72. Ugo SELLERIO. — **Criteri di massima economia nella progettazione di silos per la conservazione del ghiaccio secco.**

Riassunto. — Il problema della conservazione e del trasporto di derrate deperibili si presenta frequentemente a carattere stagionale e con punte spesso dovute ad anticipi di stagioni; in tal caso, è necessario disporre talvolta ed all'improvviso, di notevoli quantitativi di ghiaccio secco (ove questo mezzo refrigerante viene usato per il detto scopo) e, conseguentemente, di grandi impianti di produzione e di adeguate attrezzature per l'immagazzinamento in bombole del CO^2 liquido.

Può quindi riuscire convenientemente l'installazione di veri e propri sili per la conservazione del ghiaccio secco durante lunghi periodi, con i quali sili si verrebbe a realizzare una notevole economia negli impianti di produzione e di conservazione dell'anidride.

La memoria che viene presentata tratta l'impostazione economica del calcolo di tali silos.

Résumé. — Le problème de la conservation et du transport des denrées périssables présente un caractère saisonnier avec des variations fréquentes dues aux saisons tardives.

Dans ce cas, il est nécessaire d'avoir immédiatement à sa disposition des quantités considérables de neige carbonique (lorsque ce moyen de réfrigération est utilisé pour le but poursuivi) et en conséquence, il est nécessaire d'avoir des usines de production importantes ainsi que des emplacements suffisants pour stocker les cylindres de CO^2 liquide.

Il peut ainsi apparaître opportun de construire de véritables silos pour conserver la neige carbonique pendant de longues périodes.

Un tel silo permet une économie considérable de production et de conservation du CO^2.

Le rapport qui va être présenté traite de l'aspect économique de ces silos.

Summary. — The preservation and transportation problem of perishable foodstuffs often presents a seasonal character with frequent climax due to forestalled seasons. In these instances it is necessary to have at hand suddenly considerable quantities of dry ice (when this refrigerating means is used for the purpose in question) and consequently there is a need of large production plants and of adequate fittings to store cylinders of liquid CO_2.

It may, therefore, prove convenient to se up silos in order to preserve the dry ice during long periods. With such a silo there is a considerable

saving of production plants and of preservation of the carbon dioxide.

The paper that is being presented deals with the economic calculation of these silos.

Zusammenfassung.—Die Aufbewahrung und die Beförderung von verderblichen Lebensmitteln hat häufig Saisoncharakter; zuweilen sind die Spitzen auch durch eine frühzeitige Reife bedingt. In solchen Fallen ist es nötig, manchmal auch plötzlich, über grosse Mengen feste Kohlensaure verfügen zu können (wenn dieses Kältemittel zum besagten Zwecke verwendet wird); somit sind grosse Herstellungsanlagen und geeignte Speichereinrichtungen für die Stapelung der Stahlflaschen erforderlich. Es kann sich daher die Einrichtung von Silos-artigen Speicheranlagen für eine lange Aufbewahrung wirtschaftlich erweisen, wodurch eine wesentliche Ersparnis der, Herstellungs- und Lagerungskosten der Kohlensaure erzielt werden konnte.

Die Mitteilung behandelt dieses Problem vom Standpunkte der Berechnung der Wirtschaftlichkeit dieser Speicheranlagen.

L'uso del ghiaccio secco quale mezzo refrigerante per il trasporto a grandi distanze di materie deperibili si è da tempo generalizzato in moltissimi Paesi per i vantaggi che esso presenta rispetto al ghiaccio d'acqua. Senonchè, avviene che in molte zone dove la produzione di tali derrate è discontinua, la richiesta di ghiaccio secco per i trasporti refrigerati è trascurabile durante la maggior parte dell'anno per divenire all'improvviso rilevante nel corso di periodi di breve durata. Tutto ciò richiede impianti di potenza tale da poter fare fronte in breve tempo alla richiesta intensa, e, conseguentemente, detti impianti destinati a funzionare in pieno solo durante brevi periodi all'anno, divengono antieconomici.

Quando poi si dispone di grandi risorse naturali di anidride carbonica, occorrono notevoli quantità di bombole per l'accantonamento delle scorte e quindi le spese di impianto e di esercizio dei complessi risulterebbero tali da sconsigliare in molti casi addirittura la costruzione degli impianti, dato il costo particolarmente oneroso che ne deriverebbero al prodotto (1). Da ciò si intuisce facilmente quale danno derivi alla produzione ed all'esportazione di derrate deperibili.

Quando si verificano le condizioni di cui sopra, può riuscire conve-

---

(1) Non si ritiene conveniente la conservazione del CO^2 liquido, a pressione ordinaria, in quanto il coefficiente di adduzione tra liquido in ebollizione e parete è molto elevato ed inoltre necessiterebbe sempre un impianto di pressatura di notevole mole e quindi molto oneroso.

niente ricorrere alla conservazione del ghiaccio secco in appositi silos; in tal caso, si possono notevolmente ridurre gli impianti per la produzione del ghiaccio e del gas, e per l'accumulo del gas stesso, facendoli funzionare a ritmo continuativo e quindi in condizioni economiche (²).

La buona conservazione di un materiale alla temperatura di — 78,9 °C, non è però cosa facile; infatti, ricorrendo ad isolamenti di spessore infinito e quindi di costo infinito, non si avrebbero dispersioni termiche (a prescindere dalla capacità termica infinita), mentre, con spessori d'isolamento limitati l'incidenza delle dispersioni può essere notevole. Si tratta quindi di ricorrere a soluzioni di compromesso, contentandosi di perdere una certa percentuale del prodotto tale però da non incidere in maniera soverchiante sui costi finali.

* * *

Interessa anzitutto conoscere la forma da dare al silos, risultando più conveniente quella che presenta la minima dispersione termica, e quindi la minima superficie, col massimo volume. L'ideale sarebbe la costruzione di magazzini sferici, senonchè essa risulta onerosa e complessa dal punto di vista costruttivo, oltre ad essere poco pratica per la conservazione di sostanze solide. E' quindi preferibile la forma cilindrica, ed in questo caso, i cilindri di area minima sono quelli in cui l'altezza « H » è uguale al doppio del raggio « R ».

Senonchè, tale soluzione implica notevoli costi per l'acquisto del terreno e per la costruzione delle strutture portanti, del fondo e della copertura i cui spessori crescono in funzione di R^2. Inoltre, supponendo — per porci nelle condizioni più sfavorevoli — di porre blocchi di ghiaccio alla rinfusa anzichè negli appositi scatoloni ben accatastati, il materiale premerà sulle pareti verticali del silos oltre che sul fondo, e quindi lo spessore delle prime crescerà, in conformità della teoria di Mohr sulla spinta delle terre e sui silos, in funzione diretta del raggio e dell'altezza. Pertanto, la relazione $H = 2R$ non appare la più conveniente a meno che non si tratti di piccoli silos, mentre $H = 4R$ rappresenta un limite che non conviene superare neanche per i grossi magazzini. Quindi, si dovrà avere:

$$2R \leqslant H \leqslant 4R$$

* * *

Un altro problema riguarda le relazioni tra la capacità del silos e lo spessore degli isolamenti; il problema è però particolarmente complesso e

(²) Il problema ci è stato sottoposto in tali termini dal Sig. Dr. Mario Rangoni, noto installatore e studioso di impianti per la produzione dell'anidride carbonica solida.

conviene pertanto, nel definire i presenti criteri, ricorrere ad alcune semplificazioni.

Il coefficiente totale orario di trasmissione termica è dato dalla formula:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{s_1}{\varkappa_1} + \ldots\ldots + \frac{s_n}{\varkappa_n} + \frac{1}{\alpha_2}}$$

nella quale:

α_1 = coefficiente di adduzione all'interno in K Cal/m²h °C

α_2 = coefficiente di adduzione all'esterno in K Cal/m²h °C

$\varkappa_1$ ...... $\varkappa_n$ = conducibilità termica oraria degli stessi in K Cal/m²h °C

s_1 .... s_n = spessori dei rivestimenti

Ora, con la precedente ipotesi, e cioè di materiale ammucchiato alla rinfusa ed in contatto diretto con le pareti del silos (ipotesi precauzionale che può verificarsi in pratica), si ha $\alpha_1 = \infty$ e quindi $1/_{\alpha_1} = 0$.

* * *

Inoltre, è anche lecito trascurare il termine $\frac{s_n}{\varkappa_n}$ riguardante la resistenza termica delle pareti portanti, la quale è sempre piccola, nel nostro caso, rispetto a quella degli isolanti; tale semplificazione va a vantaggio delle imperfezioni di esecuzione negli isolamenti stessi.

Meno lecito è però trascurare il termine $1/_{\alpha_2}$ anche se il non tenerne conto va a vantaggio della sicurezza. Tale omissione può però considerarsi lecita nel caso più normale di struttura interrata. Se però il silos è all'aperto ed è rivestito da struttura in lamiera metallica sottoposta all'azione energica dei venti, allora α_2 risulta assai elevato e sarà quindi lecito trascurare il termine $1/_{\alpha_2}$.

In sostanza, il coefficiente *K* con un solo isolante, si ridurrà a:

$$K = \frac{\varkappa}{s}$$

valore questo leggermente superiore a quello deducibile dalla formola esatta.

Ora, per la determinazione della quantità oraria di calore disperso in regime stazionario ci si può servire della formola logaritmica relativa alle superfici cilindriche, oltre a tener conto delle superfici piane del fondo e del coperchio. Senonchè, si ha in tal caso una formola complessa e poco pratica, per cui conviene invece servirsi della formola del muro piano. In tal caso, detti R il raggio interno del silos, $\triangle T$ il salto medio di temperatura tra l'esterno e l'interno, e posta l'altezza $H = aR$, la superficie totale interna è data da:

$$2 \pi R^2 (1 + a)$$

Tale superficie è leggermente inferiore a quella trasmittente (che deve considerarsi la media tra quella sopra calcolata e quella massima) senonchè il K ora determinato è alquanto superiore a quello effettivo, per cui si viene ad avere un certo compenso.

La quantità oraria di calore dispersa, risulta data da:

$$Q = \frac{\varkappa}{s} 2 \pi R^2 (1 + a) \triangle T \tag{1}$$

e risulta, come ora si è detto, attendibile malgrado le semplificazioni apportate.

Se chiamiamo ora « *dispersione specifica* » la quantità oraria di calore « q » *positiva o negativa* dispersa per unità di volume del silos, avremo:

$$q = \varkappa \frac{2 \pi R^2 (1 + a) \triangle T}{s \pi a R^3} = \frac{1}{sR} \frac{2 \varkappa (1 + a) \triangle T}{a} \tag{2}$$

reazione questa che si dice che « la dispersione specifica è inversamente proporzionale al prodotto sR »; ed in genere, per celle di qualsiasi forma, chiamando « *raggio medio* » R il rapporto tra volume ed area dell'ambiente, si ha che « a parità di dispersione specifica, i prodotti tra gli spessori degli isolamenti per i raggi medi dei rispettivi ambienti sono quantità costanti » e possono venire rappresentate da una famiglia di iperboli equitere.

Le quantità « *raggio medio* » e « *dispersione specifica* » possono avere la loro utilità nel calcolo di ambienti refrigerati o riscaldati, e verranno sviluppati in altra occasione.

* * *

Cerchiamo adesso un'espressione generale dei costi. Oltre i simboli noti, siano:

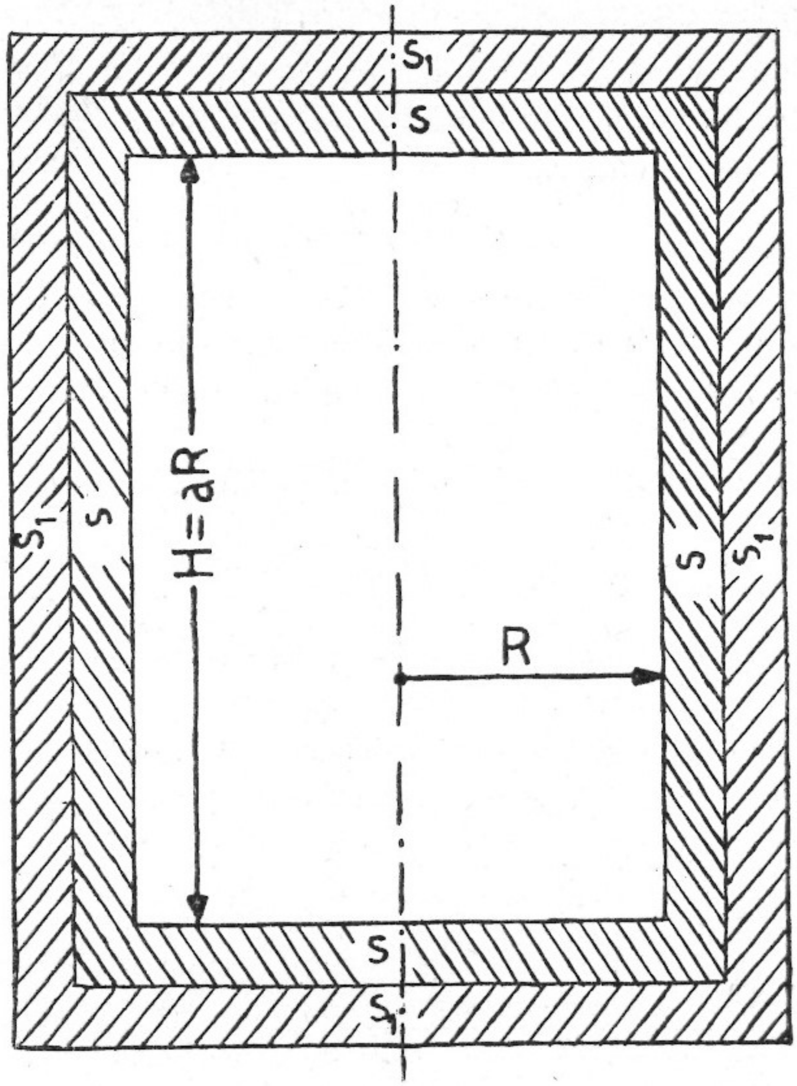
— c_1 costo dello scavo per m^3 (nel caso di costruzione interrata)

— c_2 » dell'isolamento per m^3 di isolante

— c_3 » della struttura portante per m^3 di struttura

— c_4 » del terreno per m^2

— c_5 » del rivestimento sul coibente, per m^2



— b rapporto tra il raggio del terreno occupato, ed R

ed inoltre:

— U utile nel periodo di tempo di funzionamento del silos,, durante l'anno

— L prezzo di vendita al kg di ghiaccio secco

— L' costo per kg di ghiaccio secco immagazzinato

— n percentuale di riempimento del silos, media

— m n° dei riempimenti che si prevedono entro il periodo di funzionamento del silos

— γ peso specifico del ghiaccio secco (circa 1500kg/m^3)

— r calore di sublimazione del ghiaccio secco (circa 137 KCal/kg)

— τ tempo di utilizzazione del silos in un anno (in ore)

Avremo:

1) *Costo scavo*

$$C_1 = c_1 \pi (R + s + s_1)^2 (aR + 2s + 2s_1)$$

2) *Costo isolamento*

$$C_2 = c_2 \pi \left\{ 2s(R+s)^2 + \left[(R+s)^2 - R^2 \right] aR \right\}$$

3) *Costo struttura portante*

$$C_3 = c_3 \pi \left\{ 2s_1 (R+s+s_1)^2 + \left[(R+s+s_1)^2 - (R+s)^2 \right] (aR+2s) \right\}$$

4) *Costo terreno*

$$C_4 = c_4 \pi b R^2$$

5) *Costo del rivestimento sul coibente*

$$C_5 = c_5 \pi 2(1+a) R^2$$

Ponendo:

$$A = c_1 a$$
$$B = 2(1+a) \left[(sc_2 + s_1 c_3) + c_1(s+s_1) + c_5 \right] + b\, c_4$$
$$C = (4+a) \left[(s^2 c_2 + 2ss_1 c_3 + s^2{}_1 c_3) + (s+s_1)^2 c_1 \right]$$
$$D = 2c_2 s^3 + 6c_3 s^2 s_1 + 6c_3 s s^2{}_1 + 2c_3 s^3{}_1 + 2c_1 (s+s_1)^3$$

il costo totale diviene:

$$C_T = C_1 + C_2 + C_3 + C_4 + C_5 = \pi\ (AR^3 + BR^2 + CR + D)$$

(nel caso che il silos non sia interrato, basterà porre nelle quantità A, B, C, D, $c_1 = 0$).

Detto « θ » il tasso di ammortamento, l'onere annuo che ne deriva sarà:

$$\theta\, C_T = \pi\, \theta\ (AR^3 + BR^2 + CR + D)$$

D'altra parte, il costo annuo del materiale immagazzinato, più la quantità perduta per vaporizzazione, è dato da:

$$C' = \pi\, mn\, \gamma\, aR^3 L' + \pi \frac{2\varkappa (1+a) \triangle T \cdot \tau}{sr} R^2 L'$$

e, ponendo,

$$E = \frac{2\,\varkappa\,(1+a) \triangle T \cdot \tau}{sr} \quad ; \quad F = mn\, \gamma\, a$$

otterremo:

$$C' = \pi L'\ (FR^3 + ER^2)$$

Se si prevede l'entità delle spese generali, conviene allora includere il suo ammontare nell'equazione generale del costo, altrimenti si potrà adeguatamente aumentare il coefficiente « θ ». Il costo totale annuo, sarà,

$$\pi \; \theta \; (AR^3 + BR^2 + CR + D) + \pi FL'R^3 + \pi EL'R^2$$

Il ricavato lordo, è invece dato da:

$$\pi \; mn \; \gamma \; aLR^3 = \pi \; FLR^3$$

e quindi l'utile annuo risulta:

$$U = \pi \; [F(L - L') - A \; \theta \;] \; R^3 - \pi \; (B \; \theta + EL')R^2 - \pi C \cdot \theta \; R - \pi \; \theta \; D \qquad (3)$$

Se si volesse risolvere direttamente l'equazione (3) nell'incognita R, occorrerebbe introdurre in essa i valori di s e di s_1 in funzione di R, e si arriverebbe così a formole risolutive praticamente inadoperabili; conviene allora procedere per tentativi, prefissando il valore della dispersione specifica per una cella di volume unitario e di forma simile a quella del silos che interessa, e ricavando quindi il valore di *s* per un silos avente un raggio *R* grossolanamente previsto. Lo stesso procedimento può usarsi per s_1. Indi si introducono i valori così ottenuti nella (3) e si troverà un certo R che in genere non coincide col valore già previsto. Si ripete il procedimento e si ritrova così *s* che viene introdotto nella formola (3) e si ottiene un nuovo *R*. In genere, fatta un po' di familiarità col metodo, potranno bastare due tentativi per risolvere soddisfacentemente il problema.

Senonchè, capita difficilmente che l'utile « *U* » venga prestabilito. In tal caso, interessa allora conoscere il valore minimo di *R* per non avere delle passività, e quindi conviene porre nella (3) $U = O$ e risolvere l'equazione o algebricamente o per tentativi.

In prima approssimazione però, dato che il termine θ D ha un valore piccolo che può anche essere trascurato, l'equazione (3) può essere sostituita dalla (4) dividendo tutto per πR e si ha:

$$[F(L - L') - A \; \theta \;] R^2 - (B \; \theta + EL') R - C \; \theta = O \qquad (4)$$

* * *

Il metodo che abbiamo esposto non è effettivamente troppo rigoroso, specialmente per quanto riguarda la determinazione del coefficiente di trasmissione termica, ma l'equazione (3) risulta semplice e si presta a calcolazioni di orientamento relativamente spedite, i cui risultati sono contenuti nei limiti di sicurezza.

Quanto all'equazione (3), osserviamo che il 2° termine di essa rappresenta un polinomio di terzo grado, che può scriversi sotto la forma:

$$aR^3 - bR^2 - cR - d$$

in cui i termini a, b, c, d sono tutti positivi. In tali condizioni, sarà

$$f(R) = aR^3 - bR^2 - cR - d$$

da cui, derivando, si ha

$$f'(R) = 3aR^2 - 2bR - c$$

funzione questa chi si annulla per i valori di R

$$R_1 = \frac{b - \sqrt{b^2 + 3ac}}{3a} \qquad R_2 = \frac{b + \sqrt{b^2 + 3ac}}{3a}$$

Essendo

$$b < \sqrt{b^2 + 3ac}$$

si ha:

$$R_1 < 0 \quad ; \quad R_2 > 0$$

e quindi,

$$\begin{array}{lll} f'(R) \geqslant 0 & \text{se} & -\infty \angle R \leqq R_1 \\ f'(R) \leqq 0 & \text{se} & R_1 \leqq R \leqq R_2 \\ f'(R) \geqslant 0 & \text{se} & R_2 \leqq R \angle +\infty \end{array}$$

Pertanto, per $0 \leqslant R \leqslant R_2$ la funzione $f(R)$, avendo la derivata negativa, è decrescente e quindi, nel punto R_2 avrà un valore negativo, come si vede subito osservando che si ha $f(0) = -c < 0$.

Tale valore sarà un minimo perchè la funzione è crescente per $R > R_2$ ($f'(R) > 0$). Anzi, poichè

$$\lim_{R \to +\infty} f(R) = +\infty$$

esisterà un valore di R_0 di R (certo maggiore di R_2) in cui $f(R_0)=u\ (R_0)=0$ e tale che per ogni $R > R_0$ sia $g(R) > 0$.

Per ogni $R > R_0$ si ha pertanto un utile annuo positivo, e quindi per tali valori di R l'impianto si potrà ritenere conveniente.

Roma - Istituto Superiore di Sanità - Laboratorio d'Ingegneria.