

COPERTURE IMPERMEABILI

GAY

di Dott. Ing. V. BLASI

Impermeabilizzazioni e manti per tetti piani o curvi, cornicioni, terrazzi, sottotetti, fondazioni.

VIA MAROCHETTI 6. TORINO. TEL. 690.568

CATELLA

MARMI • GRANITI • PIETRE

Cave proprie - Stabilimenti - Segherie

Torino-Via Montevecchio 27-29-Tel. 545.720-537.720

PIETRE ARTIFICIALI

PREFABBRICAZIONE ELEMENTI DECORATIVI

IN GRANIGLIA DI MARMO
E CONGLOMERATO CEMENTIZIO ARMATO
VETROCEMENTO

F. MARGARITORA

Torino - labor. via Oxilia 29 - tel. 264.497 - ab. 772.002

BODINO GIOACHINO

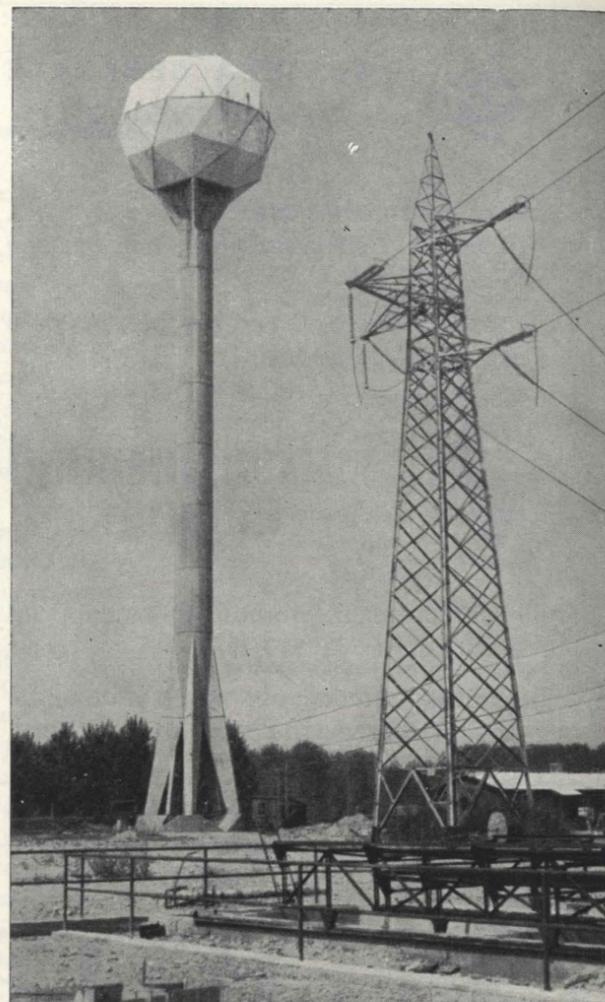
Fonderia artistica
lavori in bronzo, rame,
ottone.

Cancelli e portoni.
Coperture e rivestimenti
in rame.

Lavorazioni speciali
acciaio inox e alluminio
anodizzato.

Serramenti speciali.
Complessivi per atri e scale.
Contrattista "VIS" in edilizia.
Realizzazioni su disegni.
Arredamenti.

TORINO, Via Rivarolo, 3 - Tel. 280.484 - 280.454 - 852.645



SERBATOIO PENSILE IN C. A.

Conformato a tetraicosaedro, altezza m. 50, capacità mc. 400, costruito per una centrale elettronucleare. ● La conformazione parafasica della vasca, che annulla praticamente le sollecitazioni per ritiro e per variazioni di temperatura, nonché la disposizione dell'armatura secondo le direzioni delle sollecitazioni principali, impediscono la formazione delle fessurazioni tardive, caratteristiche dei serbatoi in c.a.

STRUTTURE SPECIALI PER COSTRUZIONI INDUSTRIALI

Impresa di Costruzioni
ING. FELICE BERTONE
TORINO

Via Giovanni Servais, 46 - Tel. 793.189

ATTI E RASSEGNA TECNICA

DELLA SOCIETÀ DEGLI INGEGNERI E DEGLI ARCHITETTI IN TORINO

RIVISTA FONDATA A TORINO NEL 1867

FIAT
TORINO

NUOVA SERIE . ANNO XXII . N. 7 . LUGLIO 1968

SOMMARIO

RASSEGNA TECNICA

- G. F. MICHELETTI, S. ROSSETTO, A. VERRINI, R. LEVI - *Analisi automatica delle caratteristiche dinamiche di organi di macchine utensili* pag. 165
- M. JAMIOLKOWSKI - *Dimensionamento delle fondazioni a pozzo* » 169
- G. A. PUGNO - *Osservazioni critiche su alcuni tipi di illuminazione naturale nelle gallerie d'arte* » 173
- P. ANGLÉSIO - *La depurazione dei gas di scarico degli impianti termici* » 178
- L. KARACHIOSOFF - *L'influenza di piccole variazioni dimensionali della matrice sull'imbutitura di grandi recipienti con flangia* » 181
- REGOLAMENTAZIONE TECNICA » 184

COMITATO DI REDAZIONE

Direttore: Augusto Cavallari-Murat - Membri: Gaudenzio Bono, Cesare Codegone, Federico Filippi, Rinaldo Sartori, Vittorio Zignoli - Segretario: Piero Carmagnola.

COMITATO D'AMMINISTRAZIONE

Direttore: Alberto Russo-Frattasi - Membri: Carlo Bertolotti, Mario Catella, Luigi Richieri

REDAZIONE: Torino - Corso Duca degli Abruzzi, 24 - telefono 51.11.29.

SEGRETERIA: Torino - Corso Siracusa, 37 - telefono 36.90.36/37/38.

AMMINISTRAZIONE: Torino - Via Giolitti, 1 - telefono 53.74.12.

Pubblicazione mensile inviata gratuitamente ai Soci della Società degli Ingegneri e degli Architetti in Torino. — Per i non Soci: abbonamento annuo L. 6.000. - Estero L. 8.000. Prezzo del presente fascicolo L. 600. - Arretrato L. 1.000.

La Rivista si trova in vendita: a Torino presso la Sede Sociale, via Giolitti, 1.
SPEDIZIONE IN ABBONAMENTO POSTALE — GRUPPO III

MARCHINO & C.

CASALE
MONFERRATO

RASSEGNA TECNICA

La « Rassegna tecnica » vuole essere una libera tribuna di idee e, se del caso, saranno graditi chiarimenti in contraddittorio; pertanto le opinioni ed i giudizi espressi negli articoli e nelle rubriche fisse non impegnano in alcun modo la Società degli Ingegneri e degli Architetti in Torino

Analisi automatica delle caratteristiche dinamiche di organi di macchine utensili (*)

G. F. MICHELETTI, S. ROSSETTO, A. VERRINI, R. LEVI presentano un nuovo programma di calcolo che consente la determinazione analitica delle caratteristiche statico dinamiche di organi di macchine utensili. L'analisi è limitata al comportamento flessionale piano delle strutture e costituisce la base per la progettazione di macchine con l'ausilio del calcolatore numerico.

Introduzione.

Nel settore aeronautico ed in quello spaziale già da molti anni è stata impressa una spinta tesa alla riduzione dei costi di progettazione ed all'ottimizzazione dei progetti stessi mediante l'ausilio del calcolatore numerico; invece, forse proprio per motivi di ordine economico e per il valore stesso del prodotto, nel settore delle macchine utensili si è tardato ad avviarsi su questa strada.

Di recente, tuttavia, grazie particolarmente alla maggiore disponibilità di grandi centri di calcolo, si è ritenuto di poter applicare anche nel settore dell'industria delle macchine utensili le tecniche, che hanno condotto a risultati assai interessanti in altri settori: da quello elettronico a quello aerospaziale.

In Italia, promotore il Consiglio Nazionale delle Ricerche, presso l'Istituto di Tecnologia Meccanica del Politecnico di Torino, si è affrontato, ormai sono due anni, lo studio del comportamento flessionale piano degli organi di macchine utensili riducibili ad elementi trapeiformi. Rinunciando a

priori alla possibilità di applicare alle strutture di macchine utensili le equazioni differenziali, derivanti dai metodi variazionali (a causa delle insormontabili difficoltà legate alla definizione analitica degli elementi strutturali e delle condizioni di vincolo), si è preferito affrontare il problema, supponendo la struttura caratterizzata da un insieme di costanti concentrate, ed affrontarne lo studio facendo ricorso ad una delle classiche trattazioni relative ai sistemi ad n gradi di libertà.

Lo studio è stato affrontato, cioè, facendo ricorso al metodo delle matrici di trasferimento, opportunamente completato al fine di analizzare, oltre che il comportamento dinamico libero di una struttura, anche il comportamento forzato e quello statico della struttura stessa.

Il ricorso ad un metodo a costanti concentrate è motivato soprattutto dal fatto che esso consente di superare tutte le difficoltà insite in una trattazione in termini di equazioni differenziali, e di fornire un mezzo estremamente versatile, non legato cioè ad una ristretta classe di tipi di strutture.

L'apparente limitazione di fare ricorso ad un metodo approssimato perde, d'altro canto, ogni significato se si osserva che — nel calcolo — l'approssimazione è comunque insita nel valore delle costanti che devono sempre essere introdotte, quando si passa dalla struttura reale alla sua formulazione analitica. Nei paragrafi se-

guenti si riporta una breve descrizione circa il metodo di calcolo seguito, ed alcuni risultati ottenuti con il metodo stesso.

Impostazione analitica del metodo.

Come è stato premesso, il metodo di calcolo è quello delle «matrici di trasferimento»: in base ad esso ogni struttura viene decomposta in una serie di tronchi, legati fra di loro da opportune condizioni al contorno. Ogni tronco elementare, a sua volta, è suddiviso in una serie di intervalli di massa, e in ciascuno di questi la massa viene concentrata o in corrispondenza del baricentro o all'estremità destra, così che — in definitiva — il tronco risulta schematizzato in una serie di segmenti e stazioni.

I primi assommano le caratteristiche elastiche del tronco; le seconde, quelle inerziali (fig. 1).

Operata siffatta scomposizione, all'estremità di ogni coppia «segmentato-stazione» (l_i, s_i) si può definire un vettore di stato $[v]_i$ costituito da una matrice colonna, in cui compaiono i quattro termini freccia y_i , rotazione θ_i , forza

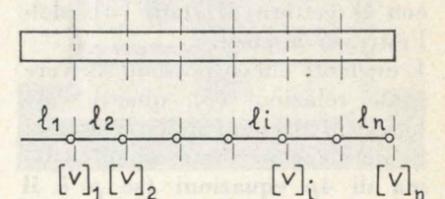


Fig. 1 - Schematizzazione di un tronco in segmenti l_i e stazioni.

rettificatrici
di ogni tipo
di altissima precisione

RETTIFICATRICI UNIVERSALI
RETTIFICATRICI SENZA CENTRI
RETTIFICATRICI PER PIANI AD UNA O PIÙ MOLE
RETTIFICATRICI PER DISCHI FRENO
RETTIFICATRICI PER ASSILI FERROVIARI
RETTIFICATRICI PER SFERE

RETTIFICATRICI PESANTI PER CILINDRI
D'ACCIAIERIE FARREL-GIUSTINA

RETTIFICATRICI PESANTI A DUE MOLE
PER CILINDRI DI CARTIERA FARREL-GIUSTINA

RETTIFICATRICI PER SUPERFICI PIANE
BESLY-GIUSTINA

10146 TORINO • Sede Via G. Servais 125 - Tel. 790.022 (5 Linee)

10036 TORINO • Stabilimento di Settimo - Tel. 561.123 (5 Linee)

20124 MILANO • Filiale Via F. Filzi 19 - Tel. 667.844-5

16129 GENOVA • Filiale Via Brigate Partigiane 136 R - Tel. 580.829



di taglio v_i e momento flettente m_i ,

$$[v]_i = \begin{bmatrix} y \\ \theta \\ v \\ m \end{bmatrix}_i \quad (1)$$

Tenuto conto delle caratteristiche elastiche ed inerziali di ogni singolo segmento di massa, e degli eventuali carichi esterni agenti su di esso, è poi possibile correlare ogni vettore di stato al precedente mediante una matrice quadrata 5×5 $[B]$. Si perviene pertanto alla seguente relazione matriciale:

$$[\bar{v}]_i = [B]_i [\bar{v}]_{i-1} \quad (2)$$

dove la generica $[\bar{v}]_i$ si differenzia dalla corrispondente $[v]_i$, per il fatto di avere un elemento unitario in più. Di queste relazioni, in ogni tronco, se ne possono scrivere tante, quanti sono i segmenti:

$$[\bar{v}]_1 = [B]_1 [\bar{v}]_0$$

$$[\bar{v}]_2 = [B]_2 [\bar{v}]_1$$

$$\dots$$

$$[\bar{v}]_i = [B]_i [\bar{v}]_{i-1} \quad (3)$$

$$\dots$$

$$[\bar{v}]_n = [B]_n [\bar{v}]_{n-1}$$

Ora, sostituendo la prima relazione nella seconda, e così via, si perviene infine ad una espressione del tipo:

$$[\bar{v}]_n = [B]_n \cdot [B]_{n-1} \dots$$

$$\dots [B]_i \dots [B]_1 [\bar{v}]_0 \quad (4)$$

che può scriversi:

$$[\bar{v}]_n = [U]_j [\bar{v}]_0 \quad (5)$$

la matrice $[U]_j$ dicesi matrice di trasferimento del tronco j -esimo ed è una matrice quadrata 5×5 , la cui ultima riga ha tutti gli elementi nulli, eccettuato il quinto (che è unitario).

Essa pone in relazione il vettore di stato dell'estremo finale $[\bar{v}]_n$ con il vettore di stato $[\bar{v}]_0$ dell'estremo iniziale.

È evidente che si possono scrivere tante relazioni (5), quanti sono i tronchi presenti nella struttura. Si perviene pertanto ad un sistema di $4p$ equazioni (se p è il numero di tronchi) in $8p$ incognite. Le restanti $4p$ equazioni,

che rendono risolvibile il sistema sono fornite dalle condizioni al contorno di ogni tronco.

Sostituendo le equazioni di trasferimento in quelle al contorno, si perviene ad un sistema globale di equazioni, nel quale compaiono unicamente i vettori di stato iniziali dei singoli tronchi. Questo sistema può scriversi in forma matriciale:

$$[R] [Z]_0 = [C] \quad (6)$$

dove:

$[R]$ è la matrice dei coefficienti, i cui elementi sono funzioni del quadrato della frequenza;

$[C]$ è il vettore, in cui compaiono i carichi esterni;

$[Z]_0$ è la matrice colonna nella quale, a gruppi di quattro, compaiono le componenti dei vettori di stato iniziali dei tronchi successivi.

L'equazione (6) è il cardine del metodo di calcolo a «matrici di trasferimento»: infatti, è operando su questa equazione che si possono ricavare tutte le informazioni relative al comportamento dinamico della struttura.

Ricordando che gli elementi della matrice $[R]$ sono funzioni di ω^2 , è evidente come, annullando il determinante di $[R]$, si possano ricavare le frequenze naturali del sistema. L'assenza di smorzamenti non consente di desumere, in valore assoluto, le deformate della struttura alle frequenze di risonanza. In compenso è possibile, grazie ad un conveniente accorgimento, conoscere l'andamento qualitativo delle deformate stesse, che coinciderà, a meno di un fattore di scala, con quello effettivo solo nel caso in cui si possa ammettere la presenza di uno smorzamento uniformemente distribuito.

Il comportamento forzato della struttura, qualora questa sia sollecitata da uno o più carichi di egual frequenza, può essere facilmente studiato, introducendo nella matrice $[R]$ la frequenza forzata ω_0 e nel vettore colonna, al posto dei termini corrispondenti, i valori massimi dei carichi agenti.

Risolvendo in questo caso la (6), si determinano i valori dei termini dei vettori di stato iniziali di ogni singolo tronco. Noti questi, facendo ricorso alle (3) è possibile determinare tutti i vettori di stato e, pertanto, conoscere immediatamente sia le deformate dinamiche della struttura sia l'andamento del taglio e del momento flettente.

Sempre utilizzando la (6) si può poi determinare il comportamento statico della struttura stessa. Infatti, annullando gli elementi di $[R]$ funzioni di ω^2 , e sostituendo nella matrice colonna $[C]$ i valori dei carichi statici si può conoscere, con un procedimento analogo a quello descritto per le condizioni forzate, sia le deformate sia la distribuzione dei carichi lungo la struttura.

Note le deformate ed i carichi agenti su ogni stazione è possibile, infine, calcolare le energie, sia cinetica sia potenziale, del sistema.

Alcune considerazioni sul programma di calcolo.

Come è facilmente comprensibile, questo metodo è particolarmente versatile non essendo rigidamente legato ad una struttura particolare; il programma di calcolo è stato scritto, cercando di esaltare al massimo le caratteristiche del metodo. Si è voluto infatti scrivere un programma che, una volta impostati i dati in ingresso, ricavabili direttamente dai disegni costruttivi della struttura, risulti atto a calcolare direttamente sia le frequenze naturali, sia le deformate statiche, forzate o in risonanza, sia le energie corrispondenti, ed a stampare i risultati in forma sia numerica sia grafica.

Dover rendere completamente automatico questo procedimento è stato l'aspetto che ha presentato le maggiori difficoltà, data la notevole quantità di condizioni di vincolo che possono presentarsi in pratica e che devono pertanto essere previste, schematizzate e tradotte in forma matriciale.

Un'altra notevole difficoltà, incontrata nella messa a punto del

programma, deriva dalle dimensioni della matrice $[R]$, che può arrivare ad un massimo 100×100 . Per la valutazione del determinante della $[R]$ si è fatto ricorso ad un metodo classico per la soluzione dei determinanti, che è stato modificato opportunamente, tenendo conto della particolare struttura della matrice $[R]$. In questo modo si è potuto operare una notevole riduzione del tempo-macchina, senza introdurre alcuna differenza nei risultati dei calcoli. Schematicamente, il programma principale può essere rappresentato come appare nella fig. 2.

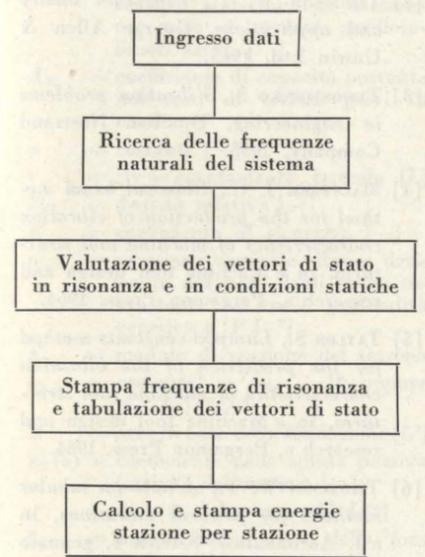


Fig. 2 - Schema a blocchi del programma principale.

Al fine di rendere possibile un facile impiego del programma stesso, sono stati messi a punto appositi moduli che possono essere compilati con facilità con i dati ricavabili dal disegno costruttivo del pezzo, e che contengono tutte le informazioni di cui necessita il programma per fornire le informazioni sul comportamento statico-dinamico della struttura in esame.

Risultati di calcolo.

Le prime prove sono state eseguite allo scopo di studiare alcune caratteristiche del programma stesso.

A tal fine si è analizzata una struttura, costituita da una trave di sezione quadrata incastrata nel-

l'estremo iniziale, della quale possono calcolarsi esattamente le frequenze naturali.

I risultati cui si è pervenuti hanno posto in luce che le frequenze naturali, ottenute usando il programma, sono tanto più vicine a quelle teoriche quanto più elevato è il numero di stazioni e che, a parità di suddivisione, l'errore cresce col crescere dell'ordine della frequenza naturale cercata.

Un altro fatto interessante, anche se meno ovvio del precedente, ha posto in luce che il numero di frequenze naturali non necessariamente coincide con il numero di stazioni presenti nel sistema. Infatti, se si conteggia l'inerzia trasversale delle singole masse, ogni stazione viene a costituire un sistema a due gradi di libertà. Per quanto concerne le energie cinetica e potenziale si è rilevato che il valore di queste tende a diventare eguale (cosa che deve essere sempre soddisfatta nel caso di sistemi conservativi) col crescere della fittezza della suddivisione. Alle basse suddivisioni l'assioma dei sistemi conservativi non è soddisfatto, a causa della grossolanità della suddivisione ed alla conseguente notevole imprecisione nel calcolo.

In effetti, le prove preliminari hanno posto in luce che un'appropriata suddivisione della struttura può portare a risultati più che soddisfacenti, se confrontati con quelli teorici. L'errore, ad esempio, nel calcolo delle frequenze naturali, può, per sistemi semplici, essere contenuto a valori dell'ordine dell'1%. Agli stessi risultati si è pervenuti analizzando una trave di sezione a I vincolata al terreno tramite due molle di rigidezza nota. Questo esempio ha consentito di analizzare l'influenza delle molle di vincolo al terreno sul valore delle due prime frequenze naturali. Si è potuto infatti riscontrare che un aumento della rigidezza sul rapporto di 10:1 non influenza sostanzialmente il valore delle frequenze di ordine inferiore.

Se un'analisi di questo tipo, cioè una serie di prove che met-

tano a confronto i risultati ottenuti per via numerica con i risultati esatti ottenuti attraverso la soluzione delle equazioni differenziali, ha un interesse prettamente analitico che consente di evidenziare la bontà o meno del metodo di calcolo scelto, la riprova della bontà del metodo e delle assunzioni in funzione «ingegneristica» non può venire che da un confronto fra risultati analitici e risultati sperimentali. Nello sforzo teso a poter disporre di una somma di risultati inconfutabili, si è pertanto messo a punto un gruppo strumentale, atto al rilevamento delle caratteristiche dinamiche delle strutture.

Il gruppo strumentale è costituito nelle sue componenti principali da un oscillatore a frequenza variabile, da un eccitatore elettromagnetico, da un rilevatore del segnale, da un analizzatore dinamico.

La fig. 3 illustra la strumentazione nel suo insieme. Le prime prove analitico-sperimentali sono state condotte su una trave a doppio T 120 (UNI 725-726), lunga 1000 mm e poggiata al terreno in corrispondenza di due punti, posti a 100 mm dagli estremi, tramite due sospensioni aventi una costante elastica di circa 2 kg/mm.

Mentre i valori delle due prime frequenze naturali, ottenute con

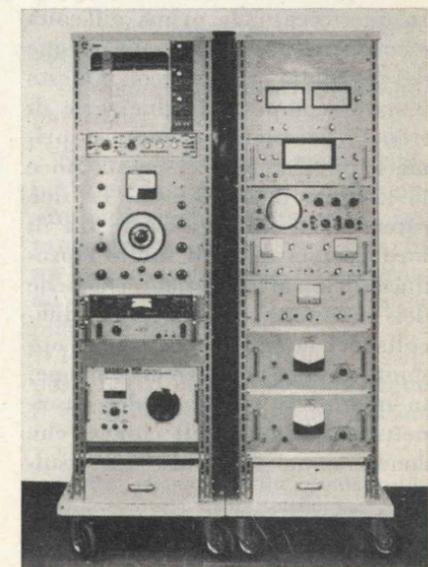


Fig. 3 - Strumentazione usata per il rilevamento delle caratteristiche dinamiche delle strutture.

il calcolo in un tempo pari a 40 s, sono rispettivamente:

$$f_1 = 768,42 \text{ Hz}$$

$$f_2 = 1696,4 \text{ Hz}$$

i valori delle stesse frequenze, rilevati per via sperimentale, sono risultati:

$$f_1 = 805 \text{ Hz}$$

$$f_2 = 1850 \text{ Hz}$$

Tra frequenze sperimentali e frequenze calcolate vi è dunque un errore percentuale, che, per la f_1 , è pari al 4,6% e per la f_2 all'8,4%.

I motivi di tale differenza, alla luce dei risultati precedentemente riportati, sono da ricercarsi non tanto in difetti di programmazione (questi trovano un corrispettivo in corrispondenti difetti sperimentali) quanto nell'incapacità di poter definire con precisione e le condizioni di vincolo e le caratteristiche elastiche ed inerziali della struttura.

Resta il fatto che questa serie di prove sperimentali conferma la bontà del metodo, in quanto errori dell'ordine di quelli citati possono soddisfare pienamente il settore dell'ingegneria meccanica applicata.

L'applicabilità del metodo è stata, infine, sperimentata su una serie di 3 teste alesatrici, complete di corpo-testa e mandrino [10]. In questo caso, la prima difficoltà è consistita nella schematizzazione del modello meccanico. Questo è stato scomposto in due serie di tronchi coassiali (catene), la prima rappresentante il mandrino e la seconda il corpo-testa. Le due catene sono state collegate fra di loro da una serie di molle riprodotte le caratteristiche elastiche dei cuscinetti. Le maggiori difficoltà del lavoro si focalizzano appunto in questa schematizzazione, in quanto la rigidità dei cuscinetti è uno dei punti chiave, che condizionano la bontà dei risultati.

Le prove analitico-sperimentali relative hanno posto in luce che, anche in casi più complessi, i risultati di calcolo possono fornire informazioni interessanti. In-

fatti, per tutte e tre le teste alesatrici, gli errori percentuali fra valori analitici e sperimentali delle prime tre frequenze naturali sono risultati inferiori al 20%. Questo fatto conferma la possibilità di utilizzare il metodo analitico per la previsione del comportamento dinamico di strutture anche se complesse.

Dai risultati sperimentali è risultato un altro fatto prevedibile e significativo. Infatti, data l'impossibilità di schematizzare le strutture, in modo tale da non alterarne le caratteristiche, sperimentalmente si rilevano alcune frequenze (cui corrispondono picchi di risposta) che non sono evidenziate dal calcolo. Per giustificare il fatto, si pensi al modo con cui vengono schematizzati i cuscinetti, i quali sono assimilati a molle, prive di massa e caratterizzate da una costante elastica ben definita. In effetti sono strutture molto complesse, le cui caratteristiche statico-dinamiche non sono chiaramente definite.

Conclusioni.

Nel presente lavoro si è voluto fornire una rapida sintesi del metodo di calcolo sulle caratteristiche flessionali di organi di macchine utensili, messo a punto presso l'Istituto di Tecnologia Meccanica del Politecnico di Torino, e dei risultati sinora conseguiti, da un punto di vista sia analitico, sia sperimentale.

Dall'esame dei risultati è possibile affermare che il metodo scelto non solo consente di rilevare — con buona approssimazione — le caratteristiche dinamiche delle strutture, ma consente, soprattutto, un confronto sicuro fra varie strutture ed in questo senso è un mezzo efficace per la ricerca delle condizioni ottimali di progetto.

I casi sottoposti a prova hanno dimostrato altresì l'economicità di tale ausilio per la progettazione in quanto, contro un modesto costo di calcolo, è possibile risparmiare, essendo affinate le tecniche di schematizzazione, la costruzione della serie di prototipi, che

precedono la costruzione della serie definitiva.

Selezionato infatti, in base ai soli disegni, un progetto fra una certa serie, non rimarrà che l'impegno di costruire il prototipo: controllato il quale, è possibile passare direttamente alla costruzione della serie.

G. F. Micheletti - S. Rossetto
A. Verrini - R. Levi

BIBLIOGRAFIA

- [1] DEN HARTOG J. P., *Mechanical vibrations*, McGraw-Hill Book Company, 1956.
- [2] THOMSON W. T., *Vibration theory and applications*, George Allen & Unwin Ltd, 1965.
- [3] TIMOSHENKO S., *Vibration problems in engineering*, D. Van Nostrand Company, 1955.
- [4] MALTBAEK J. C., *Classical beam method for the production of vibration characteristics of machine tool structures*, in « Machine tool design and research », Pergamon Press, 1964.
- [5] TAYLOR S., *Lumped-constants method for the prediction of the vibration characteristics of machine tool structures*, in « Machine tool design and research », Pergamon Press, 1964.
- [6] THOMSON W. T., *A note on tabular methods for flexural vibrations*, in « J. Aeronautical Science », gennaio 1953, pp. 62-64.
- [7] MYKLESTAD N. O., *A new method of calculating natural modes of uncoupled bending vibration of air-plane wings and other types of beams*, in « J. Aeronautical Sc. », aprile 1944, pp. 153-162.
- [8] G. F. MICHELETTI, S. ROSSETTO, A. VERRINI, R. LEVI, *Ricerca sulla determinazione delle caratteristiche ottimali di organi di macchine utensili, al fine di consentirne la progettazione automatica* (in via di pubblicazione).
- [9] S. ROSSETTO, A. VERRINI, *Su un metodo per il calcolo delle caratteristiche flessionali piane di strutture riducibili ad elementi trabeiformi*, in « Ingegneria Meccanica », luglio 1968.
- [10] R. LEVI, S. ROSSETTO, A. VERRINI, *Analytic and experimental study of certain types of machine tool subassemblies*, M.T.D.R., Birmingham, 16-20 settembre 1968.

DIMENSIONAMENTO DELLE FONDAZIONI A POZZO

M. JAMIOLKOWSKI partendo da una particolare schematizzazione delle caratteristiche del terreno in situ espone un metodo di dimensionamento delle fondazioni a pozzo basato sul criterio della limitazione delle deformazioni ammissibili.

SIMBOLOGIA

D	= diametro della fondazione circolare [L]
p_{lim}	= pressione orizzontale limite [$F L^{-2}$]
q_{lim}	= pressione verticale limite [$F L^{-2}$]
q^o_{lim}	= pressione verticale limite nel caso di terreni argilloso-limosi saturi [$F L^{-2}$]
c_u	= resistenza al taglio iniziale in termini di sforzi totali [$F L^{-2}$]
N^o_c	= coefficiente di capacità portante relativo al termine di coesione nel caso di terreni argilloso-limosi saturi [-]
A_K	= coefficiente di capacità portante nel caso di terreni privi di coesione
φ	= costante [-]
y	= Δy = spostamento laterale [L]
D_R	= densità relativa [-]
F	= coefficiente di sicurezza [-]
p'_v	= pressione verticale efficace derivante dal peso degli strati sovrastanti ad una profondità generica z [$F L^{-2}$]
E_s	= modulo di reazione del terreno
n_h	= costante = $m_h \cdot D$ oppure $m_h \cdot L$ [$F L^{-3}$]
A	= area di base della fondazione [L^2]
$\lambda_p(a)$	= coefficiente della spinta passiva (attiva) del terreno [-]
γ	= densità del terreno [$F L^{-3}$]
h	= profondità imposta della fondazione [L]
h_1	= distanza tra il punto di applicazione della forza H e la quota dove inizia il terreno reagente [L]
B	= lato minore della fondazione; nelle [1] ÷ [15] è il lato parallelo alla linea d'azione della forza H [L]
L	= lato maggiore della fondazione; nelle [1] ÷ [15] è il lato perpendicolare alla linea d'azione della forza H [L]
E	= modulo d'elasticità del materiale della fondazione [$F L^{-2}$]
I	= momento d'inerzia della sezione della fondazione [L^4]
N	= forza verticale [F]
H	= forza orizzontale [F]
M	= momento flettente [$F \cdot L$]
α	= coefficiente di rigidità relativa fondazione-terreno [L^{-1}]
σ_z	= sollecitazione verticale [$F L^{-2}$]
σ_y	= sollecitazione orizzontale [$F L^{-2}$]
k_z	= coefficiente di reazione verticale alla profondità h [$F \cdot L^{-3}$]
k_y	= coefficiente di reazione orizzontale alla profondità h [$F \cdot L^{-3}$]
m_h	= costante [$F \cdot L^{-4}$]
n_h	= costante [$F \cdot L^{-3}$]

W	= momento resistente della fondazione [L^3]
ω	= angolo di rotazione della fondazione rispetto alla verticale [-]
z_0	= profondità del centro di rotazione [L]
z	= profondità generica [L]
T	= parte del carico N sopportato per attrito laterale [F]
e	= indice dei vuoti.

1. INTRODUZIONE

Nel presente lavoro vengono esposti i criteri di dimensionamento delle fondazioni profonde rigide nell'ipotesi che esse siano vincolate in un terreno per il quale sia valida la schematizzazione di Winkler, e per il quale il modulo di reazione del « sottofondo » aumenti linearmente con la profondità.

In questa sede sono prese in esame soltanto fondazioni che dal punto di vista pratico possono considerarsi « infinitamente rigide ».

Come criterio di rigidità si adotta quello proposto da Silin e Zavrijev [1] ⁽¹⁾ secondo i quali la fondazione può essere ritenuta infinitamente rigida se risulta soddisfatta la seguente condizione:

$$\alpha = \sqrt[5]{\frac{m_h \cdot B}{E I}} \leq \frac{2,5}{h} \quad (1)$$

La possibilità di calcolare le rotazioni e gli spostamenti delle fondazioni a pozzo rappresenta uno dei vantaggi di questo metodo e in generale di tutti quelli che fanno ricorso alla teoria del suolo di Winkler e alla teoria del semispazio elastico.

Mentre invece i metodi che valutano il comportamento delle fondazioni a pozzo nelle condizioni di equilibrio limite, pur fornendo indicazioni valide riguardo al carico di rottura del complesso fondazione-terreno non permettono di determinare le deformazioni che la fondazione subisce.

A tale proposito va ricordato ⁽¹⁾ Questo criterio è analogo a quello proposto da Matlock e Reese [8] che pongono come limite $\alpha \leq \frac{2}{h}$.

che, per la maggior parte delle costruzioni, il criterio più restrittivo per il dimensionamento delle fondazioni è quello relativo alla limitazione delle deformazioni ammissibili e non quello che deriva dall'applicazione di un opportuno coefficiente di sicurezza al carico di rottura.

Nel seguito sono riportate le equazioni che permettono la determinazione delle grandezze necessarie per il dimensionamento nella fase di comportamento pseudoelastico ⁽²⁾ del terreno, oltre che le formule per la valutazione del carico di rottura (nella fase in cui il terreno si comporta come un mezzo rigido plastico).

2. DERIVAZIONE DELLE FORMULE

Nel caso più generale una fondazione a pozzo del tipo indicato in fig. 1, avente forma rettangolare, sotto l'azione delle forze esterne (H, M, N) tende a ruotare intorno al punto 0.

Per il dimensionamento della fondazione necessita la determinazione delle seguenti grandezze:

- pressioni orizzontali (σ_y) agenti sul terreno tra le profondità $z = 0$ e $z = h$;
- pressioni verticali (σ_z) agenti alla profondità $z = h$;
- momenti flettenti agenti sulle pareti del pozzo.

Si prende ora in esame il comportamento di una fondazione profonda rigida avente pianta rettangolare e che sia soggetta ad un carico orizzontale H applicato ad una altezza h_1 rispetto al piano di campagna (p. c.).

Il terreno di fondazione è supposto costituito da materiali aventi il coefficiente di reazione orizzontale

⁽²⁾ Per comportamento pseudoelastico del terreno si intende quello per cui si ha linearità tra sforzi e deformazioni ($k_y = \frac{\sigma_y}{\Delta y}$; $k_z = \frac{\sigma_z}{\Delta z}$). Tale ipotesi è generalmente accettabile a condizione che le sollecitazioni esistenti siano una piccola frazione di quelle di rottura.

tale di sottofondo (k_y) variabile linearmente con profondità.

$$k_y = m_h \cdot h \quad (2)$$

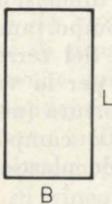
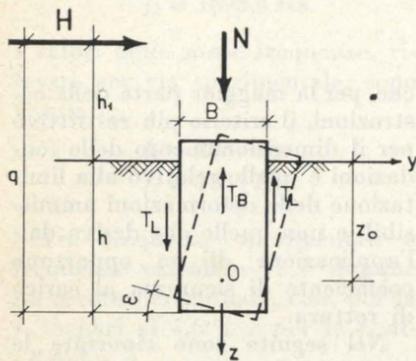


Fig. 1.

In tali condizioni lo spostamento della fondazione e le reazioni del terreno sono date dalle seguenti espressioni:

$$\Delta y = (z_0 - z) \operatorname{tg} \omega \quad (3)$$

$$\sigma_y = (z_0 - z) \operatorname{tg} \omega \cdot k_y \cdot \frac{z}{h} \quad (4)$$

essendo:

Δy = spostamento della fondazione alla profondità z rispetto al p. c.
 ω = rotazione della fondazione intorno al punto 0.

Per la definizione di z_0 e $\operatorname{tg} \omega$ si considerano le condizioni di equilibrio orizzontale e alla rotazione intorno ad 0, pertanto:

$$H - \int_0^h \sigma_y \cdot L \, dz = H - L \cdot \operatorname{tg} m_h \cdot \int_0^h (z_0 - z) z \, dz = 0 \quad (5)$$

$$H \cdot h_1 + \int_0^h \sigma_y \cdot L \cdot z \, dz - W \cdot \sigma_z = 0 \quad (6)$$

poichè risulta:

$$\sigma_z = 0,5 \cdot B \cdot \operatorname{tg} \omega \cdot k_v \quad (7)$$

dove:

$$k_v = m_v \cdot h \quad (8)$$

essendo: k_v = coefficiente di rea-

zione verticale del sottofondo alla profondità h .

Risolviendo la (5) e la (6) si ottiene:

$$H - L \cdot \operatorname{tg} \omega \cdot m_h \left(\frac{z_0}{2} - \frac{h}{3} \right) h^2 = 0 \quad (5 \text{ a})$$

$$\begin{aligned} & H h_1 + L \cdot \operatorname{tg} \omega \cdot m_h \int_0^h z^2 (z_0 - z) \, dz - k_v \cdot W \\ & \cdot \operatorname{tg} \omega \cdot 0,5 B \cdot W = H h_1 + \\ & + m_h L h^3 \left(\frac{z_0}{3} - \frac{h}{4} \right) \operatorname{tg} \omega - \\ & - k_v \operatorname{tg} \omega \cdot 0,5 B \cdot W. \quad (6 \text{ a}) \end{aligned}$$

Introducendo: $\beta = \frac{k_h}{k_v}$ e risolvendo le (5 a) e (6) rispetto alle due incognite z_0 e $\operatorname{tg} \omega$ si ricava:

$$z_0 = \frac{\beta \cdot L \cdot h^2 (4q - h) + 6W \cdot B}{2\beta L \cdot h \cdot (3q - h)} \quad (9)$$

$$\operatorname{tg} \omega = \frac{12\beta \cdot H (3q - h)}{m_h \cdot h (L h^3 \beta + 18 B W)} \quad (10)$$

ponendo nella (10):

$$R = \frac{\beta \cdot L h^3 + 18 B W}{2\beta (3q - h)} \quad (11)$$

$$\operatorname{tg} \omega = \frac{6H}{R \cdot m_h \cdot h} \quad (10 \text{ a})$$

2.1. Pressioni orizzontali.

Essendo noti i valori di z_0 e $\operatorname{tg} \omega$ è possibile definire le pressioni orizzontali alle varie quote mediante la:

$$\sigma_y = \frac{6H}{R \cdot h} z (z_0 - z) \quad (12)$$

per la quale il valore massimo di σ_y alla profondità $0,5 z_0$ risulta pari a:

$$\sigma_y = \frac{1,5H}{R h} z_0^2 \quad (12 \text{ a})$$

2.2. Pressioni verticali.

La distribuzione delle pressioni verticali sulla base del pozzo deriva dalla seguente espressione:

$$\begin{aligned} \sigma_{z \max(\min)} &= \sigma_0 \pm \sigma_z = \\ &= \frac{N}{A} \pm \frac{3 \cdot B \cdot H}{\beta \cdot R}. \quad (13) \end{aligned}$$

L'espressione completa che prende in conto il contributo alla stabilità per effetto dell'attrito laterale è

$$\frac{N - \Sigma T}{A} \pm \frac{3 B H}{\beta \cdot R}$$

2.3. Momenti flettenti.

L'espressione del momento flettente (M_z) in funzione della profondità (z) risulta:

$$\begin{aligned} M_z &= H (h_1 + z) - \int_0^z \sigma_y \cdot \\ &\cdot L (z_0 - z) \, dz = \\ &= H \left\{ h_1 + z \left[1 - \frac{L z^2}{2 R \cdot h} (2 z_0 - z) \right] \right\}. \quad (14) \end{aligned}$$

Il valore di $M_{z \max}$ si ricava imponendo la condizione $\frac{dM_z}{dz} = 0$.

Nel caso che sulla fondazione agisca la sola forza N applicata eccentricamente (momento $M = N \cdot e$) il calcolo della fondazione a pozzo viene svolto con l'ausilio delle formule sovrapposte, introducendo in esse:

$$H = 0; \quad h_1 = \infty; \quad M = N \cdot e$$

si ottiene:

$$z_0 = \frac{2}{3} h \quad (9 \text{ a})$$

$$\operatorname{tg} \omega = \frac{2 \beta \cdot M}{m_h h R_1} \quad (10 \text{ a})$$

essendo:

$$R_1 = \frac{L \cdot h^3 \cdot \beta}{18} + W \cdot B. \quad (11 \text{ a})$$

L'andamento delle pressioni orizzontali risulta in questo caso dalla formula:

$$\sigma_y = \frac{2 \cdot \beta \cdot M \cdot z}{h \cdot R_1} (z_0 - z) \quad (12 \text{ b})$$

e la distribuzione delle sollecitazioni verticali sulla base del pozzo può essere calcolata mediante la seguente espressione:

$$\sigma_{z \max(\min)} = \frac{N}{A} \pm \frac{M \cdot B}{R_1}. \quad (13 \text{ a})$$

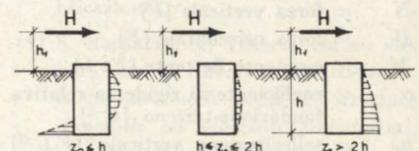


Fig. 2.

Nella figura 2 sono riportati i diagrammi delle reazioni orizzontali agenti sulle pareti del pozzo al variare del rapporto z_0/h .

Nelle formule espresse nel presente paragrafo convenzionalmente si indica con L il lato di base perpendicolare alla direzione della forza H e per B quello parallelo. Nel caso di fondazioni aventi in pianta forma circolare è opportuno introdurre al posto di L il valore del diametro corretto D^0 dato dalla seguente espressione:

$$D^0 = D \left(1 + \frac{1}{D} \right) s \quad (15)$$

essendo:

D = diametro reale della fondazione in metri.

s = fattore di forma = $0,8 \div 0,9$.

Nel caso delle fondazioni rettangolari, in prima approssimazione, si può utilizzare la (15) introducendo al posto di D il lato del pozzo perpendicolare alla retta d'azione di H .

Nella (15) il coefficiente $\left(1 + \frac{1}{D} \right)$ tiene conto dell'aumento della resistenza orizzontale del terreno per ogni metro corrente di larghezza, al diminuire del diametro della fondazione.

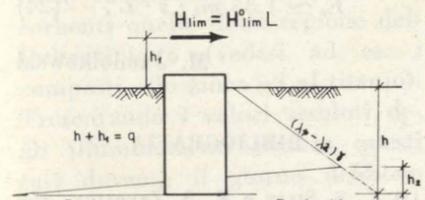


Fig. 3.

3. VERIFICHE DI STABILITÀ DELLA FONDAZIONE

Il buon dimensionamento di una fondazione profonda rigida con l'uso delle formule espresse nel paragrafo precedente, va completato con la verifica delle seguenti due condizioni:

a) Le pressioni orizzontali (σ_y) devono essere di intensità tale da soddisfare in ogni punto la seguente disequaglianza:

$$\sigma_y(z) \leq \frac{P_{lim}}{F_y} \quad (16)$$

essendo:

$P_{lim} = (\lambda_p - \lambda_a) \cdot p'_v(z)$
 F_y = coefficiente di sicurezza
 λ_p, λ_a = coefficienti di spinta passiva ed attiva del terreno tenendo conto dell'attrito (e) o dell'adesione fra la fondazione e il terreno

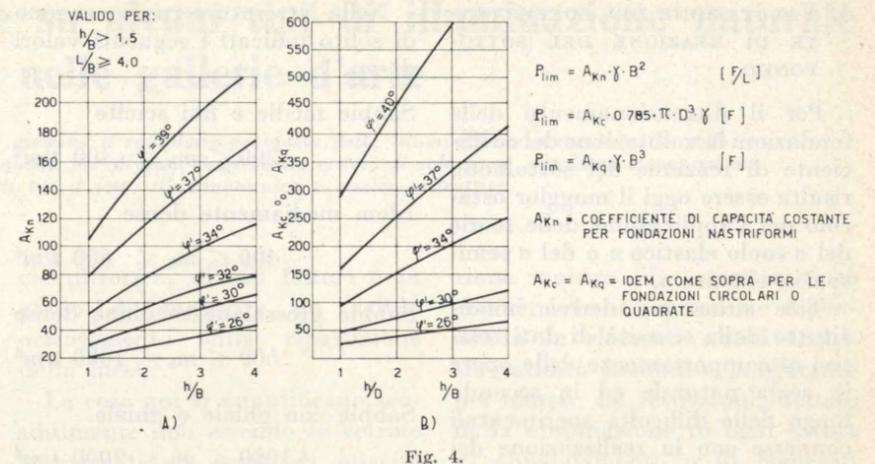


Fig. 4.

p'_v = pressione verticale effettiva.

Volendo valutare la stabilità globale della fondazione si può ricorrere al metodo indicato da K. Terzaghi [2] secondo il quale la forza orizzontale limite (H^0_{lim}) riferita all'unità di larghezza della fondazione può essere calcolata (vedi fig. 3) con le seguenti due equazioni d'equilibrio:

$$\begin{aligned} q \cdot H^0_{lim} &= P_{lim} (h-z) \cdot \\ &\cdot \left(\frac{1}{6} h^2 - \frac{1}{3} h_2^2 \right) \quad (17) \end{aligned}$$

$$H^0_{lim} = p_{lim} (z=h) \cdot (0,5 h - h_2). \quad (18)$$

Noti i valori di p_{lim} e h ed eliminando h_2 si ricava il valore di H^0_{lim} .

b) Le pressioni verticali (σ_z) agenti alla profondità $z = h$ devono essere inferiori di q_{lim}/F_z ; essendo:

q_{lim} = pressione di rottura calcolata secondo Berzantzev [3]
 F_z = coefficiente di sicurezza.

I valori di q_{lim} possono essere ricavati, nel caso dei terreni incoerenti, dalle seguenti equazioni:

$$\text{per } \frac{L}{B} \geq 3$$

$$q_{lim} = \frac{P_{lim}}{B} = A_{kn} \cdot \gamma \cdot B \quad (19 \text{ a})$$

$$\text{per } \frac{L}{B} = 1$$

$$q_{lim} = \frac{P_{lim}}{B^2} = A_{kq} \cdot \gamma \cdot B \quad (19 \text{ b})$$

per fondazioni circolari

$$q_{lim} = A_{kc} \cdot \gamma \cdot D. \quad (19 \text{ c})$$

Nelle figure 4 A) e 4 B) sono

riportati i valori dei coefficienti A_k calcolati da W. G. Berzantzev [3]. Nel caso dei terreni coesivi saturi i valori di q_{lim} possono essere ricavati dalle seguenti espressioni:

$$q^0_{lim} = N^0_c \cdot c_u + \gamma h \quad (20)$$

essendo:

c_u = coesione apparente espressa in termini di sforzi totali = resistenza al taglio iniziale

$$N^0_c = (\pi + 2) \cdot (1 + 0,2 B/L) / (1 + 0,2 L/B). \quad (21)$$

La (21) è valida a condizione che:

$N^0_c \leq 7,5$ per fondazioni nastroformi

$N^0_c \leq 0,9$ per fondazioni quadrate o circolari.

Nel caso dei carichi eccentrici (') si dovrà inoltre controllare che sia soddisfatta la seguente ineguaglianza:

$$\frac{q_{lim}}{F_z} \geq \frac{N}{(B - 2 e_B) (L - 2 e_L)} \quad (22)$$

essendo:

N = risultante dei carichi

e = eccentricità

F_z = coefficiente di sicurezza avente valore compreso tra 2 e 3.

Nelle fondazioni a pozzo per le quali la profondità relativa (h/B) è sempre superiore a 1,0 è possibile trascurare l'effetto dell'inclinazione della risultante dei carichi (H/N) sulla capacità portante del terreno.

(3) Con $\varphi' \neq 0, e_B \neq 0$ nelle (19 a ÷ c) si introduce al posto di B il valore $B - e_B$.

4. VALUTAZIONE DEL COEFFICIENTE DI REAZIONE DEL SOTTOFONDO

Per il dimensionamento delle fondazioni la valutazione del coefficiente di reazione del sottofondo risulta essere oggi il maggior ostacolo per l'applicazione delle teorie del « suolo elastico » o del « semi-spazio elastico ».

Tale situazione deriva innanzitutto dalla scarsità di dati relativi al comportamento delle opere in scala naturale ed in secondo luogo delle difficoltà sperimentali connesse con la realizzazione dei modelli.

Per la valutazione del coefficiente di reazione del sottofondo, allo stato attuale delle conoscenze non si può aggiungere molto a quanto esposto da K. Terzaghi [4] nel 1955. Secondo questo Autore i valori di m_h per terreni non coesivi (4) sono dati dalla seguente equazione:

$$k_y = \frac{\sigma_y}{y} = m_h \cdot z = \frac{\varphi \cdot \gamma \cdot z}{L \cdot 1,35} \quad (23)$$

essendo:

φ = Costante adimensionale che secondo K. Terzaghi assume i valori esposti nella tabella 1

y = deformazione laterale

L = lato della fondazione perpendicolare alla direzione d'azione della forza H

γ = peso di volume del terreno da considerarsi immerso se sotto la falda freatica.

Tabella N. 1 - Valori di φ

Sabbie sciolte ($N_{SPT} > 10$ colpi/piede)	Sabbie mediamente dense ($10 > N_{SPT} > 30$)	Sabbie dense ($N_{SPT} > 30$)
$0 < D_R \leq 0,33$	$0,33 < D_R \leq 0,67$	$0,67 < D_R \leq 1,0$
$100 < \varphi < 300$	$300 < \varphi < 1000$	$1000 < \varphi < 2000$

essendo D_R = densità relativa definita come $\frac{e_{max} - e_{nat}}{e_{max} - e_{min}}$.

(4) L'ipotesi che il k_y sia proporzionale alla profondità è valida nei terreni sabbiosi ghiaiosi oppure in quelli coesivi normalmente consolidati. Nei terreni coesivi preconsolidati il coefficiente di reazione del sottofondo (k_y) è costante oppure varia secondo una legge polinomiale del tipo $k_y = k_0 + m_h \cdot z$.

Nella letteratura russa vengono di solito indicati i seguenti valori di m_h .

Sabbie medie e fini sciolte

$$200 \leq m_h \leq 400 \text{ t/m}^4$$

Idem mediamente dense

$$400 \leq m_h \leq 600 \text{ t/m}^4$$

Sabbie grossolane mediane dense

$$600 \leq m_h \leq 1000 \text{ t/m}^4$$

Sabbie con ghiaie e ghiaie

$$1000 \leq m_h \leq 2000 \text{ t/m}^4$$

I valori di m_h sopraindicati sono valida per L (B) (D) $\simeq 2 \div 6$ m e a condizione che $F_y \geq 1,8$.

In generale va ricordato che la linearità tra le reazioni e le deformazioni ($\sigma_y/y = k_y$) che sta alla base del metodo di calcolo esposto, può essere ritenuta valida per valori di $F_y \simeq 1,8 \div 2,0$.

Da prove di carico orizzontale eseguite su pali di fondazione, risulta che il valore di k_y , a parità di profondità diminuisce con l'aumentare dell'entità delle sollecitazioni.

Le prove (5) seguite dall'autore durante la costruzione del pontile S.I.O.T. di Trieste hanno fornito i seguenti risultati:

$$m_h \cdot D = 0,20 \text{ Kg/cm}^3$$

per $H = 1000 \text{ Kg}$

$$m_h \cdot D = 0,05 \text{ Kg/cm}^3$$

per $H = 3500 \text{ Kg}$

Caratteristiche analoghe sono state osservate nel corso di altre prove con pali tubolari d'acciaio eseguite ad Augusta, La Spezia e in Spagna.

Tali esperienze indicano ancora che a parità di diametro e di profondità, il rapporto di σ_y/y non è costante ma varia col variare del rapporto σ_y/p_{lim} .

Per i terreni limoso-argillosi preconsolidati mancano nella letteratura indicazioni relative all'entità dei valori di m_h .

I manuali di Navy Docks [5]

(5) Si trattava di pali tubolari d'acciaio ($D = 70$ cm) infissi in terreno coesivo normalmente consolidato per il quale $C_u = 0,25 p_v$.

indicano i seguenti ordini di grandezze:

terreni limoso argillosi teneri

$$m_h \cdot D \simeq 0,02 \div 0,13 \text{ Kg/cm}^3$$

terreni limoso argillosi di media consistenza

$$m_h \cdot D \simeq 0,15 \div 0,65 \text{ Kg/cm}^3$$

I. A. Ten (6) indica per argille tenere $m_h \simeq 100 \div 200 \text{ t/m}^4$.

La determinazione sperimentale dei valori di m_h può avvenire mediante l'esecuzione di prove di carico orizzontale su pali rigidi per l'interpretazione delle quali si rimanda il lettore alle pubblicazioni [4], [5], [6].

Per quanto riguarda le possibilità di determinare in via approssimativa i valori di m_h in laboratorio si ricorda un interessante articolo di Mc Clelland e Focht Jr. [7] e la relazione tra il modulo di reazione del terreno (E_s) ed il coefficiente m_h data da K. Terzaghi [4].

$$E_s \simeq 1,35 m_h \cdot z \cdot L \quad (24)$$

M. Jamiolkowski

BIBLIOGRAFIA

- [1] K. S. SILIN e K. S. ZAVRIJEV, *Metodika rasciotov fondamientov s vertikalnimi stolbami*, Mosca, 1962.
- [2] K. TERZAGHI, *Theoretical Soil Mechanics*, New York, 1942.
- [3] W. G. BERZANTZEV, *Rasciot prochnosti osnovanij Soruzenij*, Mosca, 1960.
- [4] K. TERZAGHI, *Evaluation of coefficients of subgrade reaction*, Geotechnique n. 4, 1955.
- [5] *Design Manual*, DM-7, Navy Docks 1962.
- [6] I. A. TEN, *Sovriemienije fundamenti glubokovo zalozenija avtodoroznich mostov*, Mosca, 1963.
- [7] B. MC CLELLAND e J. A. FOCHT, *Soil Modulus for laterally loaded piles*, A.S.C.E. Journ S.M.F.E. October 1956.
- [8] L. REESE e H. MATLOCK, *Non dimensional solution for laterally loaded piles*, VIIth Texas Conf. on S.M.F.E. 1956.

Osservazioni critiche su alcuni tipi di illuminazione naturale nelle gallerie d'arte

GIUSEPPE ANTONIO PUGNO esamina il complesso problema della illuminazione naturale nelle gallerie d'arte con speciale riguardo a quelle per dipinti. Suggerendo criteri di soluzione, sottolinea i conseguenti rapporti tra il fatto illuminotecnico e quello costruttivo.

1) L'illuminazione generale dall'alto nelle pinacoteche.

È questa la soluzione che più si armonizza con le nostre esperienze visive le quali si riconducono sempre alle caratteristiche dei fatti naturali.

Tale attitudine si accentua con la direzionalità della luce in quanto essa viene a giustificare l'esistenza di un senso. L'illuminazione dall'alto degli oggetti può essere ottenuta attraverso la diffusione di vetrate di potere filtrante appropriato e disposte a soffitto od anche con introduzione laterale attraverso superfici bianche favorevoli alla riflessione delle radiazioni visibili, ma assorbiti quelle della regione dell'ultravioletto (vedasi ad es. i composti allo zinco ed al titanio). Trascurando i valori assoluti degli illuminamenti che in questi casi durante il giorno debbono essere piuttosto contenuti che esaltati, ammesse le ampie superfici emittenti previste in questi ambienti, la cura deve piuttosto essere rivolta alla ripartizione delle luminanze per la quale possono fornire una utile informazione significativi rapporti adimensionali di illuminamento divenuti ormai parametri fondamentali in qualunque problema di illuminazione naturale di interni. Essendo il piano utile, contrariamente a quanto accade nella quasi generalità dei casi, verticale, tali parametri, denominati fattori di luce del giorno o fattori di cielo a seconda delle circostanze che andremo meglio a definire appresso, dovranno essere anch'essi riferiti alla stessa giacitura di piano.

La conoscenza, in un numero sufficiente di punti della superficie pittorica, di tali fattori è in grado di suggerire un valido orientamento sulla ripartizione della luce.

Le cose qui si semplificano sensibilmente non essendo le vetrate trasparenti; il grado di opacità proprio del vetro filtro installato o perchè ottenuto attraverso velari o per similari installazioni, rende la faccia interna degli elementi luciferi pressochè insensibile, sotto l'aspetto della ripartizione, alla mutevolezza delle condizioni esterne. Questa considerazione, verificata con ottima approssimazione, consente di abbandonare il fattore di luce del giorno, variabile perchè dipendente dalle instabili ripartizioni di luminanza della volta celeste, e di vantaggiosamente riferirsi al «fattore di cielo» che, basandosi sull'ipotesi dell'uniformità della luminanza (ipotesi corretta come impostazione di calcolo anche se non corrisponde al fatto naturale), diviene suscettibile di una definizione puramente geometrica. Ciò è di grande importanza potendo assumere quale parametro un numero che è funzione sì della posizione del punto, ma costante nel tempo.

Il carattere statico della ripartizione dell'illuminamento rende agevole un lavoro di progetto o di verifica illuminotecnica la quale ultima esige, come ovvio, la predefinita dell'ambiente nelle sue caratteristiche fisiche geometriche. L'aver circoscritto entro un fatto puramente geometrico la distribuzione del flusso luminoso rappresenta un vantaggio di grande utilità quando si pensi che la distribuzione delle luminanze di un campo visuale (che è ciò che in ultima analisi interessa) dipende in questa condi-

zione ancora da caratteristiche geometriche. La soluzione dipendendo da elementi statici acquista validità assoluta e perdurante nel tempo. Le restrizioni, dettate dalla eliminazione di ogni forma di abbagliamento o di contrasti indesiderati di luminanza, devono tenere in considerazione il modo con cui si attua l'illuminazione, la natura e dimensioni delle superfici con particolare riguardo a quella pittorica (1) ed infine alla estensione e posizione relativa rispetto al dipinto della zona di osservazione.

Con il sistema d'illuminazione attraverso il soffitto, in tutto od in parte vetrato, si verificano alcuni inconvenienti tra i quali quello, più propriamente illuminotecnico, consistente in un'illuminazione più intensa sul pavimento che sul piano utile (pareti verticali). Per questo motivo la parte centrale deve risultare meno brillante con che si raggiunge un altro benefico effetto: la eliminazione di riflessioni perturbatrici sulla superficie pittorica, più gravi se protetta da vetro.

Questo è il motivo per cui la trasparenza della parte centrale del velario è minore rispetto a quella delle zone periferiche quando addirittura non si annulla con la disposizione di elementi opachi. In questo caso per conservare valori ancora accettabili di «fattore di cielo», le striscie luminose anzichè essere orizzontali assumono una più favorevole inclinazione (fig. 1).

Individuata la lunghezza del

(1) Il vetro posto a contatto del dipinto presenta un comportamento speculare e quindi tale da compromettere gravemente la corrispondenza tra ripartizione di luminanza e quella di illuminamento.

segmento BC traccia sul disegno della striscia luminosa, sulla base di considerazioni relative all'esclusione di effetti di abbagliamento verificabile quando l'asse

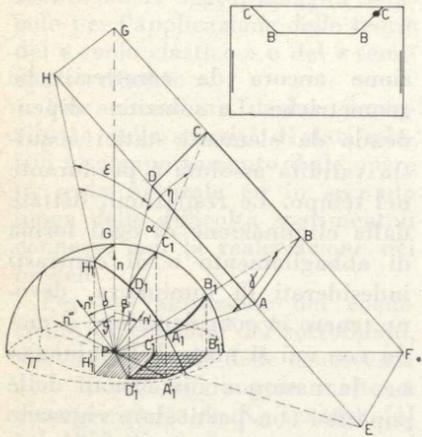


Fig. 1 - Costruzione grafica secondo il metodo di Lambert per determinare l'illuminamento nel punto P del piano utile, prodotto da una finestra rettangolare di contorno $ABCD$.

visuale si sovrappone alla direzione di riflessione regolare, l'inclinazione è determinabile attraverso la condizione che vuole la superficie di pittura isofota. In moltissimi casi la risposta che il quadro fornisce in queste condizioni di illuminazione, è di piena soddisfazione per un osservatore il cui organo visuale, lo si ricordi, valuta le grandezze fotometriche con un grado di approssimazione abbastanza modesto.

A questo punto si ritiene utile esporre un metodo che attraverso la condizione della quasi isofotia suggerisca l'appropriata inclinazione da dare all'elemento luminoso superficiale. L'illuminamento in P su π dovuto alla striscia rettangolare uniformemente difondente $ABCD$ è, come noto, proporzionale all'area quadrettata in figura. Essa risulta originata dalla proiezione sul piano π del quadrato sferico $A_1B_1C_1D_1$ a sua volta proiezione centrale sulla sfera della figura luminosa. Orbene tale area tratteggiata può essere pensata ottenuta dalla differenza tra la proiezione del quadrato sferico $A_1B_1C_1H_1$ e quella del minore $C_1D_1H_1G_1$ il che por-

ta ovviamente a considerare l'effetto luminoso della sorgente reale come differenza di quelli causati da due sorgenti fittizie di contorno rettangolare $ABGH$ e $CDHG$ rispettivamente. Ora l'apporto di ciascuna sorgente ausiliaria sia scomposta, per comodità di calcolo, in due parti corrispondenti alle proiezioni dei settori circolari PH_1A_1 e PA_1B_1 per la prima, e PH_1D_1 e PD_1C_1 per la seconda.

Si potrà scrivere adunque:

$$\begin{aligned} \text{Area}_{A_1'B_1'C_1'D_1'A_1'} &= \\ &= \text{Area}_{PH_1'D_1'A_1'B_1'C_1'P} - \\ &- \text{Area}_{PH_1'D_1'C_1'P} = \\ &= \text{Area}_{PH_1'A_1'P} + \\ &+ \text{Area}_{PA_1'B_1'C_1'P} - \\ &- \text{Area}_{PH_1'D_1'P} - \\ &- \text{Area}_{PD_1'C_1'P} \end{aligned}$$

che, espressa in funzione dei parametri angolari $\alpha, \beta, \gamma, \delta, \varepsilon, \eta, \theta$, diviene:

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \alpha \cos \beta + \frac{1}{2} \gamma \cos \delta - \\ - \frac{1}{2} \varepsilon \cos \beta - \frac{1}{2} \eta \cos \theta = \\ = \frac{1}{2} [(\alpha - \varepsilon) \cos \beta + \gamma \cos \delta - \eta \cos \theta] \end{aligned}$$

avendo indicato con $\alpha, \gamma, \varepsilon, \eta$ le aperture dei settori circolari di raggio unitario e con β, δ, θ gli angoli che la normale π forma con le normali ai piani PAD, PAB e PCD rispettivamente.

Dalla (1) deriva l'espressione dell'illuminamento E su π in P che vale:

$$E = \frac{1}{2} L [(\alpha - \varepsilon) \cos \beta + \gamma \cos \delta - \eta \cos \theta]$$

essendo L la luminanza della superficie emittente.

Stabilite le dimensioni della sorgente, è possibile predeterminare, dopo alcuni tentativi (ad es. seguendo il criterio che vuole uguali gli illuminamenti a quote pari ad $1/4$ e $3/4$ dell'altezza del dipinto, contate a partire da uno dei suoi bordi orizzontali), l'inclinazione della striscia che, a parità di altre condizioni, realizzi una distribuzione ottimale di flusso luminoso, il che, lo si ripete,

è una valida condizione di buona esposizione attese le caratteristiche geometriche e fotometriche dell'elemento vetrato di soffitto.

Per la parte centrale del soffitto il metodo di calcolo si presenta più semplice e pertanto non viene qui esposto. Più delicata è viceversa la determinazione della sua luminanza affinché si evitino effetti di abbagliamento. È ovvio che il problema deve essere risolto globalmente tenendo conto delle caratteristiche superficiali dei dipinti se vetrati o no, se di piccole dimensioni o di grandi, ecc. Per la moltitudine dei fattori che intervengono non è infrequente il caso in cui il giusto grado di opacità sia ottenuto sperimentalmente con successive approssimazioni stendendo a strati della polvere di talco.

La soluzione di cui è stato fatto cenno denominata « a vasca », con il suo fondo più o meno opaco, esige che i quadri siano posti in corrispondenza delle superfici utili di progetto ordinariamente coincidenti con le pareti perimetrali²; per questo essa bene si adatta ad ambienti a pianta rettangolare con rapporti di lati tali da eliminare la zona centrale che per essere troppo lontana dalle pareti non è frequentata dai visitatori.

Da queste considerazioni si osserva che l'illuminazione dall'alto « a vasca » si rivela efficiente e vantaggiosa quando la buona utilizzazione del locale è conseguita interessando per l'esposizione solo le pareti laterali o piani paralleli ma pur sempre molto vicini ad esse. Per locali a pianta rettangolare con una dimensione molto piccola rispetto all'altra (è il caso dalle gallerie tradizionali) una valida soluzione è offerta da una copertura interamente vetrata di

(²) L'autore ritiene che in alcuni casi il piano utile possa convenientemente essere discosto dalla parete di fondo al fine di evitare, quando la vasca ben s'intende sia stata progettata in previsione di ciò, che l'osservazione del dipinto, di solito molto scuro, sia ostacolata dalla eccessiva luminanza dell'intorno.

uniforme fattore di trasmissione, a botte di opportuna curvatura e concavità rivolta verso il basso. In questo caso la componente diretta dell'illuminamento sui dipinti è in massima parte attribuibile alla striscia d'imposta più lontana. In grandi locali il soffitto a cassettoni con elementi in vetro traslucido permette di conseguire dei vantaggi consistenti in una grande libertà nella scelta degli schemi distributivi.

Queste caratteristiche di elasticità sulla disposizione dei dipinti e quindi sui percorsi e zone di sosta dei visitatori, dipendono dalle proprietà geometriche e fotometriche della sorgente e quindi da un fatto puramente illuminotecnico.

È esso infatti che permette di assimilare qualunque setto verticale in piano utile e di rendere indipendente l'esposizione dal suo orientamento e dalla sua posizione quando si vogliono trascurare le perturbazioni dovute al contorno.

La grande superficie interessata all'emissione propone una illuminazione prettamente adirezionale ed ammette quindi, nella molteplicità delle incidenze, anche quelle che potrebbero dar luogo a disturbi visuali. Gli effetti, già piccoli in partenza per l'esiguità delle potenze portate dalle direzioni critiche, possono essere praticamente annullati quando l'oculazione del progettista affidi alle superfici vetrate luminanze non superiori ad un certo valore in concordanza del resto con criteri di buona conservazione che vogliono livelli di illuminamento utile limitati. A questo punto dovrebbero essere ripetute quelle considerazioni, altrove esposte, sulla idoneità della illuminazione adirezionale a realizzare sui dipinti, quando alcune precauzioni siano prese, ripartizioni di luminanza buone e poco sensibili alla posizione del punto di osservazione. Comportamento questo che si differenzia da quello proprio alla illuminazione direzionale per la quale

sono sufficienti piccoli spostamenti del visitatore per mettere il sistema di esposizione fuori « del passo ».

Dalla illustrazione critica dell'impianto discendono conseguenzialmente altri due vantaggi: la estensione notevole della zona di osservazione e l'eliminazione delle ombre portate dalle cornici. L'unico elemento sgradevole, ma non essenziale, risiede in quel senso di freddezza monotona che sempre accompagna l'eccessiva uniformità del campo visuale, senso che può essere combattuto con un discreto condizionamento cromatico d'ambiente. Si accenna brevemente ad altri tre sistemi di illuminazione naturale dall'alto con introduzione laterale della luce.

Essi sono il sistema a *claire-voie* in cui le striscie luminose occupano la parte alta della parete immediatamente sotto il soffitto; con questo sistema gli ambienti di esposizione risultano di notevole altezza per evitare che sui dipinti si proiettino le ombre degli osservatori. Gode del tipico vantaggio, proprio all'introduzione laterale della luce, che consiste nella possibilità di uno sviluppo a più piani dell'edificio. La soluzione a lanternone riduce l'altezza dell'ambiente, riproduce una ancor accettabile distribuzione di flusso sui dipinti ma è adottabile per edifici ad un solo piano.

Il metodo Séager porta un ribassamento del soffitto nella zona centrale onde creare una finestra continua verticale e parallela alla parete di osservazione. Precorre il più razionale sistema a vasca, già descritto, e gode in parte dei vantaggi di questo nel mantenere un basso valore di illuminamento al pavimento. Tuttavia è criticabile per quanto riguarda la distribuzione della luce la cui inidoneità si manifesta soprattutto per i dipinti di grandi dimensioni. Le figure 2 presentano le dimensioni richieste da questi tre diversi sistemi di illuminazione a luce naturale con angolo di incidenza più favorevole, senza riflessione della sorgente luminosa.

sione della sorgente luminosa. Con altri sistemi la luce piove dall'alto filtrando attraverso lucernari a lamelle orientabili o fisse. Assicurano una direzionalità e alcune volte una regolazione dell'illuminamento e l'intercettazione della energia calorifica.

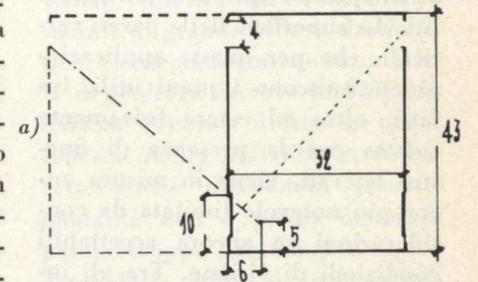


Fig. 2-a - Sistema a Claire-Woie.

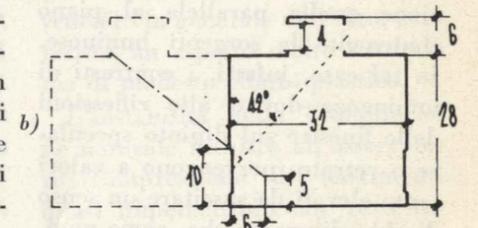


Fig. 2-b - Sistema a lanternone.

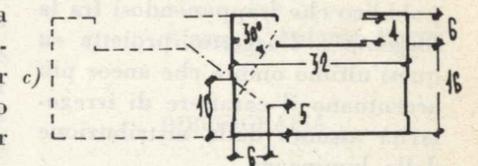


Fig. 2-c - Sistema a Séager.

Fig. 2 - Diagramma comparativo delle altezze richieste dai diversi sistemi d'illuminazione a luce naturale con angolo d'incidenza più favorevole, senza riflessione della sorgente luminosa. Costanti: larghezza della galleria; altezza del campo di esposizione; distanza dell'occhio dal muro; superficie dell'apertura: 25% della superficie del pavimento (da M. F. Roggero).. N.B. Le misure sono date secondo il sistema anglosassone (ad es. 5' = m. 1,52).

2) L'illuminazione naturale laterale nelle pinacoteche.

È il sistema di illuminazione che ha visto la nascita degli antichi musei ricavati in palazzi signorili preesistenti, i quali, costruiti per tutt'altro scopo, hanno dimostrato la loro totale insuffi-

cienza soprattutto nel caso di grandi sale. L'aspetto negativo, da imputarsi esclusivamente ad una irrazionale illuminazione naturale, è andato poi accentuandosi quando, con il passaggio graduale da collezioni private a raccolte pubbliche sempre più ricche, si presentarono più urgenti esigenze di spazio e quindi di sfruttabilità. La superficie delle pareti verticali, che per queste applicazioni costituiscono i piani utili, infatti, oltre ad essere fisicamente ridotta per la presenza di finestre laterali, viene in misura ancor più notevole limitata da considerazioni su ancora accettabili condizioni di visione. Tra gli inconvenienti più gravi si ricordano quelli che si verificano quando sia utilizzata quale parete di esposizione quella parallela al piano contenente le sorgenti luminose. In tal caso, infatti, i contrasti di luminanza dovuti alle riflessioni delle finestre sul dipinto speculare o vetrato, pervengono a valori tanto elevati da suscitare un senso di abbagliamento che, come noto, riduce notevolmente la capacità di percezione visuale. A ciò si aggiunga ancora la presenza del pubblico che frapponendosi fra la sorgente e l'oggetto, proietta su quest'ultimo ombre che ancor più accentuano il carattere di irregolarità assunto dalla distribuzione della luminanza.

Se le pareti parallele al muro perimetrale non si presentano favorevoli ad una efficace esposizione di dipinti per i motivi poc'anzi esposti di inaccettabile ripartizione di luminanza sulla superficie pittorica, altrettanto può dirsi per quella contenente le finestre anche se le cause sempre di ugual natura sono tuttavia di indole diversa. In questo ultimo caso non è criticabile la ripartizione della luminanza, che è anzi molto corretta sul dipinto, quanto il fortissimo contrasto che si istituisce tra il valor medio di luminanza del quadro e quello delle finestre anche se corredate di dispositivi attenuatori. Il concetto può essere

più efficacemente espresso osservando che il dipinto in queste infelici condizioni espositive si presenterà tutto nero essendosi l'occhio dell'osservatore, per quel mirabile sistema di autoregolazione che possiede, insensibilizzato e conseguentemente adattato ai livelli elevati di luminanza delle finestre.

Un miglioramento di esposizione può essere ottenuto, ancora in illuminazione naturale laterale, quando si adotti una finestratura continua. In tal modo la parete frontale, anche se non diffondente si presenta, con buona approssimazione, di uniforme luminanza ed ancora le ombre portate dei visitatori tendono, per il grande sviluppo della superficie emittente, a ridursi in favore delle buone condizioni di visione. I vantaggi conseguibili con tale sistema possono essere accentuati quando la striscia continua, anziché occupare le parti basse ed intermedie della parete perimetrale, sia trasferita in alto fin sotto il soffitto. Si riproduce in tal modo la sezione tipo di uno *shed* con elemento vetrato verticale o ancor meglio inclinato. Con tale disposizione, ben difficilmente la sorgente primaria entra nel campo visuale dell'osservatore con la conseguenza di escludere gli indesiderabili effetti dell'abbagliamento indiretto e susseguente collegato al movimento naturale del capo. A ciò si aggiunga lo spostamento dell'ombra portata dall'osservatore sul pavimento o sulla parte più bassa della parete di esposizione. Quando la superficie vetrata è inclinata non è più possibile però disporre di più ordini di piani senza un opportuno arretramento. Ad una introduzione laterale di luce, riflessa da opportune volte, s'ispira la soluzione proposta da A. Lurçat. Essa consente una più razionale illuminazione dall'alto nell'interno, la sovrapposibilità dei piani e una vantaggiosa azione filtrante della energia solare quando le superfici riflettenti siano trattate con so-

stanze speciali. Non facendo intervenire superfici diffondenti in illuminazione laterale, alcuni sistemi (Mollino — concorso per Galleria d'Arte Moderna di Torino; — sistema « Arthel ») poggiano il loro principio di funzionamento sulla direzionalità dei raggi solari.

Questi, per il primo dei due sistemi accennati, colpiscono lamine speculari orientabili che li riflettono lungo una prefissata direzione; per il secondo un soffitto riflettente non diffondente sagomato a prismi che rinvia successivamente la luce direzionata sulle superfici utili.

A prescindere dalla delicatezza dell'organo predisposto alla regolazione che deve sempre, al variare dell'altezza del sole, assicurare con rigore la condizione geometrica, il sistema entra in difetto quando, con cielo coperto, introduce nelle prefissate direzioni irrilevanti flussi luminosi. Situazione questa che deve assumersi quale importante ipotesi progettuale per la durata rilevante con cui questo fenomeno meteorologico si mantiene e quando siano interessate le atmosfere purtroppo inquinate dei grandi centri urbani.

Questi cenni giustificano la tendenza comune ad impedire l'ingresso diretto ai raggi solari negli ambienti o attraverso elementi diffondenti in posizione razionale nella loro interdipendenza con il dipinto e l'osservatore, oppure attraverso elementi riflettenti per necessità variabili al fine di verificare all'interno alcune essenziali condizioni geometriche.

Di questa tendenza si menzionano alcuni esempi i quali si avvalgono di facciate di ambienti superiori per fruire di una componente indiretta di luce naturale. A prescindere dal sistema di illuminazione che può essere dall'alto o laterale od ancor tale da possedere il carattere di entrambi, va sottolineato il conseguimento della rottura della monotonia fredda ed impersonale di

una illuminazione da nord (diffusa da cielo sereno) con l'apporto di componenti che, già calde perché dirette, possono accentuare tale carattere con una propria decorazione dell'esterno muro riflettente. L'esempio più chiaro di applicazione di questo principio è offerto dal « muro reflector » proposto da M. L. Moya per il museo di Madrid.

3) *L'illuminazione naturale più generalmente museale.*

Ai punti 1 e 2 sono stati illustrati metodi atti alla risoluzione del problema illuminotecnico che interessa più direttamente l'esposizione, in luce diurna, di dipinti realizzati con diverse tecniche pittoriche sempre però presentanti superfici con buona approssimazione continua.

A queste, inoltre, è stato riconosciuto un comportamento speculare, ancor più accentuato quando sia presente il vetro di protezione, che costituisce, come già detto, un elemento che fortemente condiziona la soluzione di questi problemi. È ovvio che queste considerazioni non sono applicabili a certe pitture contemporanee d'avanguardia, in cui si lavora con coltello e paletta; per esse, assimilabili a basso rilievi può essere vantaggiosa una illuminazione in cui la componente direzionale della luce colpisca il piano medio sotto angoli d'incidenza molto grandi. Si ritiene necessario a questo punto aggiungere alcuni cenni sui criteri espositivi degli arazzi, delle opere scultoree a tutto tondo e a rilievo.

3 a) *L'illuminazione naturale degli arazzi.*

Queste note integrative, a complemento della impostazione generale già precedentemente segnalata, sono giustificate dalla natura delle superfici quasi sempre libere da vetro e per la loro tessitura favorevole alla diffusione della luce. Sotto l'aspetto espositivo l'impegno richiesto è dunque me-

no grave si che è sufficiente, in generale, assicurare l'uniformità del flusso luminoso incidente. Considerando l'arazzo quale elemento intermedio, sotto il profilo fisico, tra il dipinto bidimensionale e lo stacciato, non è indifferente la costituzione della luce nelle sue componenti diffusa e direzionale.

L'esperienza raccomanda, infatti, un giusto equilibrio fra queste componenti e che, in alcuni casi, certi particolari della struttura dell'arazzo possono essere messi in risalto solo con l'azione, anche modesta, di luce quasi radente. La cura della conservazione svolge un suo ruolo primario sì da informare la tecnica espositiva.

Per non aggravare lo stato di precaria conservazione in cui viene a trovarsi una buona parte di arazzi, è consigliabile un basso livello di illuminamento che, secondo Thomson, non deve superare 50 lux.

In generale gli ambienti devono risultare in penombra e solo negli intervalli di osservazione potrà intervenire una illuminazione individuale intermittente.

Poiché il livello di illuminamento è una funzione crescente della temperatura dal colore, per realizzare l'illuminazione generale di penombra è consigliabile l'impiego di schermi con compito di assicurare un controllo quantitativo e qualitativo della luce naturale.

3 b) *L'illuminazione naturale delle opere scultoree.*

La soluzione del problema è da ricercarsi nella giusta proporzione fra la componente di luce diffusa e direzionale. Una risposta ideale sarebbe suggerita dalla luce naturale all'aperto, quando a cielo sereno, si verificano le accennate condizioni. Se una luce totalmente diffusa è insoddisfacente per la sua incapacità di mettere in evidenza il carattere tridimensionale dell'opera, una luce

totalmente direzionale produce chiaroscuri molto accentuati che talora compromettono la naturalezza espressiva. La luce diffusa, permettendo una visione analitica localizzabile in ogni parte, soddisfa meglio le esigenze di una osservazione omogenea, mentre la luce direzionale si adatta ad una visione sintetica con effetti chiaroscurali di grande rilievo drammatico. Conseguentemente in una sala di scultura occorre una illuminazione generale diffusa su cui si innesta quella individuale, di caratteristiche direzionali secondo modalità non a priori definibili perché troppo strettamente dipendenti dalla natura di ogni singola opera. La direzione della luce deve risultare uniforme per gli oggetti esposti. La luce diurna, provenendo in generale dall'alto, conferisce un aspetto molto naturale ma di modesto effetto plastico.

L'instabilità della illuminazione naturale fornisce all'osservatore l'impressione di movimenti quasi impercettibili che tutti insieme trasfondono un senso di vitalità. Essa è forse un elemento essenziale per una piena comprensione dell'opera d'arte.

Giuseppe Antonio Pugno

BIBLIOGRAFIA

- CODEGONE C., *Problemi di illuminazione*, Ed. V. Giorgio, Torino, 1964.
- PUGNO G. A., *Questioni di illuminotecnica nell'ambito museale*, in « Atti e Rassegna Tecnica », Torino, 1968.
- GAYMARD L., *Les oeuvres d'art sous la lumière*, in « Lux », marzo 1965, n. 32.
- AUTORI VARI, in « Riv. Int. di Illum. », nn. 5-6, anno XIII. Tale numero è dedicato alla illuminazione dei musei.
- ROGGERO M. F., *Musei e gallerie, Architettura pratica di P. Carbonara*, Utet, Torino, 1961.
- DE FELICE E. B., *Luce - Musei*, Ed. De Luca, Roma, 1966.
- ALOI R., *Musei, architettura tecnica*, Milano, 1962.
- THOMSON, *Studies in Conservation*, 6, 1961.

La depurazione dei gas di scarico degli impianti termici (*)

PAOLO ANGLÉSIO esamina alcuni metodi di valutazione delle particelle solide contenute nelle emissioni degli impianti termici: metodi ponderali, per ricavarne concentrazioni locali e medie nei condotti, e metodi ottici, con la osservazione diretta della corrente gassosa o di campioni depositati su carta da filtro. Particolare attenzione dedica alla misura della concentrazione locale mediante sonda, secondo le prescrizioni del «Regolamento per l'esecuzione della legge 13 luglio 1966, n. 615, recante provvedimenti contro l'inquinamento atmosferico, limitatamente al settore degli impianti termici»: vengono al riguardo riportati alcuni dati sperimentali. L'A. espone i concetti fondamentali e le difficoltà pratiche di alcune norme di prova per depuratori di fumo.

Introduzione.

Sono ormai da tempo oggetto di studio gli effetti e le cause della immissione nell'aria di sostanze estranee. Considerazioni di salute pubblica e conservazione dei beni materiali, rendono evidente la necessità di limitare l'inquinamento atmosferico: il significato di questo termine, ormai usatissimo, si può intendere come: «stato conseguente alla immissione nell'atmosfera di sostanze di qualsiasi natura in condizioni tali da alterare la salubrità dell'aria e da costituire pregiudizio diretto o indiretto per la salute dei cittadini o danno ai beni pubblici o privati» [1]: si noti che questo «stato» l'opinione pubblica lo interpreta finora in modo soggettivo e presumibilmente molto variabile da persona a persona.

È noto che il problema dell'inquinamento atmosferico è molto vasto: partendo dall'osservazione di svariati effetti (segnalati soprattutto dalla medicina), si deve risalire alla determinazione e alla eliminazione delle relative cause: a questo scopo è di fondamentale importanza controllare la distribuzione delle fonti di inquinamento e l'entità delle relative emissioni; un notevole contributo al risanamento dell'aria è l'applicazione di provvedimenti anti-inquinamento, sia pure limitatamente agli impianti termici.

Nel regolamento di legge [1] si pongono dei limiti alle emissioni: questi non devono essere superati, usando combustibili adatti, controllando efficacemente l'andamento della combustione ed eventualmente usando dispositivi di depurazione, purché questi non siano a loro volta fonte di inquinamento.

(*) Ricerca eseguita con il contributo finanziario del C.N.R. nell'ambito del Gruppo: Determinazione di parametri caratteristici di depuratori di fumi.

namo delle acque. I residui solidi della combustione completa di sostanze combustibili vengono definiti ceneri; i gas di combustione, le eventuali ceneri e particelle liquide costituiscono i fumi.

Depurazione e valutazione dell'inquinamento.

I depuratori trattano le emissioni, abbattendovi con azione opportuna le particelle contenute: l'esame dei metodi di depurazione industriale permette contemporaneamente di indicare alcuni metodi di valutazione dell'inquinamento, tra quelli che prevedono il prelievo di un campione, mentre altri si fondano solo sull'osservazione dei fumi (metodi ottici, ad esempio quello di Ringelmann).

I depuratori elettrostatici caricano le particelle e le sottopongono all'azione di un campo elettrico; nonostante siano di grande costo iniziale e di uso pericoloso, sono largamente adottati nelle centrali termoelettriche; ne esistono anche versioni adatte per campionamenti dell'aria atmosferica, per l'esame microscopico delle particelle captate e per prelievi su gas di combustione.

I depuratori ad inerzia usati industrialmente sono le camere di decantazione e soprattutto i cicloni, nei quali le particelle sono sottoposte all'azione di un campo di forze centrifughe: sono dispositivi relativamente semplici, senza parti in movimento; in applicazioni di laboratorio sono raramente usati da soli, più spesso accoppiati con filtri. Sempre per prelievi sono usati altri separatori ad inerzia: in alcuni il getto d'aria inquinata è fatto passare in un liquido (impingers), in altri è fatto urtare contro uno o più ostacoli di forma e disposizione opportuna (impactors): questi ultimi oltre che alla sepa-

razione, servono alla classificazione delle particelle secondo i diametri; unicamente riservati a questo ultimo scopo sono i setacci, i classificatori centrifughi e gli elutriatori [4], [5], [2].

I depuratori ad umido abbattano le particelle sottoponendole all'azione di goccioline di liquido opportunamente nebulizzato: nei limiti previsti dal regolamento di legge già citato [1] sono ora vietati. Mentre i depuratori ad umido non trovano applicazione per prelievi, unicamente destinati a usi di laboratorio sono i precipitatori termici, i quali sfruttano le azioni del gradiente termico prodotto da un filo caldo: questi tipi di precipitatori sono adatti per raccogliere particelle sub-microniche da ridotti volumi d'aria, depositandole su vetrini per l'esame microscopico; ne esistono attualmente realizzazioni adatte a raccogliere campioni maggiori.

Ampie notizie sui depuratori e i metodi di campionamento si trovano nei testi specializzati [6]; di particolare interesse, soprattutto per quanto riguarda i prelievi e la valutazione degli inquinamenti, sono i testi di meteorologia [7], e i testi e gli articoli pubblicati dalle Cliniche del Lavoro [8] e dalle Associazioni degli Igienisti [9].

I filtri sono usati attualmente in impianti industriali soprattutto per il condizionamento dell'aria; diffusissima è la loro applicazione nel campionamento dei gas di combustione: due specifiche applicazioni sono previste dal regolamento di legge già citato [1].

Nell'apparecchiatura prevista per i prelievi ponderali, la sonda contiene un cestello portafiltro con materiale filtrante in lana di silice. Al fine di ottenere misure attendibili è necessario che il filtro abbia una efficienza ponderale grande e comunque nota;

a scopo di verifica si è costruito un filtro con lo stesso spessore e la stessa densità apparente della lana di silice usata nella cartuccia della sonda: se ne è determinata l'efficienza ponderale nell'impianto di fig. 1, adatto per prove ponderali su filtri con sezioni utili di 250 x 250 mm. [10].

Con concentrazione di 0,1 g/m³ (a 20 °C), si ottiene dopo circa 180 minuti un aumento della resistenza iniziale di 1/3, passando da 60 a 80 mmH₂O di caduta di pressione, alla velocità di attraversamento media di 1 m/sec. L'efficienza ponderale assume il valore di circa 0,98 con entrambe le polveri usate, di diametro medio 4,5 e 17,3 μ rispettivamente, costituite da ossido di alluminio [10]. Nell'impianto è applicato un dispositivo di regolazione per mantenere costante la portata fluida al variare della resistenza del filtro: comprende un trasduttore di pressione a) che rileva la pressione differenziale al diaframma b), un dispositivo di regolazione c), un servomotore d), e infine una resistenza variabile e) di regolazione del motore a corrente continua che comanda il ventilatore. Pur tenendo conto delle notevoli diversità tra le condizioni reali e quelle di prova, è possibile prevedere che l'efficienza ponderale del materia-

le filtrante usato nella sonda sarà pienamente soddisfacente per l'uso a cui è destinato.

Un filtro di carta viene usato nella pompa di Bacharach, con la quale si prelevano in ogni prova gli stessi volumi di gas inquinato, facendoli passare attraverso carta da filtro opportuna: la macchia corrispondente si confronta con quelle campione che costituiscono appunto la scala di Bacharach.

Metodi di prova per depuratori.

Prove di efficienza ponderale sono state eseguite in un impianto di prova (fig. 2) per depuratori di fumo [11]; il metodo usato fa riferimento, per quanto possibile, alle disposizioni del regolamento di legge già citato [1], e le estende opportunamente alle necessità attuali, secondo quanto prescrivono le norme americane A.S.M.E. [2] e quelle inglesi B.S. [3]; nel seguito si indicheranno per semplicità con [1], [2], [3] i metodi suddetti.

In ogni caso è necessario saper valutare la concentrazione media degli incombusti nella sezione di un condotto. Si suddivide questa in aree uguali (8 nel caso attuale, data l'area della sezione e l'andamento delle velocità), [2]; si misurano in queste le velocità nei punti di mezzo e negli stessi si eseguono prelievi con l'apparec-

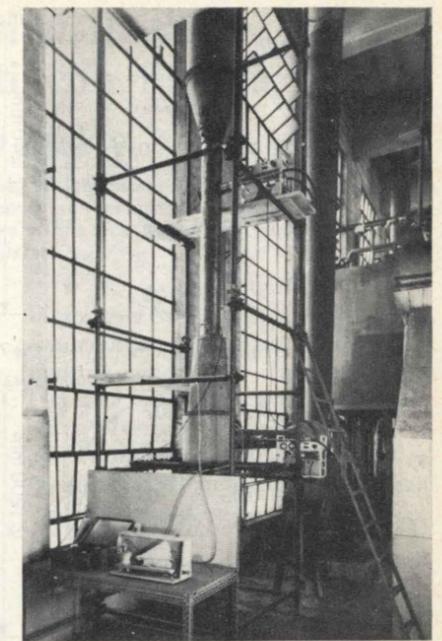


Fig. 2 - Depuratore e impianto di prova.

chiatura regolamentare, secondo le modalità indicate; per raggiungere punti di prelievo posti su diametri ortogonali, utilizzando il medesimo attacco, si sono ruotati di 90° i condotti a monte e valle del depuratore; oppure si potrebbero fare più fori di attacco [3]. Il controllo della velocità nel punto di prova prima del prelievo, costituisce oltre che il controllo dell'isocinetismo, anche quello della costanza della portata; nel caso di fig. 2 un ulteriore controllo della portata si ha attraverso il valore della caduta di pressione dei fumi nel depuratore (tipo ad umido); è possibile, almeno negli impianti di prova, inserire un diaframma di misura della portata.

I risultati ottenuti sono riportati (fig. 3) in corrispondenza ai punti di misura: le temperature medie a monte e valle del depuratore sono rispettivamente 148 °C e 97 °C; le concentrazioni (g/m³) sono riferite alle condizioni di 15 °C, 760 mmHg e gas secco. Si vede chiaramente l'effetto della gravità nella sezione a monte, situata in condotto orizzontale: questo effetto è nel caso in esame, molto accentuato dalla bassa velocità della corrente fluida. Le norme [3] prescrivono velocità non minori di 15 ft/sec; in [1] non si trova un riferimento esplicito su questo argomento.

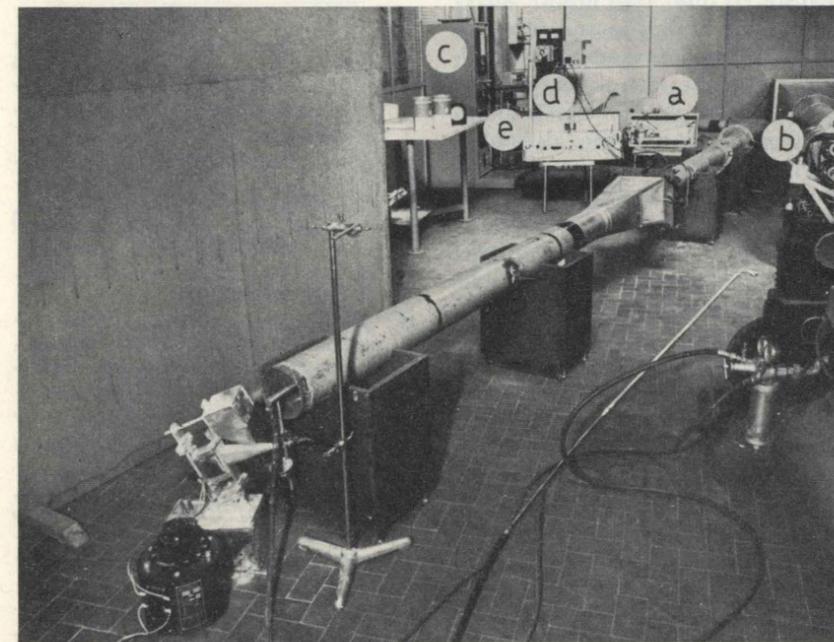


Fig. 1 - Impianto di prova per filtri, con sistema di regolazione della portata d'aria.

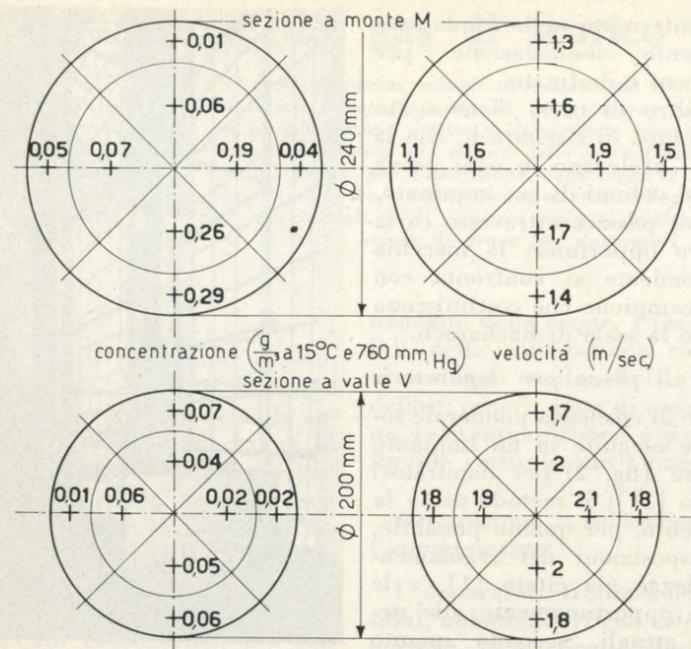


Fig. 3 - Velocità e concentrazione nelle sezioni di prova.

La determinazione di tutte le concentrazioni locali ha richiesto un periodo di tempo piuttosto lungo, e i risultati ottenuti vanno riferiti a condizioni medie, interpretandoli con opportune cautele.

La concentrazione in una data sezione si ottiene, in questo caso, note le concentrazioni e le velocità locali; si può ottenere più speditamente senza valutare le concentrazioni locali, eseguendo prelievi successivi nei punti di prova senza cambiare il filtro, e sommando i volumi di gas aspirati dalla sonda: in [1] è previsto questo metodo per sezioni di area superiore a 1600 cm², eseguendo tre prelievi parziali consecutivi in punti opportuni.

Stabilito il metodo di misura della concentrazione, si può valutare l'efficienza ponderale ϵ del depuratore, noti i valori delle concentrazioni a monte M e a valle V ; nel caso in esame si ha:

$$M = 0,13 \text{ g/m}^3;$$

$$V = 0,04 \text{ g/m}^3;$$

$$\epsilon = (M - V)/M \approx 0,7.$$

Si potrebbe anche valutare la efficienza ponderale nota la concentrazione a monte o a valle, la portata dei fumi e la massa di particelle trattenute dal depuratore. Solo in speciali impianti di prova si può prevedere di filtrare successivamente tutta la portata a monte e a valle dei depuratori:

in pratica si farebbe un « prelievo » totale invece degli attuali prelievi locali: le difficoltà relative a questi metodi ne restringono l'uso a laboratori specializzati [12]. Altrettanto vale per i metodi di classificazione delle particelle raccolte, soprattutto al di sotto dei 44 μ [2], [4], [5].

Conclusioni.

A seguito di considerazioni teoriche e delle prove sperimentali eseguite, si può concludere affermando che il limite massimo legale della concentrazione di particelle solide è stato scelto opportunamente e si può determinare, sia pure con qualche difficoltà, con l'apparecchiatura regolamentare; potrebbe peraltro essere previsto che le determinazioni ponderali fossero frutto di più di un prelievo (quando questo viene eseguito in un punto solo) e di più di una passata (quando si fanno i tre prelievi parziali consecutivi). A questo scopo, nel caso di camini a sezione circolare, si potrebbe, quando è previsto un attacco anche nella parte superiore, costruirlo con asse perpendicolare a quello sistemato alla base.

Per quanto riguarda gli indici dei fumi, è senz'altro auspicabile che questi servano a segnalare i casi in cui è necessario eseguire la

misura ponderale di controllo, ma si ritiene opportuno che vengano diminuiti i relativi limiti adeguandoli a quanto previsto da norme italiane e straniere relative alla fumosità di prodotti della combustione di impianti termici: nelle prove indicate nel paragrafo precedente non si è mai superato nella tubazione a monte del depuratore, il valore tre dell'indice di Bacharach (*).

Paolo Anglesio

(*) È da osservare che la corrispondenza fra concentrazione e scale empiriche, accettata dal § 13-4 della legge, è apparsa scientificamente poco fondata.

L'autore desidera ringraziare il Prof. Cesare Codegone, Direttore dell'Istituto di Fisica Tecnica, per i consigli ed i suggerimenti dati nello svolgimento di questo lavoro.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Regolamento per l'esecuzione della legge 13 luglio 1966, n. 615, recante provvedimenti contro l'inquinamento atmosferico, limitatamente al settore degli impianti termici - Supplemento ordinario alla « Gazzetta Ufficiale » n. 6 del 9 gennaio 1968, parte prima.
- [2] A.S.M.E., PTC 21-1941, *Dust separating apparatus*.
- [3] B.S. 893:1940 - *Method of testing dust extraction plant and the emission of solids from chimneys of electrical power station*.
- [4] A.S.M.E., PTC 28-1965, *Determining properties of fine particulate matter*.
- [5] A.S.M.E., PTC 27-1957, *Determining dust concentration in a gas stream*.
- [6] A. C. STERN, *Air pollution*, Academic Press, New York and London, 1962.
- [7] E. KLEINSCHMIDT, *Handbuch der Meteorologischen Instrumente*, Springer, Berlino, 1935.
- [8] ZURLO, Clinica del lavoro dell'Università di Milano, *Nouveau pneumo-classificateur pour poussières fines*, Communication présentée au Quatrième Colloque sur les poussières, Institut National de Sécurité, Paris, 28-29-30 mars 1957.
- [9] *Air sampling instruments 1967, for evaluation of atmospheric contaminants*, American Conference of Governmental Industrial Hygienists.
- [10] B.S. 2831:1957, *Methods of test for air filters used in air-conditioning and general ventilation*.
- [11] C. CODEGONE, V. FERRO, A. SACCHI, C. LOMBARDI, *Una apparecchiatura sperimentale per la prova dei depuratori di fumi*, in « La Termotecnica », vol. XXI, 1967, pp. 75-80.
- [12] P. ANGLÉSIO, *Esperienze su un depuratore a secco di gas polverosi*, « Atti e rassegna tecnica », Torino, giugno 1968.

L'influenza di piccole variazioni dimensionali della matrice sull'imbutitura di grandi recipienti con flangia

(Considerazioni derivate da un esempio pratico)

LUDMIL KARAGHIOSSOFF in base ad osservazioni fatte su un caso pratico di lavorazione in stabilimento, esamina ed analizza l'influenza di piccole variazioni dimensionali della matrice sull'imbutitura profonda di recipienti con flangia, deduce quindi una espressione analitica che mostra l'influenza dei singoli fattori, indipendentemente dalle particolari condizioni prefissate.

È noto che gli oggetti ottenuti mediante imbutitura profonda di lamiera d'acciaio, non presentano, nei loro dettagli, una precisione dimensionale molto elevata. Di conseguenza, in pratica, si trascura l'influenza della temperatura sull'operazione di imbutitura, cioè non viene considerata la variazione delle dimensioni dell'attrezzo determinata dall'aumento della temperatura che si verifica nel caso di un prolungato lavoro con l'attrezzo stesso.

Nell'imbutitura di grandi recipienti muniti di flangia, è stato notato che nelle prime operazioni di imbutitura, cioè quando la matrice è ancora relativamente fredda, la larghezza della flangia ottenuta risulta sensibilmente minore di quella della flangia ottenuta con matrice riscaldata, cioè dopo un prolungato lavoro con l'attrezzo (fig. 1). Tutte le opera-

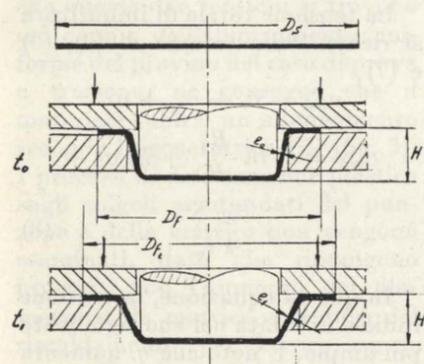


Fig. 1.

zioni sono state effettuate con pressa ad eccentrico a corsa costante ed in condizioni sostanzialmente identiche, cioè con lo stesso materiale e lo stesso lubrificante. È evidente che si è ottenuto un assottigliamento del materiale. Questo fenomeno, a prima vista contraddittorio al primo, difficilmente può spiegarsi con l'aumento della resistenza allo scorrimento nell'estrazione della la-

miera da sotto il premilamiera, cioè con l'aumento del relativo attrito, dato che è stato utilizzato sempre lo stesso lubrificante, mentre l'ordine di grandezza della variazione della temperatura non è tale da modificare sensibilmente le caratteristiche del lubrificante stesso.

La spiegazione del fenomeno di cui sopra deve essere cercata nell'aumento del gioco fra il punzone e la matrice, cioè nell'aumento della dimensione della matrice a seguito del riscaldamento di quest'ultima durante il lavoro. Infatti, con l'aumento della dimensione della matrice, aumenta anche la superficie libera del materiale non compressa dal premilamiera, in particolare nell'imbutitura di recipienti leggermente conici, come nel caso pratico esaminato. Durante l'imbutitura, tale materiale libero si deforma, allungandosi fino a raggiungere — a seguito dell'incrudimento — una resistenza alla deformazione uguale o maggiore della resistenza allo scorrimento della lamiera sotto il premilamiera, scorrimento necessario per l'attuazione del processo. Ciò influirebbe, evidentemente, sulla dimensione della flangia, nel caso di corsa costante della pressa.

Nella fig. 2 sono illustrati gli schemi elementari dello stato di tensione e di deformazione nella zona interessata del materiale assoggettato ad imbutitura profonda.

Come appare evidente dalla fig. 2, l'imbutitura profonda costituisce un processo con stato di tensione complesso, in cui un dato elemento cambia continuamente, durante l'operazione di imbutitura, la forma del suo stato di tensione e di deformazione. All'inizio del processo di imbutitura, un dato elemento del pezzo da imbutire, trovandosi vicino alla estremità della flangia, presenta uno stato di tensione e di deformazione illustrato nella fig. 2 per

la zona AB. La condizione per la deformazione plastica di tale elemento, condizione che determina l'istante del suo passaggio allo stato plastico, può essere espressa con l'equazione di plasticità per la condizione di deformazione piana

$$\sigma_r - \sigma_t = 1,1 \sigma_s, \quad (1)$$

nella quale:

$$\sigma_r = \text{tensione radiale}$$

$$\sigma_t = \text{tensione tangenziale}$$

$$1,1 = \text{coefficiente di Lody}$$

$$\sigma_s = \text{limite di snervamento.}$$

Le tensioni (σ_r e σ_t) nella flangia si calcolano per via analitica, come nella determinazione delle tensioni in un tubo assoggettato a pressione interna, cambiando però il segno delle tensioni stesse. Infatti, nel caso del tubo, la tensione radiale è una tensione di compressione, mentre quella tangenziale è una tensione di trazione. Di conseguenza, si può assumere

$$\sigma_r = 1,1 \sigma_s \ln \frac{R_s}{R} \quad (2)$$

$$\sigma_t = -1,1 \sigma_s \left(1 - \ln \frac{R_i}{R} \right) \quad (3)$$

dove:

R = raggio variabile della flangia

$$(R_s \geq R \geq R_i)$$

R_s = raggio esterno dello sbizzato.

R_i = raggio interno, cioè raggio del punzone.

Dalle espressioni (2) e (3) appare evidente che le tensioni σ_r e σ_t variano col variare del raggio e che sussiste la relazione $R = R_0$ quando le tensioni σ_r e σ_t avranno lo stesso valore. Ciò vuol dire che la tensione media σ_z è uguale a zero (vedi fig. 2) e che con $R = R_0$ esiste la premessa per la condizione di deformazione piana. Ne consegue, evidentemente, che con $R > R_0$ la tensione di compres-

sione sarà maggiore della tensione di trazione, per cui lo spessore del materiale tenderà ad aumentare, mentre nel caso $R < R_0$ la tensione di trazione sarà maggiore di quella di compressione e lo

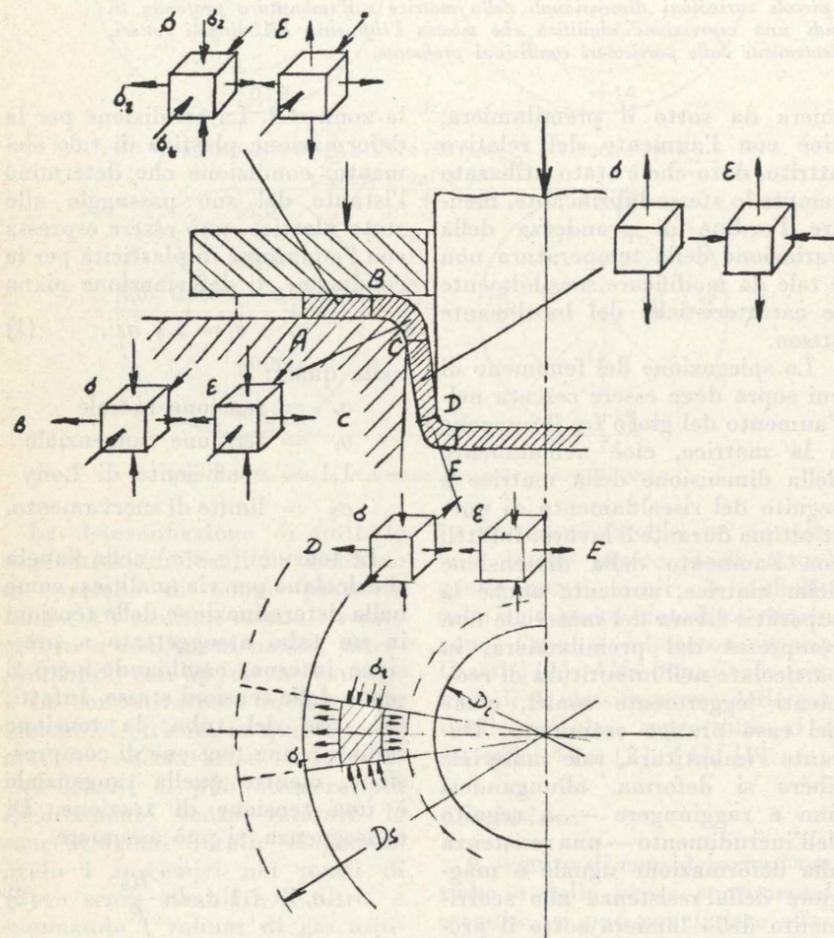


Fig. 2.

spessore del materiale subirà una riduzione.

R_0 può essere facilmente calcolato, uguagliando i valori assoluti di (2) e (3) ed assumendo $R_i = R_s$. Di conseguenza:

$$\ln \frac{R_s}{R_0} = \frac{1}{2}; \quad R_0 = 0,62 R_s \quad (4)$$

Per attuare la deformazione plastica del materiale nella flangia sotto il premilamiera, oltre a raggiungere la necessaria tensione radiale, occorre anche che la forza esercitata per mezzo del punzone sul pezzo da imbutire superi la resistenza alla piegatura plastica del materiale intorno allo spigolo arrotondato della matrice, nonché la resistenza totale determinata dall'attrito fra la lamiera da un

lato ed il premilamiera e la matrice d'altro lato, come pure dall'attrito sullo spigolo arrotondato della matrice.

Notoriamente, la resistenza alla piegatura plastica intorno allo

La tensione generale determinata dall'attrito che deve essere superato, si presta difficilmente ad essere calcolata, anche approssimativamente. In base alla legge d'attrito di Coulomb, ed assumendo una distribuzione uniforme della tensione d'attrito su tutto lo spessore del pezzo da imbutire, si può utilizzare la seguente espressione:

$$\sigma_a = \frac{fP}{\pi R_s S} \quad (6)$$

dove f è il coefficiente d'attrito. Per ottenere la resistenza totale d'attrito, è necessario aggiungere all'espressione (6) anche la resistenza d'attrito fra la lamiera e la matrice all'atto della deformazione del materiale sullo spigolo arrotondato della matrice stessa. Se tale resistenza viene considerata in determinato rapporto rispetto alla resistenza d'attrito della lamiera fra il premilamiera e la matrice, si può utilizzare l'espressione (6), sostituendo il coefficiente f con un altro valore numerico k che rispecchia il sopraddetto rapporto. Il coefficiente k è senza dubbio maggiore di f . In questo caso si ottiene

$$\sigma_{a_0} = \frac{kP}{\pi R_s S} = k_1 \sigma_s \quad (7)$$

La tensione totale di imbutitura si ricava dalla somma di (2), (6) e (7)

$$\begin{aligned} \sigma_{imb} &= \sigma_r + \sigma_{a_0} + \sigma_{fl} \\ \sigma_{imb} &= \sigma_s \ln \frac{R_s}{R_i} + k_1 \sigma_s + \frac{\sigma_s S}{4 r_m} \end{aligned} \quad (8)$$

In questa equazione, la tensione radiale σ_r è data nel suo significato più ampio. È noto che σ_r aumenta dal valore 0 all'estremità esterna del pezzo da imbutire, fino al valore massimo all'estremità interna, cioè dove $R = R_i$.

È evidente che la tensione σ_{imb} deve essere sopportata dalla cosiddetta « sezione pericolosa » del recipiente imbutito, cioè dalla sezione trasversale nel punto D della fig. 2.

Nel caso, in cui $\sigma_{imb} > \sigma_R$ (σ_R = resistenza alla trazione del materiale), il fondo del recipiente si staccherà e l'operazione di imbutitura non potrà essere effettuata.

$$\sigma_{fl} = \frac{\sigma_s S}{4 r_m} \quad (5)$$

dove:

S = spessore del materiale
 r_m = raggio di arrotondamento dello spigolo della matrice.

Per l'attuazione della deformazione plastica nell'imbutitura profonda, la tensione nel punto C (fig. 2) deve essere uguale alla tensione di imbutitura ($\sigma_c \geq \sigma_{imb}$), mentre la tensione nel punto D non deve superare la tensione alla quale si manifesta uno strozzamento nella prova a flessione ($\sigma_D < \sigma_g$). Ciò appare particolarmente evidente se si considera l'imbutitura di un recipiente conico, in cui le tensioni lungo CD

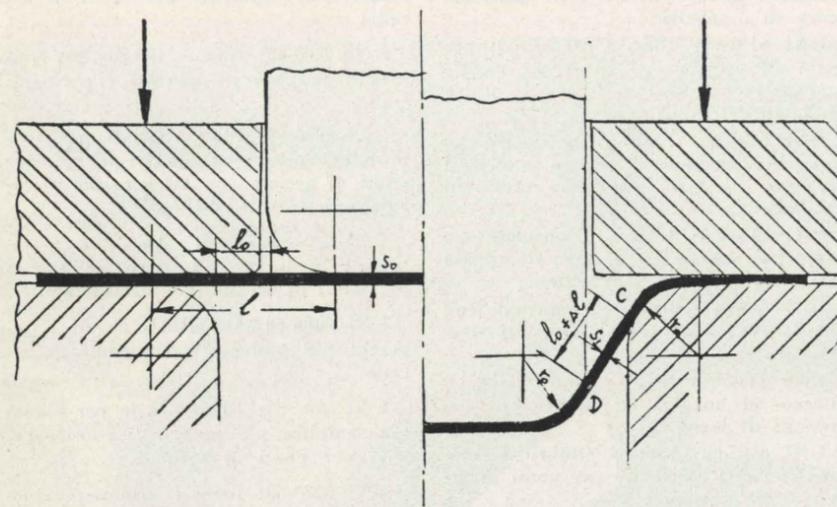


Fig. 3.

risultano diverse in ciascun punto della generatrice del cono. Dato che queste due tensioni si trovano nel campo dell'allungamento uniforme del provino nel caso di prova a trazione, ne consegue che il materiale subirà un allungamento secondo la generatrice CD (fig. 3). I processi di deformazione plastica sugli spigoli arrotondati del punzone e della matrice non vengono esaminati, dato che rimangono invariati con l'aumento del diametro della matrice a seguito del riscaldamento per lavoro continuato. È chiaro, però, che aumentando il diametro della matrice a seguito del riscaldamento, aumenterà anche la parte di materiale soggetta ad allungamento, rispettivamente ad assottigliamento.

Per determinare l'allungamento Δl in funzione di σ_{imb} , si possono utilizzare, con approssimazione, le deduzioni ricavate dall'esame del diagramma tensione-deformazione nel caso di prova a trazione su provino standardizzato di lamiera.

Dall'equazione dei volumi di un provino rettangolare assoggettato

a questa prova, segue:

$$F(l_0 + \Delta l) = F_0 l_0 \quad (9)$$

dove:

F_0 e l_0 sono rispettivamente l'area della sezione trasversale e la lunghezza del provino in condizione di partenza.

F è l'area della sezione trasversale del provino con allungamento assoluto Δl .

D'altra parte, il massimo carico si ottiene nell'istante della forma-

lunghezza l_0 . Inoltre, la (12) esprime l'influenza di altri fattori sull'allungamento Δl , nell'operazione tecnologica dell'imbutitura profonda della lamiera.

Il rapporto $\frac{\sigma_s}{\sigma_R}$ indica l'influenza delle caratteristiche tecnologiche del materiale. Notoriamente, e per la maggior parte dei metalli, quanto più piccolo è il rapporto $\frac{\sigma_s}{\sigma_R}$, tanto più uniforme è l'allungamento relativo del provino.

L'influenza del grado di deformazione è espressa dalla grandezza $\ln \frac{R_s}{R_i}$, dove R_s è il raggio dello sbizzato, mentre R_i è il raggio interno, cioè il raggio del punzone. L'influenza della conformazione geometrica dell'attrezzo (raggio di arrotondamento della matrice) è espressa dal termine $\frac{S}{4 r_m}$, il quale tiene conto anche dell'influenza dello spessore del materiale.

L'aumento del diametro della matrice a seguito del riscaldamento per lavoro continuato comporta quindi un assottigliamento del materiale in corrispondenza della sezione critica del recipiente. Quando le esigenze poste al prodotto comprendono anche un limite minimo dello spessore della parete, il sopraddetto fenomeno può determinare anche lo scarto del prodotto imbutito, per esempio nel caso di recipienti a pressione.

Per ciò che riguarda gli altri fattori che determinano l'operazione tecnologica e la cui influenza è espressa dalla (12), è evidente che per evitare il sopraddetto fenomeno, cioè per limitare o ridurre Δl , si può agire (in determinate condizioni, come grado di deformazione e qualità di materiale) variando il termine corrispondente alla resistenza d'attrito, cioè impiegando adatto lubrificante o modificando la conformazione geometrica dell'attrezzo, ovvero aumentando il raggio della matrice fino al limite possibile.

Ludmil Karaghiosoff

FONTI CONSULTATE

[1] N. P. GROMOFF, Teoria della lavorazione per stampaggio dei metalli, « Metallurgia », 1967.

zione di uno strozzamento, quando vale la relazione:

$$\sigma_g = \frac{\sigma_R \cdot F_0}{F_g} \quad (10)$$

Sostituendo nella (10) l'espressione di F_0 data dalla (9), e ponendo $F = F_g$, si ottiene:

$$\sigma_g = \sigma_R \frac{l_0 + \Delta l g}{l_0} \quad (11)$$

dove $\Delta l g$ è l'allungamento del provino al manifestarsi dello strozzamento.

Sostituendo nella (8) le tensioni ricavate dalle (7) e (11) ed operando elementari trasformazioni, si ottiene la relazione:

$$l_0 \left[\frac{\sigma_s}{\sigma_R} \left(\ln \frac{R_s}{R_i} + k_1 + \frac{S}{4 r_m} \right) - 1 \right] \leq \Delta l g$$

e quindi

$$\Delta l = l_0 \left[\frac{\sigma_s}{\sigma_R} \left(\ln \frac{R_s}{R_i} + k_1 + \frac{S}{4 r_m} \right) - 1 \right] \quad (12)$$

Indipendentemente dalle ipotesi su cui è fondata la deduzione di qui sopra, dalla (12) appare evidente che l'allungamento Δl è direttamente proporzionale alla

REGOLAMENTAZIONE TECNICA

NUOVE UNIFICAZIONI

(pubblicate dal 1° aprile
al 30 giugno 1968)

C.D. 621.918 - Lime, raspe e limatrici.

UNI 6218-68: Lime e raspe rotative - Caratteristiche generali.

UNI 6219-68: Idem - Densità e passi di taglio (fascicolo unico di 2 tabelle).

UNI 6220-68: Idem - Prospetto dei tipi unificati.

UNI 6221-68: Lime e raspe rotative cilindriche con codolo.

UNI 6222-68: Lime e raspe rotative sferiche con codolo.

UNI 6223-68: Lime e raspe rotative coniche con codolo.

UNI 6224-68: Lime rotative troncoconiche con codolo.

UNI 6225-68: Lime e raspe rotative ad ogiva con codolo.

UNI 6226-68: Lime e raspe rotative ad oliva con codolo.

UNI 6227-68: Lime rotative concavoconvesse con codolo.

UNI 6228-68: Lime rotative a fiamma con codolo.

UNI 6229-68: Lime e raspe rotative cilindriche con foro filettato.

UNI 6230-68: Lime e raspe rotative sferiche con foro filettato.

UNI 6231-68: Lime e raspe rotative coniche con foro filettato.

UNI 6232-68: Lime rotative troncoconiche con foro filettato.

UNI 6233-68: Lime e raspe rotative ad ogiva con foro filettato.

UNI 6234-68: Lime e raspe rotative ad oliva con foro filettato.

UNI 6235-68: Lime rotative convesse con foro filettato.

UNI 6236-68: Lime rotative concave con foro filettato.

C.D. 624.01 - Ingegneria civile - Sistemi di costruzione.

CNR-UNI 10016-68: Strutture composte di acciaio e calcestruzzo - Istruzioni per il calcolo e l'esecuzione (fascicolo unico di 12 tabelle).

C.D. 625.143 - Materiale d'armamento di binari ferroviari.

UNI 3562-68: Materiale minuto d'armamento di binari ferroviari - Applicazioni (fascicolo unico di 2 tabelle).

UNI 6217-68: Materiale minuto d'armamento di binari ferroviari - Rosette elastiche doppie ondulate per chiavarde di giunzione e di ancoraggio di rotaie (fascicolo unico di 3 tabelle).

C.D. 629.12 : 628.25 - Navigazione: scarichi, ombrinali, ecc.

UNI 6178-68: Ombrinali navali - Prospetto dei tipi unificati (fascicolo unico di 3 tabelle).

UNI 6179-68: Idem Ombrinali a gomito per scarichi fuori bordo con flangia saldata per ponti di acciaio con grossezza minore di 20 mm (fascicolo unico di 2 tabelle).

UNI 6180-68: Idem - Ombrinali a gomito per scarichi fuori bordo per ponti di acciaio con grossezza uguale o maggiore di 20 mm (fascicolo unico di 2 tabelle).

UNI 6181-68: Idem - Ombrinali con flangia saldata per ponti di acciaio con grossezza minore di 20 mm (fascicolo unico di 2 tabelle).

UNI 6182-68: Idem - Ombrinali per ponti di acciaio con grossezza uguale o maggiore di 20 mm (fascicolo unico di 2 tabelle).

UNI 6183-68: Idem - Ombrinali con coperchio per ponti di acciaio sottostanti al ponte di forza (fascicolo unico di 2 tabelle).

UNI 6184-68: Idem - Ombrinali con coperchio per ponti di forza di acciaio (fascicolo unico di 2 tabelle).

UNI 6185-68: Idem - Ombrinali con attacco diritto per ponti superiori rivestiti di legno.

UNI 6186-68: Idem - Ombrinali con attacco ad angolo per ponti superiori rivestiti di legno.

UNI 6187-68: Idem - Ombrinali inodori con attacco diritto per ponti di acciaio con fasciamento.

UNI 6188-68: Idem - Ombrinali inodori con attacco ad angolo per ponti di acciaio con fasciamento.

UNI 6189-68: Idem - Ombrinali per stive refrigerate e celle viveri senza isolamento termico dal ponte.

UNI 6190-68: Idem - Ombrinali per stive refrigerate e celle viveri con isolamento termico dal ponte (fascicolo unico di 2 tabelle).

UNI 6191-68: Ombrinali navali - Corpi per ombrinali per ponti di acciaio.

UNI 6192-68: Idem - Corpi per ombrinali con coperchio per ponti di acciaio sottostanti al ponte forza (fascicolo unico di 2 tabelle).

UNI 6193-68: Idem - Corpi per ombrinali con coperchio per ponti di forza di acciaio (fascicolo unico di 2 tabelle).

UNI 6194-68: Idem - Casse con attacco diritto per ombrinali per ponti superiori rivestiti di legno.

UNI 6195-68: Idem - Casse con attacco ad angolo per ombrinali per ponti superiori rivestiti di legno (fascicolo unico di 2 tabelle).

UNI 6196-68: Idem - Casse con attacco diritto per ombrinali inodori per ponti di acciaio con fasciamento (fascicolo unico di 2 tabelle).

UNI 6197-68: Idem - Casse con attacco ad angolo per ombrinali inodori per ponti in acciaio con fasciamento (fascicolo unico di 2 tabelle).

UNI 6198-68: Idem - Casse per ombrinali per stive refrigeranti e celle viveri senza isolamento termico dal ponte (fascicolo unico di 2 tabelle).

UNI 6199-68: Idem - Casse per ombrinali per stive refrigerate e celle viveri con isolamento termico dal ponte (fascicolo unico di 2 tabelle).

UNI 6200-68: Idem - Sifoni per ombrinali inodori con attacco diritto per ponti di acciaio con fasciamento.

UNI 6201-68: Idem - Griglie a losanga.

UNI 6202-68: Idem - Griglie per ombrinali con coperchio per ponti di acciaio.

UNI 6203-68: Idem - Griglie per ombrinali per ponti superiori rivestiti di legno.

UNI 6204-68: Idem - Griglie per ombrinali inodori con attacco diritto per ponti di acciaio con fasciamento (fascicolo unico di 2 tabelle).

UNI 6205-68: Idem - Griglie per ombrinali inodori con attacco ad angolo per ponti di acciaio con fasciamento.

UNI 6206-68: Ombrinali navali - Coperchi per ombrinali per ponti di acciaio.

UNI 6207-68: Idem - Aste per manovra semplice per ombrinali con coperchio per ponti di acciaio.

UNI 6208-68: Idem - Aste per manovra a distanza per ombrinali con coperchio per ponti di acciaio.

UNI 6209-68: Idem - Arresti e perni per griglie.

UNI 6210-68: Idem - Tappi, barrette e collari per ombrinali per stive refrigerate e celle viveri (fascicolo unico di 2 tabelle).

UNI 6211-68: Idem - Flange e boccole di isolamento per ombrinali per stive refrigerate e celle viveri.

UNI 6212-68: Idem - Flange e guarnizioni (fascicolo unico di 2 tabelle).

C.D. 629.73 - Aeromobili

UNI 6241-68: Aeromobili - Marcatura delle bombole per gas (fascicolo unico di 2 tabelle).

UNI 6242-68: Idem - Raccordo per rifornimento d'olio a pressione.

UNI 6243-68: Idem - Raccordo per rifornimento di acqua potabile.

UNI 6244-68: Idem - Valvole per pneumatici.

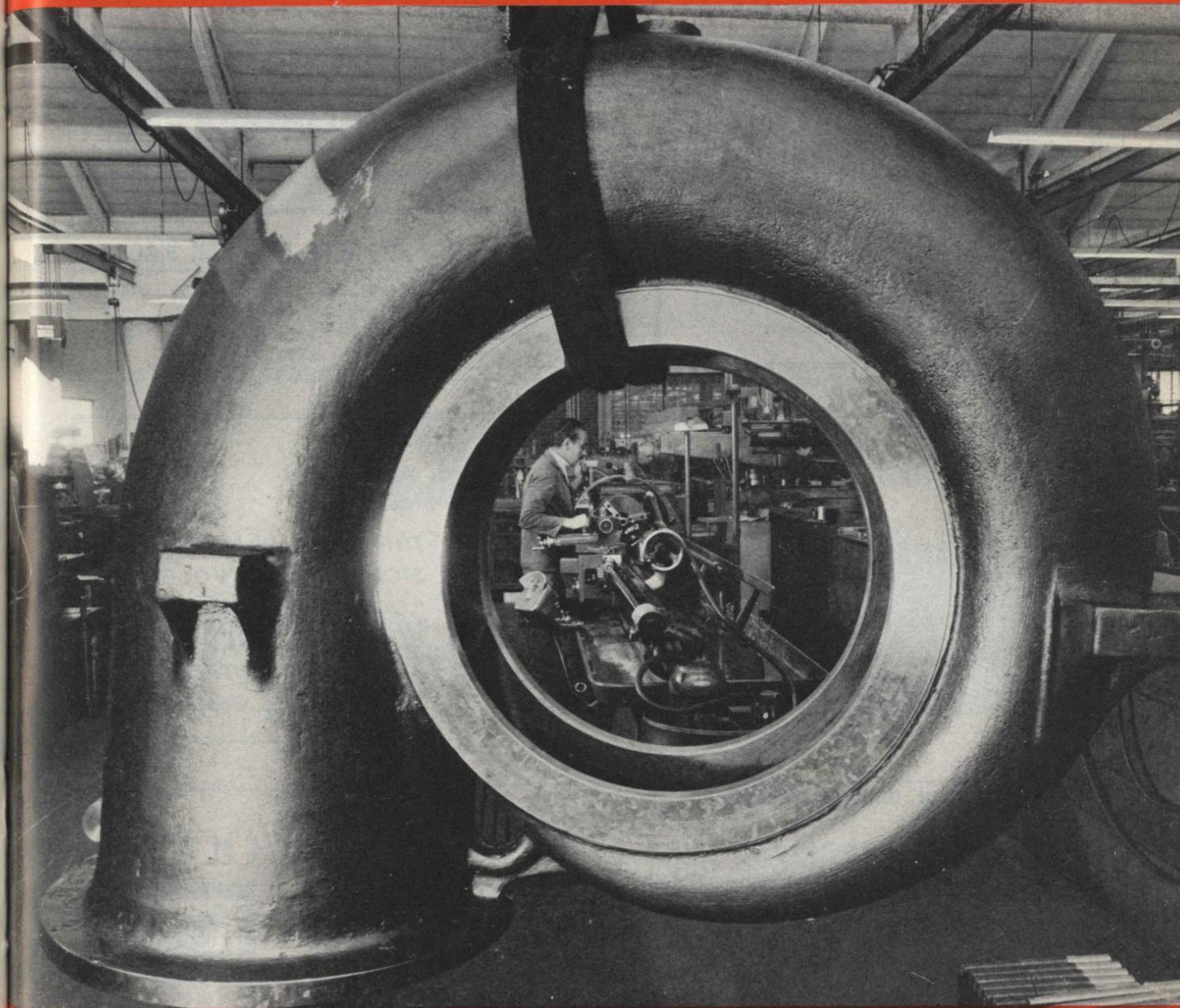
UNI 6245-68: Idem - Occhioni della barra di rimorchio per attacco al trattore.

UNI 6246-68: Idem - Testa di ingrassatori.

POMPE GABBIONETA

S.p.A.

STABILIMENTO 20099 SESTO S. GIOVANNI Telef. 2470.221/223/894
20131 MILANO Via Paisiello 10 Telef. 279.791



**POMPE PER L'INDUSTRIA
CHIMICA, AD ASSE
ORIZZONTALE,
VERTICALE, IMMERSE ED
ESTERNE, IN ACCIAIO
INOX E LEGHE SPECIALI**

POMPE di PROCESSO
POMPE per DOWTHERM a 300-400°C
POMPE EBANITATE e GOMMATE
POMPE verticali immerse per METALLI fusi a 500-800°C, SALI fusi, ecc.
POMPE per AMMONIACA ed UREA
POMPE per GAS LIQUIDI
POMPE per CELLULOSA e LIQUIDI DENSI

POMPE per LISCIVIO BISOLFITICO
POMPE ad ELICA per SOLFATO AMMONICO ecc.
POMPE per ALTE PRESSIONI, per ALIMENTARE SERBATOI ELEVATI e per ACQUEDOTTI
AGITATORI - MESCOLATORI
MOLINI COLLOIDALI
IMPIANTI COMPLETI - NOLEGGI

Direttore responsabile: **AUGUSTO CAVALLARI-MURAT**

Autorizzazione Tribunale di Torino, n. 41 del 19 Giugno 1948

STAMPERIA ARTISTICA NAZIONALE - TORINO

prodotti di amianto-cemento

Eternit marchio depositato

lastre	ondulate e piane per coperture, rivestimenti, soffittature, pannelli, isolamento elettrico e termoacustico, torri di refrigerazione, applicazioni speciali, ecc.
tubi	per condotte forzate, acquedotti, gasdotti, fognature, irrigazione, ventilazione, scarichi, drenaggi, pluviali, ecc.
prodotti diversi	canne per impianti di ventilazione, cappe, camini, canne fumarie normali ed a tiraggio rinforzato, depuratori di fuliggine, pannelli, canali e tubi portacavi, recipienti, vasi per fiori, ecc.
traverse ferroviarie	per ferrovie principali e secondarie, metropolitane, raccordi e parchi ferroviari, binari industriali, binari speciali, ecc.

prodotti di materia plastica

lastre FILON	ondulate traslucide di resine rinforzate con fibre di vetro e nailon
tubi Eterplast	per liquidi e gas in pressione, scarichi, fognature, pluviali, irrigazione, ecc.

Eternit soc. p. az.
Sede in Genova
Capitale Sociale L. 6.000.000.000 Int. versato

FILIALE PER IL PIEMONTE E VALLE D'AOSTA

TORINO - uffici: C.so Matteotti, 28 - Telef. 51.08.81 - 52.09.61
depositi: Via Miglietti, 17 - Telef. 48.82.76
Via Monfalcone, 177 - Telef. 36.24.22
NOVARA - Viale Verdi, 28-30 - Telef. 29.2.00

BISACCO

di Dott. Ing. U. BISACCO & F.

Rivestimenti in legno per pareti
soffitti di ingressi-atri scale
Serramenti e pareti divisorie

ARREDAMENTI

Tel. 596.069 - 10129 TORINO - Via Torricelli 53

BODINO GIOACHINO

Fonderia artistica
lavori in bronzo, rame,
ottone.
Cancelli e portoni.
Coperture e rivestimenti
in rame.

Lavorazioni speciali
acciaio inox e alluminio
anodizzato.
Serramenti speciali.
Complessivi per atri e scale.
Contrattista "VIS" in edilizia.
Realizzazioni su disegni.
Arredamenti.

TORINO, Via Rivarolo, 3 - Tel. 280.484 - 280.454 - 852.645

ING. TURBIGLIO & GARIGLIO

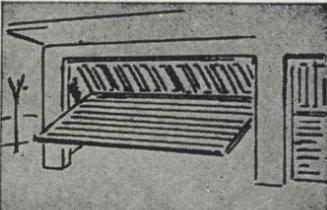
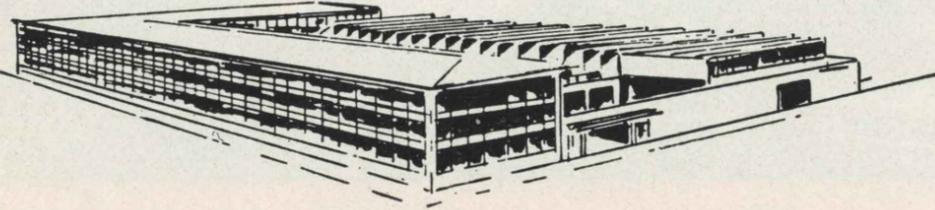
TORINO - VIA GATTINARA 11 - TEL. 87.75.96-87.34.95

IMPIANTI A CONVEZIONE
RADIAZIONE
civile ed industriale ad acqua calda
Acqua surriscaldata a vapore
Centrali termiche
Condizionamento dell'aria
Essiccatoi
IMPIANTI IDROSANITARI

BENEDETTO PASTORE S.p.A.
Capitale Sociale L. 425.000.000

SERRANDE DI SICUREZZA

ESPORTAZIONE TUTTI I TIPI DI CHIUSURE DI SICUREZZA, AVVOLGIBILI "CORAZZATA" RIDUCIBILI, RIPIEGABILI, SCORREVOLI A BILICO PER ABITAZIONI, NEGOZI, GARAGES, STABILIMENTI

SEDE E STABIL.: 10152 TORINO - C. NOVARA, 112 - TEL. 233.933 (5 linee)



Eredi Traschetti

INDUSTRIA SPECIALIZZATA INSTALLAZIONE GRANDI IMPIANTI
Anno di fondazione 1898

IMPIANTI TERMICI - RADIAZIONE - AEROMECCANICI - CONDIZIONAMENTO IDRO-SANITARI - LAVANDERIE - CUCINE - GESTIONE IMPIANTI DI RISCALDAMENTO

Sede: TORINO - Via P. Baiardi, 31 - Telefono 67.54.44 (4 linee)

ALDO VARALDI

COSTRUTTORE EDILE - STRADALE - PREFABBRICAZIONE STABILIMENTI E STRUTTURE METALLICHE

VIA GENOVA, 4 - TELEFONO 67.44.08 - TORINO

DITTA LUIGI ROSSIGNOLI & C. S. p. A.

MATERIALI E MACCHINARI PER FONDERIE

Sede:
Via Saluzzo, 93 - TORINO - Tel. 651.862 - 651.567

Filiale:
Via Principe Eugenio, 43 - MILANO - Tel. 341.266