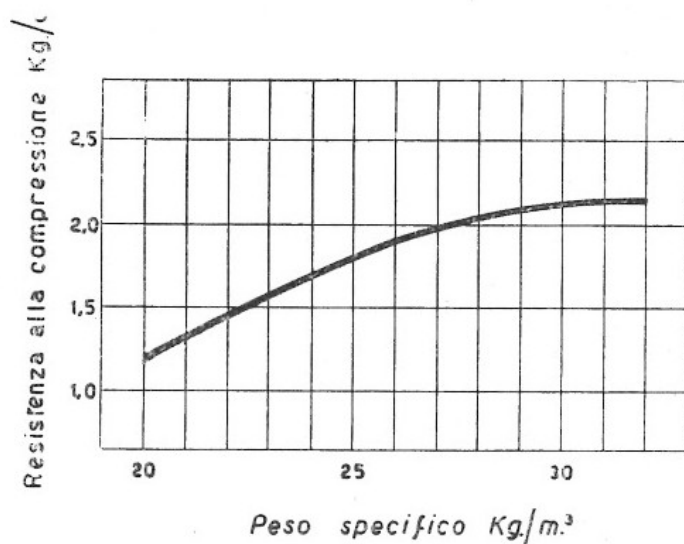


Fig. 9. - Resistenza alla compressione del polistirolo espanso in funzione del peso specifico.

di questo, aumenta nello stesso tempo la quantità del materiale-supporto e diminuisce il diametro delle cellette d'aria. A temperatura ambiente la resistenza alla compressione in funzione del peso specifico viene espressa dal diagramma della fig. 9.

A causa del progressivo rammollimento del polistirolo al crescere

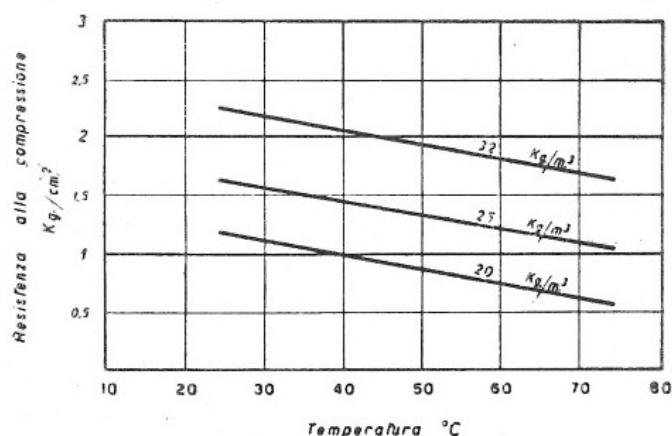


Fig. 10. - Resistenza alla compressione del polistirolo espanso in funzione della temperatura.

della temperatura, la resistenza alla compressione è fortemente influenzata anche dalla temperatura ⁽¹²⁾.

La resistenza alla compressione è tuttavia inferiore a quella del su-

ghero autocollato autoespanso che, normalmente, si aggira attorno a 4 kg/cm^2 e pertanto, quando il polistirolo viene usato per l'isolamento di superfici soggette a carichi — come pavimenti, ecc. — è indispensabile che si prendano precauzioni particolari, ad esempio sovrapponendo al polistirolo solette in calcestruzzo armato, allo scopo di ottenere una buona ripartizione dei carichi.

Con queste cure il polistirolo può essere tranquillamente impiegato anche nel caso di forti carichi come ad esempio quelli dovuti ai carrelli adibiti al trasporto delle merci nei magazzini frigoriferi.

II - RESISTENZA ALLA FLESSIONE ED AL TAGLIO.

La resistenza alla flessione del polistirolo espanso è superiore a quella del sughero che si aggira attorno a $1,4 \text{ kg/cm}^2$ e quindi questa prero-

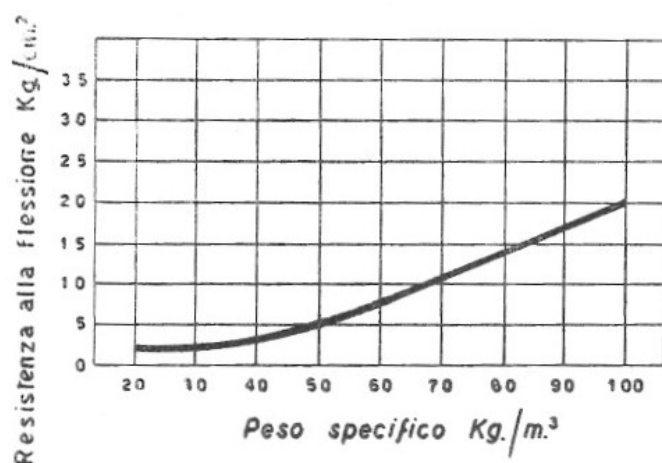


Fig. 11. - Resistenza alla flessione del polistirolo espanso in funzione del peso specifico.

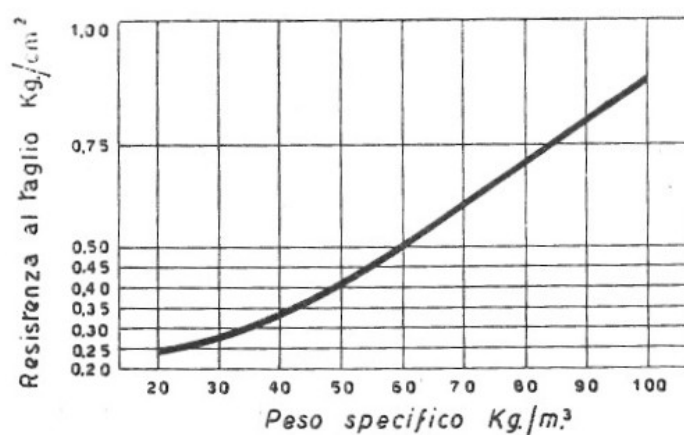


Fig. 12. - Resistenza al taglio del polistirolo espanso in funzione del peso specifico

gativa consente un più facile adattamento a superfici curve; essa cresce al crescere del peso specifico a causa della maggior quantità di polistirolo e delle minori dimensioni delle cellule.

Piccola è la resistenza al taglio, ma essa non riveste particolare importanza in quanto difficilmente il materiale viene sottoposto a sollecitazioni di questo genere ⁽¹¹⁾.

e) *Deformazioni termiche.*

Il polistirolo autocollato autoespanso è suscettibile di allungamenti e di contrazioni in funzione della temperatura, come è stato posto in evidenza da vari sperimentatori ^(20, 21). Ricerche eseguite presso i Laboratori d'Ingegneria dell'Istituto Superiore di Sanità ⁽¹⁶⁾, hanno posto in evidenza che anche le deformazioni lineari sono collegate al peso specifico del materiale ed anzi le varietà più dense sono caratterizzate da deformazioni più piccole.

Operando su diversi materiali si è trovato in media:

Materiale	Densità kg/m ³	Coefficiente medio di dilatazione lineare $\lambda_m = \text{mm/m}^\circ\text{C}$	Campo di temperatura $\Delta t \quad ^\circ\text{C}$
polistirolo esp.	15	0,02639	+ 20 — 20
» »	20	0,02140	+ 20 — 20
» »	50	0,01769	+ 20 — 20
polivinile esp.	24	0,01537	+ 20 — 20
sughero esp.	120	0,01861	+ 17 — 20

Pertanto si dovrà fare attenzione alla posa in opera dei polistiroli più leggeri in quanto non si deve dimenticare che questa operazione avviene a temperatura ambiente, in genere di molti gradi centigradi più elevata di quella di esercizio e, per conseguenza, in difetto di un buon incollaggio del materiale contro le pareti da rivestire, si può avere l'apertura dei giunti a causa delle contrazioni termiche.

5) CONCLUSIONI.

Il polistirolo autoespanso autocollato è un isolante a struttura cellulare con granuli cementati che presenta caratteristiche molto simili a quelle del sughero autoespanso autocollato.

Le qualità « pesanti » di polistirolo danno un ottimo affidamento nei riguardi dell'impiego dell'isolante nel campo del freddo; le varietà

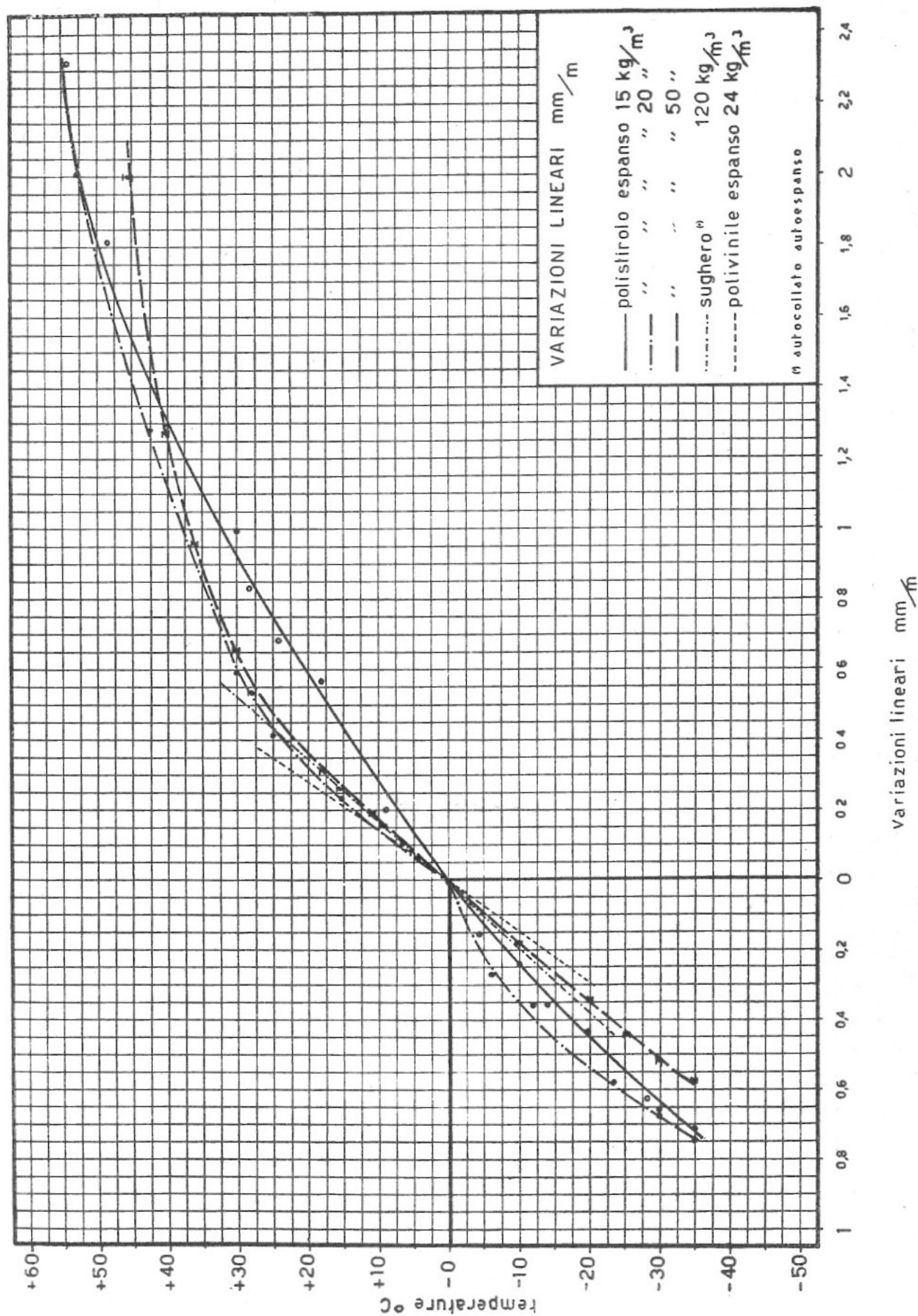


Fig. 13. - Deformazioni lineari di alcuni materiali isolanti in funzione della temperatura.

aventi il peso specifico di 15 kg/m^3 debbono essere considerate un limite al disotto del quale è pericoloso scendere e, comunque, è bene usarle là dove la temperatura ambiente non scende al disotto di 0°C .

La tecnica dei processi di espansione e di cementazione del polistirolo è oggi perfezionata e si può ritenere che il materiale sia già a punto; inoltre, di tanto in tanto, intervengono ulteriori accorgimenti nelle fasi preparatorie, che migliorano le qualità finali del prodotto.

Si può quindi guardare con fiducia al suo impiego nel campo del freddo, usando accorgimenti adeguati durante la posa in opera e servendosi di materiali confezionati da fabbricanti che tengono in conto il rispetto del loro buon nome.

Roma — Istituto Superiore di Sanità - Laboratori di Ingegneria.

BIBLIOGRAFIA

- (1) Mondo verde, Ed. Labor, Milano (1957).
 - (2) LLOYD E. C. - Refrigerating Engineering, Maggio 1937.
 - (3) LISSIA F. - Il Freddo, n. 3 (1960).
 - (4) LAZZERINI R. - Il Calore, (1953).
 - (5) Enciclopedia - Annuario delle materie plastiche, Ed. L'Industria (1958).
 - (6) MIRONNEAU L. - Isolants et technique de l'Isolation, I. B. Baillière et Fils, Paris (1950).
 - (7) Die Verarbeitung von Styropor zu Schaumstoffen, Ed. BASF, B 233 d/5.60.
 - (8) Styropor «P», Ed. BASF, M. 303 f (1959).
 - (9) STASTNY F. e KÖHLING K. - Kunststoffe, 49: 12 (1959).
 - (10) NAGAOKA S. - Proceedings of the Xth International Congress of Refrigeration, Vol. I, Ed. Pergamon Press (1960).
 - (11) Les matériaux cellulaires de Styropor, BASF, B 202 f (1959).
 - (12) Styrofoam, Technical Data. The Dow Chemical Co., Midland, Michigan, PL 516 - 1052.
 - (13) LEVIN G. e VOLMIN V. - Kolodilnaya Technika, n. 1 (1958).
 - (14) RUSSELL H. W. - J. Am. Ceram Soc., 48: 1 (1955).
 - (15) DEL NUNZIO B. - Il Freddo, 14: 3 (1960).
 - (16) PALLA L. - Rend. Ist sup. Sanità, 23: 581 (1960); ovvero « L'Ingegnere » n. 1 e 3 (1961).
 - (17) RENDLA F. e KONOPKOVA D. - Annexe 1958-4 au Bulletin de l'I.I.F.
 - (18) EDBERG E. A. - Refrigerating Engineering, n. 3 (1957).
 - (19) STASTNY F. - Der Plastverarbeiter, n. 8 (1956).
 - (20) BATTLE B. e LAINÉ P. - Rev. gén. Froid, n. 12 (1959).
 - (21) VÄHL L. - Comps. Rend. du Xème Congrès International du Froid, Pergamon Press (1960).
-