

ATTI E RASSEGNA TECNICA

DELLA SOCIETÀ DEGLI INGEGNERI E DEGLI ARCHITETTI IN TORINO

RIVISTA FONDATA A TORINO NEL 1867

(Aderente all'Associazione Italiana della Stampa tecnica, scientifica e periodica)

FIAT
TORINO

**SOCIETÀ
PER AZIONI
UNIONE
CEMENTI**

**MARCHINO
& C.**

≡

**CASALE
MONFERRATO**

NUOVA SERIE . ANNO XIV . N. 11 . NOVEMBRE 1960

SOMMARIO

RASSEGNA TECNICA

- A. CAPETTI - *Gli studi di ingegneria - Come il Politecnico di Torino realizza il nuovo piano* pag. 361
- E. PERUCCA - *I solidi nella fisica di oggi* » 366
- G. BONICELLI - *Note sulla produzione nucleare dell'energia elettrica* » 373
- R. GRIGNOLIO - *Note sulla produzione industriale dell'D₂O* » 381

INFORMAZIONI

- A. RUSSO-FRATTASI - *Il Centro Studi sulle Sospensioni (attività, attrezzature e programmi)* » 388

REGOLAMENTAZIONE TECNICA

COMITATO DI REDAZIONE - *Direttore:* Cavallari-Murat Augusto - *Membri:* Brunetti Mario; Codegone Cesare; Cravero Roberto; Dardanelli Giorgio; De Pieri Roberto; Pozzo Ugo; Laguidara Rocco; Oglietti Giovanni; Riccio Giorgio; Zignoli Vittorio
Segretario di Redazione: Carmagnola Piero.

COMITATO AMMINISTRATIVO - *Direttore:* Russo-Frattasi Alberto - *Membri:* Barbero Francesco; Catella Mario; Dezzutti Mario; Goffi Achille; Mosso Nicola; Richieri Luigi; Tournon Giovanni.

**Redazione, Amministrazione, Abbonamenti, Pubblicità
TORINO - VIA GIOLITTI, 1 - TELEF. 527.412**

Pubblicazione mensile inviata gratuitamente ai Soci della Società degli Ingegneri e degli Architetti in Torino. — Per i non Soci: abbonamento annuo L. 5000. — Prezzo del presente fascicolo L. 500.

La Rivista si trova in vendita: a Torino presso la Sede Sociale, via Giolitti 1 — a Roma Libr. Int. U. Hoepli, largo Chigi 15 — a Milano Bottega Int. G. Algani, piazza della Scala — a Genova Libr. Int. Di Stefano, via C. Roccatagliata 40 — a Bologna Librer. Parolini, via U. Bassi 14.

SPEDIZIONE IN ABBONAMENTO POSTALE — GRUPPO III

SCHEDARIO TECNICO

IMPIANTI TERMICI SANITARI IDRAULICI ED ACUSTICI

STRAOMAX



Radiazione diffusa a minima inerzia
Riscaldamento - Raffrescamento
Protezione acustica
(sistema brevettato)

Organizzazione Internazionale,
con propri Laboratori Scientifici
per studi e ricerche a Zurigo
e con Sedi in Austria,
Francia, Germania,
Italia, Inghilterra, Olanda,
Spagna e Svizzera

LICENZIATARIO: PIEMONTE

Studio ed esecuzioni impianti:

g. SARTORIO e^o
IMPIANTI TERMICI - RADIAZIONE - CONDIZIONAMENTO
VENTILAZIONE - IDRAULICI SANITARI

TORINO
SEDE C. RACCONIGI, 26
TELEF. 70.149 - 753.649
C. C. I. A. TORINO N. 51921

SARACINESCHE

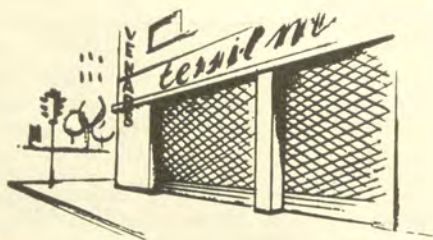
S.p.A.

BENEDETTO PASTORE

di LUIGI e DOMENICO PASTORE

Capitale sociale L. 250.000.000

TORINO - C. Firenze 127 - Tel. 21.024-280.591-22.880



ESPORTAZIONE

Tutti i tipi di chiusure di sicurezza avvolgibili "CORAZZATA"

Riducibili - Ripiegabili - Scorrevoli
A bilico - Per abitazioni, negozi,
garages, stabilimenti.

Filiali: MILANO - ROMA - GENOVA

MATERIALE ELETTRICO

ELETTRICITA' - RADIO - TV - DISCHI



La Soc. V.A.L.L.E.

segue una tradizione ...

*Forte della sua lunga
esperienza vi serve
bene, ai migliori prezzi.*

Vasto assortimento di:

Lampadari * Elettrodomestici
Radio * Televisori * Dischi
Giradischi * Registratori
Materiale elettrico e radiofonico

VISITATE I NOSTRI DUE GRANDIOSI NEGOZI DI TORINO

Via S. Donato 2 (P. Statuto) Tel. 52.04.75 - 40.840

Via Botero 18 (Piazza Solferino) Telefono 47.323

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

Gli studi di ingegneria Come il Politecnico di Torino realizza il nuovo piano

ANTONIO CAPETTI, MAGNIFICO RETTORE DEL POLITECNICO DI TORINO, nel discorso inaugurale dell'Anno Accademico 1960-61 (102° anno dalla fondazione), tra gli altri consueti argomenti amministrativi e tecnici, ha illustrato come localmente viene realizzato il nuovo piano degli studi d'ingegneria, richiesto dalle norme del Decreto Presidenziale n. 53 del 31 gennaio 1960. Qui è trascritto il brano in cui la riforma viene presentata come un intenzionale passo avanti sulla via dell'autonomia didattica ed una porta aperta alla specializzazione. In calce alle parole del Magnifico Rettore riportiamo, per gentile concessione, l'elenco delle materie degli otto corsi di laurea della Facoltà di Ingegneria di Torino (civile, meccanica, elettrotecnica, chimica, aeronautica, mineraria, elettronica, nucleare), elenco della cui pubblicazione siamo stati ripetutamente sollecitati.

L'anno 1960 sarà ricordato nella cronistoria degli studi italiani di ingegneria per un evento di cui non sapremmo in questo momento prevedere tutte le conseguenze, buone o meno.

Alludo al decreto presidenziale n. 53 del 31 gennaio 1960, che detta nuove norme per i corsi di laurea in ingegneria. Esso ha visto la luce dopo una lunga e laboriosa gestazione; dopo che da vari lustri i Presidi delle Facoltà di ingegneria riuniti in periodiche conferenze sia da soli, sia con membri del Consiglio superiore e con rappresentanti del Ministero, e talora coi Presidi delle Facoltà di Scienze fisiche e matematiche, discutevano le linee generali ed i particolari della riforma, basandosi oltre che sulla esperienza propria, sui pareri espressi nei dibattiti promossi dagli Enti più qualificati.

L'atteso provvedimento veniva sempre procrastinato, anche per il desiderio delle autorità centrali di inquadrarlo in una più vasta ed organica riforma di tutto l'ordine universitario, fino a che il Sen. Giuseppe Medici, allora nostro Ministro, ha rotto gli indugi, meritandosi la gratitudine di tutti coloro che vedevano in quel provvedimento l'avvio ad un possibile progresso.

Non intendo tediare l'uditorio

col soffermarmi a commentare tutti i punti del decreto presidenziale; sorvolo ad esempio sulla soluzione di compromesso che esso ha dato alla spinosa questione del passaggio dei bienni propedeutici dalla Facoltà di scienze a quella di ingegneria, questione che del resto non tocca il nostro Politecnico, dove gli studi di ingegneria hanno sempre avuto il completo svolgimento quinquennale. Toccherò invece brevemente altri punti a mio parere di maggiore importanza, e non solo per noi.

La riforma in atto potrebbe sinteticamente definirsi un passo avanti sulla via dell'autonomia didattica ed una porta aperta alla specializzazione.

All'annoso dilemma imposto dalla pesantezza dei nostri studi, se per alleggerirli convenga limitarne lo sviluppo alle basi, pur esse in continua espansione per i nuovi capitoli che le scienze pure fisiche, chimiche, matematiche aprono alle successive applicazioni industriali, o se invece sia meglio suddividere più profondamente i rami di specializzazione sfrondandone il corso delle parti meno caratteristiche, la riforma risponde propendendo verso il secondo metodo.

Sono state infatti istituite ex novo le lauree in ingegneria elet-

tronica ed in ingegneria nucleare e sono state elevate al rango di lauree autonome le vecchie sottospecie della laurea industriale, sostituendo ad essa lauree in ingegneria chimica, elettrotecnica, meccanica. Rimangono le lauree in ingegneria aeronautica, civile, mineraria e navale-meccanica.

Nello stesso tempo sono ridotte a diciannove, comprese le nove del primo biennio, le materie che per ciascun tipo di laurea devono figurare con lo stesso nome in tutte le Facoltà di ingegneria, mentre le altre materie, in numero non superiore a undici, sono lasciate alla libera statuizione dei singoli consessi accademici.

Come si vede, della specializzazione anche la più radicale il provvedimento pone le premesse ed offre la possibilità, non fa imposizione. Relativamente poche sono infatti le materie obbligatorie sul piano nazionale che differenziano i vari corsi di laurea, e spetta alle Facoltà accentuare o meno la differenziazione, con la loro scelta delle altre materie.

È prevedibile che la maggior parte delle scuole vorrà approfittare della possibilità che vien loro offerta: la nostra è già fra queste, e lo Statuto che con l'approvazione delle superiori autorità, viene applicato fin da quest'anno, contiene drastiche sostituzioni

di corsi peculiari ai singoli rami, al posto di corsi generali comuni.

L'avvenire dirà se la strada imboccata è la buona o se i futuri laureati in certi rami, dal curriculum dei quali sono scomparse materie fin qui ritenute necessarie a dare all'ingegnere un'armonica conoscenza delle principali tecniche, compenseranno questa loro innegabile deficienza con la conoscenza altrettanto innegabilmente più approfondita di una sola tecnica.

Qualche altro motivo di perplessità riguarda le materie nuove che a titolo fondamentale o complementare (oggi si dice « di indirizzo ») la legge permette di istituire. Non credo di mancare di riguardo verso i colleghi della mia e delle altre scuole, esprimendo il timore che siano qua e

là portati al livello di corsi annuali semplici capitoli di altre più sostanziose materie, o che vengano istituiti corsi di profonda specializzazione senza accertarsi della possibilità di reperire i relativi docenti specialisti.

Non intendo con tutto ciò muovere critica aprioristica ai criteri autonomistici a cui è ispirata la riforma: anche in questo, come in tanti altri casi, tutto dipende dall'uso che della libertà concessa si sapremo fare!

Ciò di cui siamo certi si è che quando la riforma sarà completamente attuata, gli studenti troveranno più facile la via per raggiungere nei tre anni regolamentari il coronamento dei corsi di applicazione. Poco è invece cambiato nel biennio e purtroppo non basterà la riforma a far diminuire

il triste fenomeno dei giovani che dopo uno o più anni di fiacchi e vani tentativi di superarne gli ostacoli, si rivolgono ad altro genere di studi universitari.

Quasi 150 congedi per le più disparate Facoltà ci sono già stati chiesti da studenti del biennio in quest'ultimo mese!

Ritengo urgente studiare la maniera di rimediare ad uno stato di cose tanto dannoso alle famiglie che vedono frustrati i loro sacrifici. Potrebbe costituire un principio di rimedio l'assicurare allo studente del primo anno una maggiore assistenza congiunta ad un controllo della sua operosità più vicino a quello cui era avvezzo nel liceo. È ancora la questione della scarsità del personale, che riaffiora!

Antonio Capetti

INGEGNERIA CIVILE

1° ANNO

- 1.1 Analisi matematica I;
- 1.2 Geometria I;
- 1.3 Fisica I;
- 1.4 Chimica;
- 1.5 Disegno.

2° ANNO

- 2.1 Analisi matematica II;
- 2.2 Geometria II;
- 2.3 Meccanica razionale;
- 2.4 Fisica II;
- 2.5 Disegno edile.

3° ANNO

- 3.1 Scienza delle costruzioni;
- 3.2 Fisica tecnica;
- 3.3 Elettrotecnica;
- 3.4 Tecnologia dei materiali e chimica applicata.
- 3.5 Architettura tecnica I;
- 3.6 Litologia e geologia applicata.

4° ANNO

- 4.1 Meccanica applicata alle macchine e macchine;
- 4.2 Idraulica;
- 4.3 Tecnica delle costruzioni I;
- 4.4 Topografia;
- 4.5 Complementi di scienza delle costruzioni;
- 4.6 Architettura tecnica II.

5° ANNO

- 5.1 Costruzioni idrauliche;
- 5.2 Costruzione di strade, ferrovie e aeroporti;
- 5.3 Tecnica delle costruzioni II;
- 5.4 Estimo ed esercizio della professione;
- 5.5 Urbanistica.

SEZIONE A SCELTA:

Edile.

- 5.6.A Architettura e composizione architettonica;

Idraulica.

- 5.6.B Impianti speciali idraulici;

Trasporti.

- 5.6.C Tecnica ed economia dei trasporti.

Norme transitorie per il 1960-61

Nel 1960-61 il nuovo piano entra in vigore con la seguente variante:

— gli allievi del 4° anno civile seguiranno in più il corso 3.6.

Per gli allievi che si iscrivono al 4° anno civile nel 1960-61 sono obbligatori gli esami seguenti del loro precedente piano di studi:

1. Scienza delle costruzioni;
2. Fisica tecnica;
3. Elettrotecnica;
4. Chimica applicata;
5. Meccanica applicata alle macchine;
6. Architettura tecnica I.

Per ottenere l'iscrizione al 4° anno lo studente — al termine della sessione autunnale — deve aver superato gli esami in almeno tre degli insegnamenti 1, 2, 3, 4, 5.

Per gli allievi che si iscrivono al 5° anno civile nel 1960-61 sono obbligatori gli esami seguenti del loro precedente piano di studi:

1. Scienza delle costruzioni;
2. Fisica tecnica;
3. Elettrotecnica;
4. Chimica applicata;
5. Meccanica applicata alle macchine;
6. Architettura tecnica I;
7. Macchine;
8. Costruzioni in legno, ferro e cemento armato;
9. Idraulica;
10. Topografia con elementi di geodesia;
11. Scienza delle costruzioni II.

12. Architettura tecnica II.

13. Geologia applicata.

Per ottenere l'iscrizione al 5° anno lo studente — al termine della sessione autunnale — deve aver superato tutti i cinque esami degli insegnamenti 1, 2, 3, 4, 5, nonché gli esami di almeno altri due insegnamenti del triennio.

Nella domanda di iscrizione al 5° anno lo studente deve optare per una delle tre sezioni: edile, idraulica, trasporti.

Per allievi fuori corso del 3° e 4° anno verrà singolarmente ricostruita la carriera di studi in modo da adeguarla al nuovo piano.

INGEGNERIA MECCANICA

1° ANNO

- 1.1 Analisi matematica I;
- 1.2 Geometria I;
- 1.3 Fisica I;
- 1.4 Chimica;
- 1.5 Disegno.

2° ANNO

- 2.1 Analisi matematica II;
- 2.2 Geometria II;
- 2.3 Meccanica razionale;
- 2.4 Fisica II;
- 2.5 Disegno meccanico.

3° ANNO

- 3.1 Scienza delle costruzioni;
- 3.2 Meccanica applicata alle macchine;
- 3.3 Fisica tecnica;
- 3.4 Elettrotecnica;
- 3.5 Chimica applicata;
- 3.6 Tecnologia meccanica.

4° ANNO

- 4.1 Idraulica;
- 4.2 Macchine I;
- 4.3 Costruzione di macchine;

- 4.4 Applicazioni industriali dell'elettrotecnica;
- 4.5 Tecnica delle costruzioni;
- 4.6 Tecnologie dei materiali.

5° ANNO

- 5.1 Impianti meccanici;
- 5.2 Macchine II;
- 5.3 Calcolo e progetto di macchine;
- 5.4 Economia e tecnica aziendale.

INDIRIZZO A SCELTA:

Metrologico:

- 5.5.A Metrologia generale e misure meccaniche;
- 5.6.A Misure termiche e regolazioni.

Termotecnico:

- 5.5.B Impianti speciali termici;
- 5.6.B Misure termiche e regolazioni.

D'Officina:

- 5.5.C Attrezzature di produzione;
- 5.6.C Comandi e regolazioni.

Automobilistico:

- 5.5.D Costruzioni automobilistiche;
- 5.6.D Tecnica ed economia dei trasporti.

Norme transitorie per il 1960-61

Nel 1960-61 il nuovo piano entra in vigore con la seguente variante:

— gli allievi del 5° anno meccanica seguiranno in più il corso 4.6.

Per gli allievi che si iscrivono al 4° anno meccanica nel 1960-61 sono obbligatori i seguenti esami del loro precedente piano di studi:

1. Scienza delle costruzioni;
2. Meccanica applicata alle macchine;
3. Fisica tecnica;
4. Elettrotecnica;
5. Chimica applicata (corso ridotto);
6. Chimica industriale (corso ridotto);
7. Tecnologie generali.

Per ottenere l'iscrizione al 4° anno lo studente — al termine della sessione autunnale — deve aver superato gli esami in almeno *tre* degli insegnamenti 1, 2, 3, 4, 5, 6.

Per gli allievi che si iscrivono al 5° anno meccanica nel 1960-61 sono obbligatori i seguenti esami del loro precedente piano di studi:

1. Scienza delle costruzioni;
2. Meccanica applicata alle macchine;
3. Fisica tecnica;
4. Elettrotecnica;
5. Chimica applicata;
6. Tecnologie generali;
7. Idraulica;
8. Macchine I;
9. Costruzione di macchine I;
10. Applicazioni industriali dell'elettrotecnica;
11. Costruzioni in legno, ferro e cemento armato;
12. Tecnologie speciali I.

Per ottenere l'iscrizione al 5° anno lo studente — al termine della sessione autunnale — deve aver superato *tutti i cinque* esami degli insegnamenti 1, 2, 3, 4, 5, nonché gli esami di almeno *altri due* insegnamenti del triennio.

Nella domanda di iscrizione al 5° anno lo studente deve optare per uno dei quattro indirizzi: metrologico, termotecnico, d'officina, automobilistico.

Per allievi *fuori corso* del 3° e 4° anno verrà singolarmente ricostruita la carriera di studi in modo da adeguarla al nuovo piano.

INGEGN. Elettrotecnica

1° ANNO

- 1.1 Analisi matematica I;
- 1.2 Geometria I;
- 1.3 Fisica I;
- 1.4 Chimica;
- 1.5 Disegno.

2° ANNO

- 2.1 Analisi matematica II;
- 2.2 Geometria II;
- 2.3 Meccanica razionale;
- 2.4 Fisica II;
- 2.5 Disegno meccanico.

3° ANNO

- 3.1 Scienza delle costruzioni;
- 3.2 Meccanica applicata alle macchine;
- 3.3 Fisica tecnica;
- 3.4 Elettrotecnica I;
- 3.5 Materiali per l'elettrotecnica;
- 3.6 Complementi di matematica.

4° ANNO

- 4.1 Idraulica;
- 4.2 Misure elettriche;
- 4.3 Macchine;
- 4.4 Impianti elettrici I;
- 4.5 Elettrotecnica applicata;
- 4.6 Elettrotecnica II;
- 4.7 Costruzione di macchine e tecnologie.

5° ANNO

- 5.1 Macchine elettriche;
- 5.2 Comunicazioni elettriche;
- 5.3 Costruzioni idrauliche;
- 5.4 Impianti elettrici II;
- 5.5 Economia e tecnica aziendale.

INDIRIZZO A SCELTA:

- 5.6.A Applicazioni elettromeccaniche;
- 5.6.B Controlli automatici.

Norme transitorie per il 1960-61

Nel 1960-61 il nuovo piano entra in vigore con la seguente variante:

— gli allievi del 5° anno elettrotecnica seguiranno il corso 4.4 invece del corso 5.4.

Per gli allievi che si iscrivono al 4° anno elettrotecnica nel 1960-61 sono obbligatori i seguenti esami del loro precedente piano di studi:

1. Scienza delle costruzioni;
2. Meccanica applicata alle macchine;
3. Fisica tecnica;
4. Elettrotecnica I;
5. Chimica applicata (corso ridotto);
6. Chimica industriale (corso ridotto);

7. Tecnologie generali;
8. Matematica applicata all'elettrotecnica.

Per ottenere l'iscrizione al 4° anno lo studente — al termine della sessione autunnale — deve aver superato gli esami in almeno *tre* degli insegnamenti 1, 2, 3, 4, 5, 6.

Per gli allievi che si iscrivono al 5° anno elettrotecnica nel 1960-61 sono obbligatori gli esami seguenti del loro precedente piano di studi:

1. Scienza delle costruzioni;
2. Meccanica applicata alle macchine;
3. Fisica tecnica;
4. Elettrotecnica I;
5. Chimica applicata;
6. Tecnologie generali;
7. Idraulica;
8. Misure elettriche;
9. Macchine;
10. Tecnologie speciali (elettronica);
11. Elettrotecnica II.
12. Costruzione di macchine;
13. Matematica applicata all'elettrotecnica.

Per ottenere l'iscrizione al 5° anno lo studente — al termine della sessione autunnale — deve aver superato *tutti i cinque* esami degli insegnamenti 1, 2, 3, 4, 5, nonché gli esami di almeno *altri due* insegnamenti del triennio.

Per allievi *fuori corso* del 3° e 4° anno verrà singolarmente ricostruita la carriera di studi in modo da adeguarla al nuovo piano.

INGEGNERIA Chimica

1° ANNO

- 1.1 Analisi matematica I;
- 1.2 Geometria I;
- 1.3. Fisica I;
- 1.4. Chimica;
- 1.5. Disegno.

2° ANNO

- 2.1 Analisi matematica II;
- 2.2. Geometria II;
- 2.3 Meccanica razionale;
- 2.4 Fisica II;
- 2.5 Chimica organica.

3° ANNO

- 3.1 Scienza delle costruzioni;
- 3.2 Meccanica applicata alle macchine;
- 3.3 Fisica tecnica;
- 3.4 Elettrotecnica;
- 3.5 Chimica applicata;
- 3.6 Chimica analitica.

4° ANNO

- 4.1 Chimica fisica;
- 4.2 Macchine;
- 4.3 Principi di ingegneria chimica;
- 4.4 Chimica industriale I;
- 4.5 Idraulica;
- 4.6 Costruzione di macchine e tecnologie.

5° ANNO

- 5.1 Impianti chimici;
- 5.2 Chimica industriale II;

- 5.3 Elettrochimica;
- 5.4 Metallurgia e metallografia;
- 5.5 Economia e tecnica aziendale.

INDIRIZZO A SCELTA:

- 5.6.A Misure chimiche e regolazioni;
- 5.6.B Teoria e sviluppo dei processi chimici;
- 5.6.C Tecnologie chimiche speciali.

Norme transitorie per il 1960-61

Nel 1960-61 il nuovo piano entra in vigore con le seguenti varianti:

— gli allievi del 3° anno chimica seguiranno in più il corso 2.5;

— gli allievi del 5° anno chimica seguiranno il corso 4.3 invece del corso 5.5 ed il corso 5.6.A di indirizzo (senza scelta).

Per gli allievi che si iscrivono al 4° anno chimica nel 1960-61 sono obbligatori i seguenti esami del loro precedente piano di studi:

1. Scienza delle costruzioni;
2. Meccanica applicata alle macchine;
3. Fisica tecnica;
4. Elettrotecnica;
5. Chimica applicata;
6. Chimica analitica;
7. Tecnologie generali.

Per ottenere l'iscrizione al 4° anno lo studente — al termine della sessione autunnale — deve aver superato gli esami in almeno *tre* degli insegnamenti 1, 2, 3, 4, 5.

Per gli allievi che si iscrivono al 5° anno chimica nel 1960-61 sono obbligatori gli esami seguenti del loro precedente piano di studi:

1. Scienza delle costruzioni;
2. Meccanica applicata alle macchine;
3. Fisica tecnica;
4. Elettrotecnica;
5. Chimica applicata;
6. Tecnologie generali;
7. Chimica fisica;
8. Macchine;
9. Chimica industriale I;
10. Idraulica;
11. Costruzione di macchine;
12. Chimica analitica;
13. Costruzioni in legno, ferro e cemento armato.

Per ottenere l'iscrizione al 5° anno lo studente — al termine della sessione autunnale — deve aver superato *tutti i cinque* esami degli insegnamenti 1, 2, 3, 4, 5, nonchè gli esami di almeno *altri due* insegnamenti del triennio.

Per allievi *fuori corso* del 3° e 4° anno verrà singolarmente ricostruita la carriera di studi in modo da adeguarla al nuovo piano.

INGEGNERIA AERONAUTICA

1° ANNO

- 1.1 Analisi matematica I;
- 1.2 Geometria I;
- 1.3 Fisica I;

- 1.4 Chimica;
- 1.5 Disegno.

2° ANNO

- 2.1 Analisi matematica II;
- 2.2. Geometria II;
- 2.3 Meccanica razionale;
- 2.4 Fisica II;
- 2.5 Disegno meccanico.

3° ANNO

- 3.1 Scienza delle costruzioni;
- 3.2 Meccanica applicata alle macchine;
- 3.3 Fisica tecnica;
- 3.4 Elettrotecnica;
- 3.5 Chimica applicata;
- 3.6 Tecnologia meccanica.

4° ANNO

- 4.1 Aerodinamica;
- 4.2 Aeronautica generale;
- 4.3 Macchine;
- 4.4 Costruzione di macchine;
- 4.5 Idraulica;
- 4.6 Tecnologie dei materiali.

5° ANNO

- 5.1 Motori per aeromobili;
- 5.2 Costruzioni aeronautiche;
- 5.3 Gasdinamica;
- 5.4 Progetto di aeromobili;
- 5.5 Costruzione di motori per aeromobili;
- 5.6 Economia e tecnica aziendale.

Norme transitorie per il 1960-61

Nel 1960-61 il nuovo piano entra in vigore con la seguente variante:

— gli allievi del 5° anno aeronautica seguiranno i corsi 4.2 e 4.6 invece del corso 5.2.

Per gli allievi che si iscrivono al 4° anno aeronautica nel 1960-61 sono obbligatori i seguenti esami del loro precedente piano di studi:

1. Scienza delle costruzioni;
2. Meccanica applicata alle macchine;
3. Fisica tecnica;
4. Elettrotecnica;
5. Chimica applicata (corso ridotto);
6. Chimica industriale (corso ridotto);
7. Tecnologie generali.

Per ottenere l'iscrizione al 4° anno lo studente — al termine della sessione autunnale — deve aver superato gli esami in almeno *tre* degli insegnamenti 1, 2, 3, 4, 5, 6.

Per gli allievi che si iscrivono al 5° anno aeronautica nel 1960-61 sono obbligatori gli esami seguenti del loro precedente piano di studi:

1. Scienza delle costruzioni;
2. Meccanica applicata alle macchine;
3. Fisica tecnica;
4. Elettrotecnica;
5. Chimica applicata;
6. Tecnologie generali;
7. Aerodinamica;
8. Costruzioni aeronautiche;
9. Macchine;
10. Costruzione di macchine I;
11. Idraulica.

Per ottenere l'iscrizione al 5° anno lo studente — al termine della sessione autunnale — deve aver superato *tutti i cinque* esami degli insegnamenti 1, 2, 3, 4, 5, nonchè gli esami di almeno *altri due* insegnamenti del triennio.

Per allievi *fuori corso* del 3° e 4° anno verrà singolarmente ricostruita la carriera di studi in modo da adeguarla al nuovo piano.

INGEGNERIA MINERARIA

1° ANNO

- 1.1 Analisi matematica I;
- 1.2 Geometria I;
- 1.3 Fisica I;
- 1.4 Chimica;
- 1.5 Disegno.

2° ANNO

- 2.1 Analisi matematica II;
- 2.2. Geometria II;
- 2.3 Meccanica razionale;
- 2.4 Fisica II;
- 2.5 Disegno meccanico.

3° ANNO

- 3.1 Scienza delle costruzioni;
- 3.2 Meccanica applicata alle macchine;
- 3.3 Fisica tecnica;
- 3.5 Chimica applicata;
- 3.6 Mineralogia e litologia.

4° ANNO

- 4.1 Macchine;
- 4.2 Arte mineraria;
- 4.3 Geologia;
- 4.4 Idraulica;
- 4.5 Tecnica della perforazione e sondaggi;
- 4.6 Costruzione di macchine e tecnologie.

5° ANNO

- 5.1 Topografia;
- 5.2 Giacimenti minerari;
- 5.3 Impianti minerari;
- 5.4 Geofisica mineraria;
- 5.5 Preparazione dei minerali.

INDIRIZZI A SCELTA:

Esercizio miniere:

- 5.6.A Tecnologie metallurgiche;
- 5.7.A Tecnica delle costruzioni.

Idrocarburi:

- 5.6.B Tecnica dei giacimenti di idrocarburi;
- 5.7.B Produzione degli idrocarburi.

Prospezione:

- 5.6.C Analisi dei minerali;
- 5.7.C Prospezione geomineraria.

Norme transitorie per il 1960-61

Nel 1960-61 il nuovo piano entra in vigore con le seguenti varianti:

— gli allievi del 4° anno mineraria seguiranno il corso 3.6 invece del 4.3.

— gli allievi del 5° anno mineraria seguiranno il corso 4.5 invece dei corsi 5.1 e 5.4.

Per gli allievi che si iscrivono al 4° anno mineraria nel 1960-61 sono obbligatori i seguenti esami del loro precedente piano di studi:

1. Scienza delle costruzioni;
2. Meccanica applicata alle macchine;
3. Fisica tecnica;
4. Elettrotecnica;
5. Chimica applicata;
6. Geologia e paleontologia;
7. Tecnologie generali.

Per ottenere l'iscrizione al 4° anno lo studente — al termine della sessione autunnale — deve aver superato gli esami in almeno *tre* degli insegnamenti 1, 2, 3, 4, 5.

Per gli allievi che si iscrivono al 5° anno mineraria nel 1960-61 sono obbligatori i seguenti esami del loro precedente piano di studi:

1. Scienza delle costruzioni;
2. Meccanica applicata alle macchine;
3. Fisica tecnica;
4. Elettrotecnica;
5. Chimica applicata;
6. Geologia e paleontologia;
7. Tecnologie generali;
8. Macchine;
9. Arte mineraria;
10. Idraulica;
11. Petrografia;
12. Geofisica mineraria;
13. Topografia con elementi di geodesia;
14. Chimica fisica.

Per ottenere l'iscrizione al 5° anno lo studente — al termine della sessione autunnale — deve aver superato *tutti i cinque* esami degli insegnamenti 1, 2, 3, 4, 5, nonché gli esami di almeno altri *due* insegnamenti del triennio.

Nella domanda di iscrizione al 5° anno lo studente deve optare per uno dei tre indirizzi: esercizio miniere, idrocarburi, prospezione.

Per allievi *fuori corso* del 3° e 4° anno verrà singolarmente ricostruita la carriera di studi in modo da adeguarla al nuovo piano.

INGEGNERIA ELETTRONICA

1° ANNO

- 1.1 Analisi matematica I;
- 1.2 Geometria I;
- 1.3 Fisica I;
- 1.4 Chimica;
- 1.5 Disegno.

2° ANNO

- 2.1 Analisi matematica II;
- 2.2 Geometria II;
- 2.3 Meccanica razionale;
- 2.4 Fisica II;
- 2.5 Disegno meccanico.

3° ANNO

- 3.1 Scienza delle costruzioni;
- 3.2 Meccanica delle macchine e macchine;
- 3.3 Fisica tecnica;
- 3.4 Elettrotecnica I;

- 3.5 Materiali per l'elettrotecnica;
- 3.6 Complementi di matematica.

4° ANNO

- 4.1 Campi elettromagnetici e circuiti;
- 4.2 Misure elettriche;
- 4.3 Elettronica applicata;
- 4.4 Elettrotecnica II;
- 4.5 Tecnologia meccanica;
- 4.6 Impianti elettrici.

5° ANNO

- 5.1 Comunicazioni elettriche;
- 5.2 Controlli automatici;
- 5.3 Radiotecnica;
- 5.4 Misure elettroniche;
- 5.5 Tecnica delle iperfrequenze;
- 5.6 Economia e tecnica aziendale.

INDIRIZZO A SCELTA:

- 5.7.A Telefonia;
- 5.7.B Impianti radioelettronici;
- 5.7.C Calcolatrici e logica dei circuiti.

Norme transitorie per il 1960-61

Nel 1960-61 il nuovo piano entra in vigore con le seguenti varianti:

— gli allievi del 4° anno elettronica seguiranno il corso 3.2 invece del corso 4.5;

— gli allievi del 5° anno elettronica seguiranno i corsi 4.1 e 4.6 invece dei corsi 5.5 e 5.6 ed il corso 5.7.A di indirizzo (senza scelta).

Per gli allievi che si iscrivono al 4° anno elettronica nel 1960-61 sono obbligatori i seguenti esami del loro precedente piano di studi:

1. Scienza delle costruzioni;
2. Meccanica applicata alle macchine;
3. Fisica tecnica;
4. Elettrotecnica I;
5. Chimica applicata (corso ridotto);
6. Chimica industriale (corso ridotto);
7. Tecnologie generali.
8. Matematica applicata all'elettrotecnica.

Per ottenere l'iscrizione al 4° anno lo studente — al termine della sessione autunnale — deve aver superato gli esami in almeno *tre* degli insegnamenti 1, 2, 3, 4, 5, 6.

Per gli allievi che si iscrivono al 5° anno elettronica nel 1960-61 sono obbligatori i seguenti esami del loro precedente piano di studi:

1. Scienza delle costruzioni;
2. Meccanica applicata alle macchine;
3. Fisica tecnica;
4. Elettrotecnica I;
5. Chimica applicata;
6. Tecnologie generali;
7. Idraulica;
8. Misure elettriche;
9. Macchine;
10. Tecnologie speciali (elettronica);
11. Elettrotecnica II;
12. Matematica applicata all'elettrotecnica.

Per ottenere l'iscrizione al 5° anno lo studente — al termine della sessione autunnale — deve aver superato *tutti i cinque* esami degli insegnamenti 1, 2, 3,

4, 5, nonché gli esami di almeno altri *due* insegnamenti del triennio.

Per allievi *fuori corso* del 3° e 4° anno verrà singolarmente ricostruita la carriera di studi in modo da adeguarla al nuovo piano.

INGEGNERIA NUCLEARE

1° ANNO

- 1.1 Analisi matematica I;
- 1.2 Geometria I;
- 1.3 Fisica I;
- 1.4 Chimica;
- 1.5 Disegno.

2° ANNO

- 2.1 Analisi matematica II;
- 2.2 Geometria II;
- 2.3 Meccanica razionale;
- 2.4 Fisica II;
- 2.5 Disegno meccanico.

3° ANNO

- 3.1 Scienza delle costruzioni;
- 3.2 Meccanica applicata alle macchine;
- 3.3 Fisica tecnica;
- 3.4 Elettrotecnica;
- 3.5 Chimica applicata;
- 3.6 Tecnologia meccanica.

4° ANNO

- 4.1 Fisica atomica;
- 4.2 Macchine I;
- 4.3 Fisica nucleare;
- 4.4 Chimica degli impianti nucleari;
- 4.5 Costruzione di macchine;
- 4.6 Idraulica;
- 4.7 Tecnica delle costruzioni.

5° ANNO

- 5.1 Elettronica nucleare;
- 5.2 Fisica del reattore nucleare;
- 5.3 Impianti nucleari;
- 5.4 Macchine II;
- 5.5 Calcolo e progetto di macchine;
- 5.6 Economia e tecnica aziendale.

Norme transitorie per il 1960-61

Nel 1960-61 non verrà realizzato il 5° anno nucleare.

Per gli allievi che si iscrivono al 4° anno nucleare nel 1960-61 sono obbligatori i seguenti esami del loro precedente piano di studi:

1. Scienza delle costruzioni;
2. Meccanica applicata alle macchine;
3. Fisica tecnica;
4. Elettrotecnica;
5. Chimica applicata (corso ridotto);
6. Chimica industriale (corso ridotto);
7. Tecnologie generali.

Per ottenere l'iscrizione al 4° anno lo studente — al termine della sessione autunnale — deve aver superato gli esami in almeno *tre* degli insegnamenti 1, 2, 3, 4, 5, 6.

Per allievi *fuori corso* del 3° anno verrà singolarmente ricostruita la carriera di studi in modo da adeguarla al nuovo piano.

I solidi nella fisica di oggi

ELIGIO PERUCCA, inaugurandosi l'8 novembre 1960 l'Anno Accademico del Politecnico di Torino, ha svolto la prolusione sul tema « I solidi nella fisica di oggi ». Per gentile concessione del Rettorato estraiamo dall'Annuario il testo in cui l'insigne fisico, nei limiti concessi ad una prolusione, fissa i concetti di solido, di monocristallo, di monocristallo ideale e indica le mete raggiunte. La revisione delle proprietà dei solidi, specialmente quelle defect sensitive conduce a soffermarsi specialmente sulle proprietà magnetiche e sulla conduzione elettrica, campi risultati fecondissimi per la fisica pura e per la fisica applicata. Conclude esortando a curare parallelamente entrambe.

Certamente il ragazzo che parla di corpo « solido », invece di corpo « duro », è già andato a scuola.

Più tardi, studente universitario, apprenderà che la fisica ha fondati motivi di definire come « solido » lo stato cristallino, cioè dotato di un reticolo periodico speciale, e, se questo si estende regolare all'intero corpo solido in studio, si ha un « monocristallo ».

Da quanto tempo si dice così?

Vi sono fatti ben determinati nello spazio e nel tempo. È ben noto che lunedì 10 gennaio 1859, tra le ore 10,30 e le 11 del mattino, nell'aula del Senato Subalpino del nostro Palazzo Madama, Vittorio Emanuele II pronunciò lo storico discorso del « Non siamo insensibili al grido di dolore che da tante parti d'Italia si leva verso di noi ».

Ma ben di rado può aversi pari precisazione per la nascita delle grandi idee della scienza.

Il più vecchio testo che io conosca, ove si afferma l'identità solido-cristallo è la « Fisica dei Corpi Ponderabili », la grande opera di Amedeo Avogadro, ormai vecchia di 120 anni, e questo è un altro segno, forse non a tutti noto, dell'intuito del nostro Grande.

Sebbene l'idea si imponga nella fisica, è naturale che essa stenti ad affermarsi ovunque.

Nella nostra Scuola si studiano i « materiali da costruzione », e, se è consueto per gli ingegneri costruire con materiali microcristallini, è impossibile convincerli che,

se non fabbricano in monocristallo, la loro costruzione non è solida.

Ancor più difficile sarebbe convincere l'uomo della strada, che abbia ricevuto una bottiglia in testa, che il vetro non è solido perchè non è cristallino.

Sicchè è ancora molto frequente la definizione di solido come « edificio stabile di atomi ». Se l'edificio ha struttura periodica spaziale, il solido è cristallino. Se è a struttura non periodica, il solido è amorfo; classico è l'esempio dei vetri.

Comunque il fisico è nettamente orientato verso il connubio solido — monocristallo, anzi solido — (monocristallo ideale).

Del monocristallo egli conosce da tempo le imponenti esemplificazioni fornite dalla natura, le affermazioni della cristallografia, l'ideazione microscopica di Haüy, il gruppo delle 14 cellule elementari di Bravais.

E la fisica dei solidi, del monocristallo, si sviluppava fino a 50 anni or sono fondandosi sulle leggi della cristallografia coordinate dall'idea di Bravais. Ma occorre sostanzialmente la goniometria delle faccine cristalline.

Erano già possibili ricerche sulle proprietà interne del cristallo ed ogni capitolo della fisica era stato chiamato a collaborare; si ebbero le proprietà vettoriali dei cristalli legate alla loro anisotropia: le proprietà elastiche, quelle termiche, talune proprietà

elettriche e principalmente le proprietà ottiche.

Amplissimo fu il contributo documentario apportato dall'ottica polarimetrica alla conoscenza dell'interno del monocristallo.

Ora ecco aprirsi, non sono ancora cinquant'anni, una pagina nuova per la fisica del cristallo: è annunciata da Laue (1912), è iniziata sperimentalmente nello stesso anno col lavoro di Laue, Friedrich e Knipping; seguono i lavori dei Bragg, di Debye e Scherrer e di innumerevoli altri studiosi: la conoscenza della struttura cristallina si trae dalla diffrazione mediante i raggi X, cioè da un mezzo di indagine che è associato ad una lunghezza d'onda di dimensioni atomiche.

La struttura del reticolato cristallino viene rivelata senza che occorra la presenza di faccine cristalline misurabili; e molti anni devono passare perchè via via, fino ad anni molto recenti, si rivelino tutte le possibilità che la diffrazione dei raggi X offre alla conoscenza del cristallo.

Intanto, nell'intervallo fra le due guerre mondiali, viene a delinearsi in forma sistematica un nuovo aspetto della fisica dei cristalli: l'importanza di eventuali imperfezioni (chimiche o geometriche o energetiche) del reticolato cristallino sulle sue proprietà. Paladino fu Smekal, oggi spesso dimenticato, che con i suoi lavori sui Lockerstellen (1927) insiste sull'importanza di queste imperfezioni, almeno per quanto riguar-

da quelle proprietà del monocristallo che oggi si chiamano appunto *defect sensitive* (e in italiano diremo sensitive o sensibili alle imperfezioni).

Nè mancavano i sintomi, e già lontani, di proprietà sensibili alle imperfezioni: la colorazione di certi magnifici cristalli naturali, la fosforescenza, la colorazione artificiale delle gemme e forse anche altre.

Dal 1927 passa ancor quasi un decennio prima che la fisica moderna dei solidi dilaghi in campo teorico e in campo sperimentale. Dilaga in campo teorico con la felice applicazione (1931-1935) della meccanica ondulatoria al reticolo periodico atomico del monocristallo. Questa teoria porta alle così dette « bande (dei livelli) di energia » permesse, che si dicono semplicemente « bande di energia permesse » per gli elettroni del reticolo atomico, alternate alle « bande di energia » proibite. Ciò che davvero è rilevante in questa teoria è che essa raccoglie in un unico schema il monocristallo isolante, quello a conduzione detta metallica, quello semiconduttore; sono i tre tipi oggi noti per la conduzione elettronica nei monocristalli.

Vi ritorneremo più tardi; ma prima avvertiamo che, per semplicità e per l'importanza tecnica rivelatasi, parleremo solo di monocristalli di un elemento chimico con cellula di Bravais cubica. Sebbene per i monocristalli più famosi (germanio, silicio) la cellula elementare è cubica ma non proprio della forma più semplice, noi penseremo sempre al reticolo cubico costituito da atomi tutti dello stesso elemento chimico distribuiti ai vertici di un reticolo puramente cubico.

I fenomeni di cui tratteremo non giungono fino ad interessare il nucleo se non in problemi collaterali, come ad es. in talune analisi nelle quali si ricorre ai traccianti radioattivi, sicchè non è ancora il caso di limitarsi al monocristallo

mononuclide ⁽¹⁾, cioè formato da atomi aventi ugual nucleo.

Dicevamo, dunque, dell'importanza dei fenomeni sensibili alle imperfezioni. Il loro studio impone al fisico di operare su monocristalli ideali, cioè esenti da tali imperfezioni, se si vuole che i risultati sperimentali diano le proprietà vere, dette anche « intrinseche », della sostanza solida.

Il limite di impurità (imperfezioni chimiche) saggiato con i più raffinati mezzi dell'analisi chimica classica non va oltre 1 su 10⁵; come ordine di grandezza si tratta di 1 atomo spurio su 100 000 atomi di base. In un reticolo cubico semplice ciò significa che in media si ha un atomo spurio su di una cinquantina di atomi di base in fila su di un asse cristallino. Ma, dato l'ordine di grandezza del lato della cellula di Bravais, si tratta ancora di circa 10¹⁸ atomi di impurità al (cm)³.

Per talune proprietà insensitive il cristallo può definirsi buono.

Ma per certe altre no! Se ogni atomo di impurità fornisce al cristallo un portatore di elettricità con mobilità dell'ordine di solo

$$1 \frac{\text{cm}^2}{\text{sec} \cdot \text{volt}}$$

(e sono supposizioni ragionevoli e moderate) il monocristallo puro potrebbe essere isolante, e quello detto puro dal chimico classico potrebbe già condurre degli ampères di corrente elettrica al (cm)² sotto una intensità di campo elettrico dell'ordine di qualche decina di volt al centimetro.

L'analisi spettroscopica classica può controllare limiti di purezza migliori di un ordine di grandezza, cioè 1 atomo su 10⁶. La spettroscopia di massa, nei casi più fortunati, procede ancora di un ordine; siamo ad 1 atomo su 10⁷.

⁽¹⁾ Il termine « mononuclide », ora largamente usato in fisica nucleare, è stato coniato tra le mura di questa Scuola, perchè se ne conobbe l'utilità in taluni studi di fisica nucleare qui compiuti (F. Demichelis, 1949). Il germanio, elemento chimico, è miscela di 5 isotopi; il silicio, anch'esso elemento chimico, è la miscela di tre isotopi.

Non basta ancora: ebbene saranno i traccianti radioattivi che, quando siano bene applicabili, superano di gran lunga questi limiti: un opportuno bombardamento di neutroni su di un monocristallo mononuclide giunge a far sentire impurità ridotte a forse qualche centinaio di atomi al (cm)³!

Vorremmo dunque dire che il controllo di impurità chimiche può avvenire con mezzi che ormai soddisfano qualunque esigenza.

E monocristalli purissimi se ne possono fare? A parole è semplicissimo. Chi non sa che il ghiaccio dell'acqua del mare è praticamente puro?

Se di una sostanza sono presenti le due fasi liquida e solida ed è presente anche una impurità, per esempio cloruro sodico in acqua, nelle condizioni di equilibrio le concentrazioni della impurità nel solido e nel liquido (rispettivamente) hanno un rapporto definito caratteristico delle sostanze chimiche presenti e della concentrazione stessa; questo rapporto dicesi fattore di ripartizione.

Per impurità che abbassano il punto di solidificazione questo fattore è < 1, cioè è minore la concentrazione nella fase solida.

Per il ghiaccio-acqua questo rapporto è ≪ 1: dall'acqua in cui è sciolto cloruro sodico al 2 % si ottiene ghiaccio ove il cloruro sodico ha concentrazione dell'1 ‰ del 2 %, cioè del 2 su 100 000.

Realizziamo il monocristallo per fusione; dal liquido impuro si trae il monocristallo per inserzione di un germe di esso nel liquido è per suo lento sollevamento con velocità ben determinata. Si ottiene il monocristallo ed il metodo è di J. Czochralski (1918). Per una data impurità, avente favorevole fattore di ripartizione, cioè fattore sensibilmente minore di 1, partendo da un liquido che solo entro certi limiti, quelli di cui è capace l'analisi chimica consueta, è dichiarato puro, si trae un monocristallo ben più puro.

Ma da qualche anno vi è molto di più: è messo a punto il metodo di « fusione per zona sospesa »

(Pfann, 1952). Si parte da un monocristallo ottenuto col metodo precedente e che abbia forma di bacchetta lunga perfino alcuni decimetri e di sezione dell'ordine del $(\text{cm})^2$.

Questa bacchetta viene tenuta per gli estremi, in posizione verticale, in un forno a vuoto o, se non disturba, a gas ben determinato.

Si scalda localmente una corta zona dell'asse verticale della bacchetta fino a fonderla per un tratto di qualche mm. Spostando in altezza la zona di riscaldamento lungo la bacchetta, la zona fusa, « sospesa » per capillarità, si sposta lungo l'intera bacchetta.

Là dove dietro la zona fusa avanzante si riforma il monocristallo, se il fattore di ripartizione ha il valore opportuno, il monocristallo si riforma più puro di prima. Si può far percorrere la zona sospesa alternativamente nei due versi e la purificazione si esalta nella parte centrale della bacchetta; le impurità si raccolgono agli estremi.

Si noti che la purificazione avviene senza che la sostanza in elaborazione tocchi alcuna sostanza estranea. Nei casi classici (germanio, silicio), le impurità si possono ridurre a 1 solo atomo spurio su 10^{10} , e non è da ritenere che questo sia un limite massimo, ma esso risulta ormai sufficiente per ottenere i fenomeni di conduzione elettrica nei semiconduttori, utilizzati dalla tecnica.

Ormai le impurità sono scese a 10^{13} atomi al $(\text{cm})^3$; si incontra nel monocristallo in media un solo atomo spurio ogni circa 2 000 atomi in fila su di un asse del cristallo.

Sono segnalate impurità ridotte ad 1 su 10^{14} . Noi abbiamo l'impressione che questo non sia ancora un limite definitivo, e, d'altronde, certe azioni chimiche, sebbene pericolosissime per le impurità capaci di introdurre ingenuamente durante l'operazione, dovrebbero farci giungere a limiti di purezza ben più elevati.

In conclusione possiamo dire di disporre di mezzi per avere mono-

cristalli purissimi e di poterne controllare le residue infime impurità.

Ma questo non basta al monocristallo ideale; questo deve essere esente anche da imperfezioni geometriche.

Poi spunteranno fuori imperfezioni fisiche, non più geometriche, per esempio imperfezioni di carattere energetico.

Limitiamoci alle imperfezioni geometriche del reticolo già privo di impurità chimiche. Queste imperfezioni geometriche possono ridursi, in uno schema molto rudimentale, soltanto alle seguenti:

— una lacuna (in inglese: vacancy); cioè la sede spettante ad un atomo secondo il reticolo regolare, è vuota;

— un eccesso, cioè un atomo, detto *interstiziale*, occupa un posto che nel reticolato regolare dovrebbe essere vuoto ⁽²⁾.

Molto spesso una di queste imperfezioni costituisce un invito a formarsene altre contigue, che si dispongono lungo una linea, in particolare lungo una retta.

L'imperfezione geometrica diviene una « dislocazione »; e di questa ve ne ha di nuovo due tipi: la dislocazione detta a spigolo (edge dislocation) e quella detta a vite (screw dislocation). Ma noi non ci soffermiamo a definirle.

Se sono presenti queste imperfezioni geometriche, il monocristallo puro non è un monocristallo ideale.

Ed ecco tutti i ricercatori, dedicatisi allo studio dei solidi, tesi a trovar metodi atti a rivelare dislocazioni e a scrutarne la presenza nei migliori monocristalli.

La regola è che ce ne sono miliardi; determinarne in scala atomica l'esistenza e la frequenza è

⁽²⁾ Nel caso, poi, che siano ancora presenti atomi di impurità, questi si sistemano nel cristallo o come atomi interstiziali, oppure come atomi di sostituzione, cioè atomi spuri sostituiti nel reticolo cristallino nel giusto posto spettante ad un atomo della base. Questa forma di impurità è quella che si pensava da tempo presente nei cristalli detti « misti ».

un problema « formidabile », così lo classifica Mac Kay nel suo articolo sull'argomento apparso recentemente nel volume VI dell'imponente trattato di Fisica sperimentale di Marton.

Insomma, sono innumerevoli gli accorgimenti tentati nella ricerca delle dislocazioni, con risultati variamente soddisfacenti.

Da sol forse un paio d'anni è venuto in aiuto il microscopio elettronico che, raggiunti ormai ingrandimenti perfino di due milioni con l'equivalente potere separatore, riesce nell'esame di pellicole sottili cristalline a rivelare perfino i piani reticolari e rendere evidenti addirittura le singole dislocazioni.

Fino a qual punto possa arrivare un esame ottico col microscopio interferenziale, magari a luce polarizzata ellitticamente (una vecchia hobby della mia giovinezza), non è ancor risaputo.

Certamente la determinazione delle dislocazioni è tra i compiti più vivi e ancora incompleti della fisica dei solidi di oggi.

Da molte fonti traggio che le dislocazioni sono un male necessario per l'accrescimento del monocristallo. Ma da poco più di un anno leggo che ciò non è vero; leggo che, se col metodo di Czochralski si ottiene il monocristallo in modo che la sua direzione di accrescimento coincida con un particolare asse cristallografico, le dislocazioni possono essere evitate. Le esperienze, come ormai è il caso più frequente, sono state effettuate su cristalli di germanio e di silicio.

Ma è proprio davvero un bene disporre di monocristalli ormai davvero ideali?

Per talune esperienze direi di no: vedremo fenomeni come la diffusione, come la conduzione nei semiconduttori che vivono grazie alle dislocazioni, nel qual caso è evidente l'opportunità di non toglierne poi troppe.

Come avverrà che, ottenuto il monocristallo purissimo, converrà sporcarlo un pochino a nostra volontà, così c'è anche modo di

imporre dislocazioni a un cristallo quando si pensi che non ne abbia a sufficienza.

Certamente la ricottura del monocristallo, purchè a temperatura non troppo alta, riduce le imperfezioni geometriche; la deformazione plastica ove essa è possibile, per esempio nella laminazione, le moltiplica; l'alta temperatura ne agevola la formazione.

Ma vi è una strada maestra per produrle comandandole abbastanza bene: il monocristallo viene « danneggiato » dalle radiazioni. Si ha, infatti, come fenomeno generale, un « radiation damage » dipendente, s'intende, dal tipo di radiazione e dal tipo del monocristallo.

E il danno da radiazioni non sempre si limita alla sola creazione di dislocazioni che ho avvertito poter essere utile.

Molto più spesso il danno è più sostanziale e deprecato; credo che tutti conoscano quali disastrose conseguenze ha il « radiation damage » ad es. nei reattori nucleari.

Il problema è scottante, sicchè fra i Convegni che ogni anno si ripetono sulla fisica dei solidi, ve ne sono parecchi dedicati esclusivamente al danno da radiazioni.

Questo è per es. il tema di uno degli ultimi Corsi estivi della Scuola Internazionale organizzata dalla Società Italiana di Fisica; è il Corso tenutosi nel settembre scorso presso il Centro Studi Nucleari di Ispra.

Tra le particelle costituenti la radiazione danneggiante vanno ricordati in particolare i neutroni, cui spettano due proprietà vantaggiose: l'elevatissima capacità di penetrazione nei corpi e la produzione, nell'interazione con la materia, di reazioni nucleari che conducono alla formazione di isotopi dell'atomo colpito. Il nuovo atomo prodotto si rivelerà, poi, grazie alla sua radioattività. Ecco un caso dove le cose saranno semplici se il monocristallo sarà anche mononuclide.

Insomma disponiamo oggi di monocristalli non ideali ma già

tanto migliori di quelli di una decina di anni fa da giustificare che si riprenda su di essi la determinazione delle proprietà fisiche.

Quelle insensibili alle imperfezioni non cambieranno gran che; esse hanno già dato costanti specifiche relative ai vari monocristalli, le quali possono dirsi *intrinseche* cioè ormai legate alla materia base del monocristallo. Dalle proprietà sensibili alle imperfezioni, chi sa quanto c'è ancora da aspettarsi.

Facciamo una rapida rassegna.

Cominciamo con la coesione e le proprietà meccaniche.

Dall'elasticità classica macroscopica sappiamo che le due deformazioni in certo modo antitetiche in un solido sono la compressione da pressione uniforme, lo scorrimento da sforzo di taglio.

La deformazione da pressione uniforme, cioè la compressione, è stata seguita fino a pressioni dell'ordine di $2 \cdot 10^{10}$ newton al m^2 ⁽³⁾ con riduzione di volume del solido perfino a circa il 50 %. Si è confermata in essa l'anisotropia del monocristallo non cubico. I moduli di compressibilità uniforme appaiono insensibili alle imperfezioni, hanno quindi valore intrinseco.

Al contrario lo scorrimento è tra le più sensitive proprietà rispetto alle dislocazioni.

Di qui l'assoluto disaccordo, talvolta perfino nel rapporto da 1 a 10^6 , disaccordo noto da molti decenni, tra le previsioni teoriche ed i valori sperimentali della resistenza alla trazione e del modulo di scorrimento.

È già quasi mezzo secolo, infatti, da che sono stati descritti gli strani comportamenti dei monocristalli metallici, che sono plastici agli sforzi di taglio.

In particolare anche il monocristallo cubico è anisotropo.

Dai monocristalli annunciati come privi di dislocazione scaturirà finalmente l'accordo tra teoria ed

esperienza? È una domanda ancor senza sicura risposta.

Passiamo alla diffusione; essa è tra i più antichi fenomeni classificati tra quelli molecolari. Non ne può essere sottovalutata l'importanza tecnica se si pensa ai sempre più numerosi processi di sinterizzazione, alla produzione dei fosfori e, su di un livello industriale anche maggiore, alle applicazioni tecniche dei semiconduttori.

In tutti questi casi la diffusione nel monocristallo giuoca un ruolo di prim'ordine.

Così, ad es., il monocristallo di germanio o di silicio purificato deve essere « drogato » e le piccole quantità della « droga » (ne riparleremo tra un poco) vanno distribuite nel monocristallo o per fusione o, molto spesso, per diffusione tra solidi.

Come fisico puro vi dirò, poi, che gli studi sulla diffusione dei solidi, a cominciare dall'autodiffusione, cioè diffusione di un solido in se stesso, hanno ricevuto un recente fondamentale impulso dall'impiego dei traccianti radioattivi; in questo caso essi sono isotopi radioattivi delle sostanze diffondenti in studio.

Teorico o tecnico che sia il nostro interesse per la diffusione, sta il fatto, che, per interpretarla, si deve ricorrere alle imperfezioni geometriche del monocristallo. Senza lacune o eccessi di atomi, con la sola possibilità di sostituzioni di scambio, ben poco appiglio avrebbe l'esercito degli atomi invasori sul monocristallo ideale.

Chi sa se, ottenuto finalmente un monocristallo senza imperfezioni, se ne trarrà finalmente uno studio soddisfacente sul fenomeno puro della diffusione?

Conduzione termica, capacità termica, calore di sublimazione nei monocristalli sono il complesso delle proprietà termiche macroscopiche che sono poste in primo piano nello studio termodinamico. Le prime due sono caratteristiche di uno dei processi fondamentali di trasporto dell'energia nei solidi. Tutti sappiamo

⁽³⁾ Circa 200 000 atmosfere; questa vecchia unità è pari a 101 325 newton al m^2 ; il newton e il metro quadrato sono le unità coerenti di forza e di area nel sistema internazionale.

quanto interessino ad es. nello studio del reattore nucleare.

Nella fisica dei solidi, di questi fenomeni termici si dà una interpretazione atomico-quantistica e della prima, la conduzione, si sottolinea il carattere vettoriale nel monocristallo non cubico. Ma direi che questi fenomeni non hanno condotto a innovazioni profonde come in tanti altri casi.

D'altronde direi che le tre proprietà termiche qui indicate hanno tutte carattere intrinseco.

Passiamo alle proprietà magnetiche. Accanto a quello dei semiconduttori, il campo del magnetismo è stato recentemente uno dei più fruttuosamente coltivati.

I parametri ferromagnetici utili all'ingegneria sono stati bene spesso profondamente mutati e non soltanto raffinati.

Lo studio dei ferriti e delle polveri ferromagnetiche ha condotto, come scrive Brooks nel trattato di Goldman su *Science and Engineering Materials*, alla « invenzione » di un gruppo di nuove sostanze magnetiche offerte ai tecnici. La conoscenza dei domini ferromagnetici si è ampliata sino a potersi dire sotto vari aspetti conclusa. L'origine teorica della interazione tra gli spin magnetici contigui si è perfezionata dalla forma prima di Heisenberg, fino a dar ragione dei fenomeni magnetici di nuovo tipo: il ferrimagnetismo e l'antiferromagnetismo, che, nel complesso, si raccolgono nel nome di magnetismo di Néel, il fisico di Grenoble che è nostro dottore in ingegneria honoris causa.

Qui meritano anche un cenno:

l'insieme delle sostanze ferromagnetiche, se non monocristalline, almeno a magnetizzazione orientata,

i magneti ad altissima resistenza elettrica,

il ciclo di isteresi praticamente rettangolare ottenuto dai ferriti.

In quest'ultimo caso l'isteresi e la forza coercitiva hanno un'importanza predominante. Ma non si brancola più nel buio sui motivi

dell'esistenza di entrambe: la loro origine è nelle imperfezioni!

Temperatura di Curie, magnetizzazione di saturazione sono insensibili alle imperfezioni, dunque proprietà intrinseche del materiale; permeabilità magnetica iniziale, isteresi, campo coercitivo, ne sono proprietà sensitive.

Fra tutto ciò che di nuovo è stato messo al fuoco nel progresso del magnetismo, due fatti sperimentali vanno sottolineati:

— la capacità mediante la diffrazione dei neutroni di stabilire l'esistenza di domini ferromagnetici a magnetizzazione spontanea di saturazione, cosa inutilmente tentata con la diffrazione dei raggi X;

— la possibilità, col raffinamento dell'elementarissimo metodo delle polveri di Bitter, di determinare l'intersezione delle pareti di Bloch con il piano speculare del campione in studio microscopico. Ricordiamo che le pareti di Bloch del ferromagnetismo sono i sottili strati di materia separanti domini di Weiss contigui, nello spessore delle quali (anche meno di 10^{-6} m) l'asse degli spin muta bruscamente orientazione.

Il tempo stringe e il pezzo forte attende ancora di esservi presentato. Via la superconduzione, via il grosso bagaglio della conduzione non elettronica, via l'effetto Hall.

Attacchiamo l'altro dei capitoli più brillanti della fisica dello stato solido: la conduzione negli elementi chimici semiconduttori, monocristallini; s'intende che germanio e silicio fanno gli onori di casa.

Si è già detto qualcosa sulla teoria delle « bande di energia ».

In scala macroscopica rispetto alla scala atomica i livelli energetici permessi per gli elettroni nel reticolo cristallino si raccolgono in bande « permesse » così fitte di livelli di energia sovrapposti da potersi considerare continue. Bande permesse di energia (media) via via crescente possono accavallarsi; più interessante è il caso che, al crescere dell'energia dei livelli, le bande siano distaccate

da un intervallo di livelli energetici proibiti costituenti a loro volta una banda ma « proibita ». Le bande di energia risultano allora alternativamente permesse e proibite.

A seconda della costituzione delle nuvole elettroniche e d'accordo col principio di esclusione di Pauli, le bande permesse, a cominciare da quella delle minori energie, sono occupate da elettroni cui compete livello energetico via via maggiore fino a completare la banda, la banda dicesi *piena*. Se l'atomo dispone di ulteriori elettroni, essi passano ad occupare la banda superiore, e così via.

Alla fine si perviene ad una banda permessa più « alta » (cioè più energetica) delle precedenti che è giusto giusto completamente occupata.

La successiva banda permessa è allora vuota. Il monocristallo è *isolante*; l'ultima banda completamente occupata è la banda detta di valenza, la successiva è la banda di conduzione, che è vuota negli isolanti.

Se invece questa ultima banda è solo parzialmente occupata, si ha il monocristallo a conduzione metallica, elettronica, e quest'ultima è la banda di conduzione. Lo schema accennato vale a 0°K , zero assoluto. Per un metallo a temperatura via via più alta la banda di conduzione, invece di contenere ben impacchettati gli elettroni nei corrispondenti livelli di energia di valore gradualmente crescente comincia a disordinarsi; i livelli energetici, più alti del limite di energia valido per lo zero assoluto, cominciano a trovarsi occupati e livelli energetici più bassi di conseguenza liberi.

Ma un isolante continuerà a essere tale finché, a temperatura abbastanza alta, non spiri aria di rivoluzione al punto che dall'energia del moto termico, un sensibile numero di elettroni, rapidamente crescente con la temperatura, riceva energia quanto occorre per saltare dalla banda di valenza a quella di conduzione.

Questa non è più vuota, si ha

una conduzione elettronica subordinata al numero di elettroni che vi sono pervenuti.

E la banda di valenza, ormai sol più *quasi* piena, partecipa contemporaneamente alla conduzione: le lacune createsi nella banda di valenza si chiamano « buchi » positivi perchè corrispondono ad atomi del reticolato cristallino che hanno perso l'elettrone saltato alla banda superiore. Ma la conduzione della banda di valenza è ancora elettronica come vedremo tra un momento e la diremo « conduzione da buchi (positivi) ».

L'isolante è divenuto un semiconduttore; nel nostro caso è un semiconduttore detto intrinseco perchè ottenuto da un monocristallo puro, ideale, che sarebbe isolante a bassa temperatura.

La caratteristica della semiconduzione dalla quale derivano tutte le portentose proprietà di questa classe di sostanze, è la duplice qualità di conduzione entrambe da elettroni, ma rispettivamente di due tipi: quelli liberi e quelli associati ai buchi.

I primi sono elettroni in eccesso giunti alla banda di conduzione che dovrebbe essere vuota; i buchi corrispondono agli elettroni saltati via dalla banda di valenza.

Questa è l'idea stramba alla quale si deve abituare chiunque venga a contatto con i semiconduttori.

Coloro che hanno commentato questa stramberia, che per gli iniziati corrisponde invece ad una interpretazione teorica ben fondata, sono ricorsi ad analogie più facilmente abbordabili che non la teoria.

Stockley, premio Nobel per il transistor insieme con i due suoi più insigni collaboratori Bardeen e Brattain, suggerisce di pensare, in luogo delle bande di energia, a due ampie rimesse per automobile, una al piano terreno l'altra al primo piano; ed io ripeto qui la sua analogia parafrasandola un po'.

Supponiamo la rimessa al pianterreno piena e a porte chiuse; quella al primo piano sia vuota.

Provatevi a rimuovere le automobili del pianterreno nell'ambito della rimessa; non vi riuscirete. La rimessa è l'analogo della banda di valenza piena; nella rimessa l'automobile, nel monocristallo l'elettrone, portatore di elettricità, sono bloccati.

Ma pensiamo ora che qualche vettura sia portata dal piano terreno al primo piano con congruo aumento della sua energia di posizione. Ora le automobili al piano terreno sono rimuovibili; nella banda di valenza del semiconduttore c'è conduzione.

Ma un osservatore che si affacci al piano superiore è piuttosto colpito da automobili che cambiano di posto; esse sono così poche! Lo stesso osservatore che si affacci al piano terreno è piuttosto colpito dai pochi vani ancor disponibili (i « buchi »). Se vi sarà spostamento di automobili preferirà dirvi che i buchi si sono spostati. Ma sarà subito d'accordo nel riconoscere che buco mosso in un verso è automobile mossa in verso opposto.

Entrambi i movimenti sono movimenti di automobili sebbene qualche volta risulti comodo pensare piuttosto ai buchi.

Così, per il semiconduttore, in realtà sono elettroni a spostarsi sia nella banda di conduzione sia nella banda di valenza ancor quasi piena; è in quest'ultima che si preferisce pensare al movimento dei buchi, che avviene in verso opposto a quello degli elettroni.

Da un volume di Dunlap sulla fisica dei semiconduttori traggio un altro esempio forse più scolastico. È un'esperienza che chiunque può fare. Si abbiano due tubi di vetro uguali e chiusi agli estremi: l'uno è ben pieno di sfere per cuscinetti a rotolamento, l'altro è vuoto. Il primo tubo corrisponde alla banda di valenza piena, l'altro alla banda di conduzione vuota. Incliniamo i due tubi; in quello pieno le sfere non si muovono perchè vi sono stipate; in quello vuoto le sfere non si muovono perchè non ce ne sono; in totale non c'è conduzione (di sfere).

Si passino alcune sfere dal tubo che era pieno al tubo che era vuoto; di nuovo si inclinino i due tubi. Non sarà sporadico il caso dello studente che, descrivendo i fatti osservati, vi dirà: nel tubo quasi vuoto le sfere sono discese, nel tubo quasi pieno si è formato il vuoto in alto. È giusto! ma solo per comodità è stato cambiato il soggetto; le sfere sono discese sia nel primo tubo sia nel secondo.

Nel semiconduttore sono elettroni a cooperare alla conduzione sia che appartengano alla banda di conduzione sia che, appartenendo alla banda di valenza, faccia comodo pensarli piuttosto come buchi muovendosi in verso opposto.

Per ciò i buchi si comportano come portatori di carica elementare ma positiva e di massa ancor paragonabile a quella dell'elettrone.

Le applicazioni non derivano dal monocristallo semiconduttore intrinseco finora qui immaginato; esse si hanno dal germanio e dal silicio perchè, dopo averli ottenuti in monocristalli purissimi (ho già detto: ≈ 1 solo atomo di impurità su 10^{10} di base) li si drogano aggiungendo impurità in ragione di ≈ 1 atomo su 10^8 di base.

Germanio e silicio sono elementi del quarto gruppo della classificazione di Mendelejeff, tetravalenti, quindi l'atomo dispone di quattro elettroni di valenza. Essi si drogano con elementi *accettori* che sono trivalenti (es.: boro, alluminio, indio, gallio) o con elementi *donatori* che sono pentavalenti (es.: fosforo, arsenico, antimonio, bismuto).

Questi atomi di impurità sembra si inseriscano nel monocristallo come atomi di sostituzione e la loro presenza crea nel quadro dei livelli di energia nuovi livelli possibili che si inseriscono nella zona proibita tra banda di valenza e banda vuota.

Ma i livelli di impurità portati dagli elementi accettori, che sono disposti a ricevere elettroni, perchè sono atomi trivalenti in

un reticolo dove la norma è quella di essere tetravalenti; quindi facilmente questi livelli nuovi di energia captano elettroni dalla banda di valenza. Sono nuovi livelli permessi, di poco superiori al limite superiore della banda di valenza.

Anche a temperature relativamente basse elettroni saltano dalla banda di valenza a questi nuovi livelli permessi; l'atomo di impurità è accettore di elettroni e li prende dalla banda di valenza ove si formano altrettanti buchi. Nel semiconduttore drogato da un accettore si ha conduzione per buchi; il semiconduttore si dice di tipo *p* (positivo).

Invece un atomo di impurità pentavalente crea nel cristallo un livello di energia nuovo, permesso, nella banda proibita, ma prossimo al limite inferiore della banda di conduzione. Questo atomo di impurità, sistematosi in un reticolo di atomi tetravalenti ha, infatti, un elettrone di troppo, e lo abbandona facilmente perchè vada nella banda di conduzione sovrastante. Si ha conduzione per elettroni soprannumerari ora esistenti nella banda di conduzione; l'atomo di impurità è donatore di elettroni; il semiconduttore dicesi di tipo *n* (negativo).

Si noti come, a diversità del semiconduttore intrinseco, una sola specie di conduzione (o per elettroni o per buchi) è presente in ciascuno dei due casi.

Come dal giuoco di laminette di germanio o silicio, drogate al tipo *n* o al tipo *p* si traggano superficie di contatto *p-n* o in successione *p-n-p*, come se ne ottengono i raddrizzatori, le pile fotoelettroniche (le pile solari), i transistori, non vi è qui nè modo nè tempo di dirlo.

Ma chiunque abbia sentito qualcuno di questi nomi, magari abbia già fatto peccato di desiderio per una radiolina tascabile, a transistor, comprenderà quale trionfo:

— della fisica dei monocristalli,

— delle impurità ignote all'analisi chimica classica,

— delle proprietà sensibili alle imperfezioni, si sia avuto in questo campo.

Il trionfo si è esteso alla fotoconduzione, un rompicapo della fisica dei solidi da un secolo in qua, si è esteso ai fosfori, rompicapo ancora più grosso, cui fu decisamente applicato per il passato il metodo del « provare e sbagliare » (empiricamente) ⁽⁴⁾.

E molto si è fatto nel campo dei fosfori, luminosi per impurità. Si tratta di una irrisoria produzione mondiale dell'ordine di forse 1000 tonnellate all'anno mentre la produzione p. es. di aringhe è dell'ordine del milione di tonnellate annue. Ma è una produzione che oggi domina il campo dell'illuminazione.

È una piccola produzione, ma dove va l'oscilloscopio catodico e la televisione senza di essa?

E non posso tacervi la mia ammirazione per il fosforo monocristallino che ha dato gli scintillatori per radiazioni nucleari; sono dispositivi di misurazione per queste radiazioni, che sono messi a punto solo da qualche anno, e che ancor molto fanno sperare per il loro impiego in metrologia.

È forse a quest'ora che posso parlare ancora della fotoelettronica e dell'effetto Volta nei monocristalli, o del termistore, o del monocristallo ferrodieletrico nuovo materiale cristallino a disposizione di nuovi artifici per la fisica e per l'elettrotecnica, o almeno di quelle realizzazioni semplici, ma non proprio semplici, che hanno permesso di sostituire i vari tipi di monocristalli piezoelettrici artificiali oggi sul mercato al monocristallo di quarzo, minerale divenuto ormai insufficiente per la valanga di richieste di lamine piezoelettriche per la tecnica?

⁽⁴⁾ Nell'articolo già citato di Brooks nel volume del Goldman lo si chiama il metodo « trial and error »; non credo che lo si chiami così a disprezzo dell'Accademia del Cimento. Il motto di questa è: « provando e riprovando » ma scientificamente. Il metodo « trial-error » è: « provando e sbagliando » (empiricamente).

No. Devo terminare.

Non si diffonda la voce che io in qualche decina di minuti vi ho parlato *della* fisica dei solidi; vi ho parlato *di* fisica dei solidi; la mia è una pennellata scarna, sull'esempio del macchiavolo più rude, per una scena che in questi anni è dominata da due capitoli della fisica: la fisica dei solidi, la fisica nucleare.

La fisica nucleare predomina; ma la fisica dei solidi è buona seconda.

Mi è accaduto esattamente nove anni or sono, nel novembre 1951, di prender parte ad una missione internazionale di studio, anzi di esserne messo a capo.

Era auspice l'UNESCO; era tema: « il passaggio dei risultati della ricerca pura al campo delle applicazioni ». Era desiderio che dalla missione si ottenessero dati capaci di giovare ad un più rapido trasferirsi delle nuove conoscenze dalla ricerca pura al campo applicato.

All'occhio di coloro che propongono tale missione erano certamente presenti i parecchi casi nei quali vari decenni passarono tra la scoperta e la utilizzazione pratica; esempio classico: la piezoelettricità.

Ma questo non è avvenuto nella fisica di oggi nè per la parte nucleare nè per la parte dei solidi. Ricerca pura e applicazioni procedono speditamente a braccetto.

Non è stato male impiegato il larghissimo denaro dato all'una e all'altra per favorire gli sviluppi sia della ricerca pura sia di quella applicata.

Ed una conclusione sola vorrei trarre: per il progresso scientifico-tecnico più efficiente, ricerca pura e ricerca applicata devono entrambe essere ampiamente ed equamente alimentate da propri mezzi intellettuali e da propri mezzi economici. E van collegate, non disgiunte.

Altrimenti o le applicazioni brancolano nel buio dell'empirismo o la scienza pura si chiude nella sua torre d'avorio.

Due cose da deprecare.

Eligio Perucca

Note sulla produzione nucleare dell'energia elettrica

GUIDO BONICELLI, dell'AEM di Torino, illustra l'attuale situazione e le prospettive della produzione nucleare dell'energia elettrica. Ne sintetizza gli aspetti tecnici e quelli economici, nonché i problemi derivanti dall'affiancarsi della produzione nucleare a quella dei preesistenti impianti idroelettrici e termoelettrici. Riferisce, tra l'altro, su quanto emerso in argomento nella recente Sessione di Madrid della Conferenza Mondiale dell'Energia.



Trascorsi poco più di vent'anni dall'epoca della prima reazione a catena di fissione dell'uranio, e diciotto dall'entrata in funzione del primo reattore nucleare — quello realizzato da Fermi a Chicago — il futuro della produzione di energia da fonte nucleare si presenta ancora con non poche incognite e difficoltà.

La quantità di studi, ricerche, realizzazioni sperimentali che fece seguito alle prime tappe nello sviluppo della tecnica nucleare nelle Nazioni scientificamente e tecnicamente più progredite ha assunto proporzioni veramente eccezionali. Nella storia della tecnica non fu mai visto sforzo più intenso e più esteso per giungere, nel minor tempo possibile, alla pratica ed economica applicazione di una nuova scoperta. Si tratta in effetti di un ritrovamento di valore straordinario o, per meglio dire, di un'apertura su di un immenso campo, interamente nuovo, di conoscenze e di applicazioni con prospettive industriali di enorme portata. Ed anche se parte rilevante dell'attività sviluppata nel nuovo settore fu stimolata da possibili risultati di interesse militare e politico, essa ha già portato a benefici di grandissimo valore nella vita civile.

Tuttavia, per quanto in particolare riguarda la produzione di energia da fonte nucleare, al grande ottimismo e fiducia suscitati dalle prime realizzazioni sperimentali, è subentrata una più cauta valutazione delle prospettive per il futuro meno lontano. Questo smorzamento del tono delle previsioni ha portato anche a drastiche riduzioni nei programmi di realizzazioni su scala industriale: tipico l'esempio della Gran Bretagna.

Era in effetti eccessivo l'ottimismo di qualche anno fa, poggiante su un limitato numero di impianti sperimentali in esercizio; la successiva esperienza di costruzione e di funzionamento ha

messo in maggior luce la complessità dei problemi tecnici, in un settore così nuovo, a fronte delle esigenze di corrente esercizio industriale ed ha sottolineato il divario tuttora esistente fra costo dell'energia elettrica ottenibile utilizzando le fonti tradizionali, idriche o termiche, e costo dell'energia prodotta dagli impianti nucleotermoelettrici. D'altro canto, le preoccupazioni che qualche anno fa sussistevano, almeno in Europa, circa le future disponibilità di combustibile, e che avevano ad esempio condotto al vasto programma di impianti nucleari della Gran Bretagna, si sono per varie cause sensibilmente attenuate. La recente scoperta di cospicui giacimenti di combustibili liquidi e gassosi, il miglioramento dei metodi di ricerca e di valutazione dei giacimenti stessi, la sovrapproduzione di carbone in alcuni Paesi europei, hanno allontanato nel tempo la paventata epoca di possibile esaurimento delle risorse tradizionali.

Se tutte queste circostanze hanno portato ad una più ponderata valutazione dei vantaggi conseguibili a breve scadenza con la produzione nucleare, l'importanza di tale produzione in un futuro meno prossimo conserva tuttavia pieno valore. Il rallentamento verificatosi in taluni programmi di attuazione industriale non ha attenuato, nei vari Paesi, il ritmo della ricerca e degli esperimenti volti al miglioramento tecnico ed economico delle soluzioni sinora adottate.

In varie sedi — fra cui la recente Sessione di Madrid della Conferenza Mondiale dell'Energia — si è confermata la fiducia nella possibilità di pervenire, nel volgere di qualche anno, a sostanziali miglioramenti soprattutto nel senso di contenere i costi di produzione dell'energia nucleare in limiti di concorrenza con quelli dell'energia da fonte tradizionale. È riconosciuta, a tale scopo, la neces-

sità di procedere con larghezza di mezzi, anche sul piano industriale, continuando ad affrontare la costruzione di grosse centrali pur con sacrificio economico, per affrettare l'avvento dell'epoca in cui la produzione nucleare, sorretta dagli indiscutibili vantaggi di larga disponibilità di combustibile e di enorme concentrazione energetica, potrà avere pieno sviluppo.

Orientamenti tecnici.

La vasta gamma dei reattori nucleari, che aveva caratterizzato sin dai primi sviluppi la nuova tecnica, ha mantenuto, ed anzi accresciuto, la sua ampiezza. Tuttavia, alcuni tipi sono oggi maggiormente sperimentati e su di essi, di conseguenza, è venuta e viene a cadere la scelta per le prime realizzazioni industriali. Del resto, anche per questi, l'esperienza è relativamente limitata. Oltre agli amplissimi lavori di ricerca e di prova compiuti su impianti-pilota, le centrali per produzione di energia su scala industriale, oggi in esercizio nel mondo, si contano ancora nell'ordine delle unità. Queste centrali si trovano tutte nei quattro Paesi che hanno sviluppato sin dall'immediato dopoguerra una politica nucleare autonoma, dedicandovi mezzi ingenti in rapporto alle possibilità finanziarie nazionali. Stati Uniti, Unione Sovietica, Gran Bretagna e Francia sono le sole Nazioni che hanno oggi in esercizio impianti nucleari che possano considerarsi come vere e proprie centrali di produzione, pur se ancora con funzioni prevalentemente sperimentali.

È ben nota la divergenza fra gli orientamenti assunti, sotto l'aspetto tecnico, in ciascun Paese. Stati Uniti ed Unione Sovietica che, per esigenze militari, avevano realizzato i costosissimi impianti per la separazione isotopica dell'uranio, affrontarono prima o

poi la costruzione di reattori ad uranio arricchito, i quali consentono l'impiego di acqua naturale come moderatore e refrigerante. Gli Stati Uniti moltiplicarono sin dall'inizio gli sforzi di ricerca e perfezionamento in tutte le possibili direzioni, realizzando numerosi reattori sperimentali dei tipi più diversi, ma, in definitiva, avviarono le prime iniziative industriali sul tipo ad uranio leggermente arricchito, con acqua naturale come moderatore e refrigerante. L'Unione Sovietica, avviatasi inizialmente su di un tipo di reattore ad uranio naturale con moderazione a grafite e refrigerazione ad acqua, passò successivamente all'uranio leggermente arricchito, con moderazione e refrigerazione ad acqua naturale, dando soprattutto impulso alla circolazione dell'acqua in tubi in pressione ed al surriscaldamento del vapore nell'interno del reattore.

Gran Bretagna e Francia, che intendevano svolgere un'attività autonoma e non disponevano che di uranio naturale, si volsero invece ai reattori atti all'impiego di questo tipo di combustibile, in particolare ai reattori con moderatore grafite e refrigerazione a gas. La Gran Bretagna impostò subito il suo vasto programma di impianti di potenza adottando il reattore ad uranio naturale moderato con grafite e refrigerato con anidride carbonica. La Francia seguì analogo orientamento, senza tuttavia avviare un programma di costruzioni altrettanto esteso.

Lo sviluppo di queste diverse tendenze ha portato alle prime concrete realizzazioni su scala industriale. Oggi infatti, a prescindere dagli impianti che, pur producendo energia elettrica, hanno scopi essenzialmente sperimentali con potenza relativamente limitata, sono in esercizio:

— negli Stati Uniti la centrale di Shippingport ad uranio leggermente arricchito ed acqua in pressione con 60 MW di potenza elettrica, in funzione ormai da oltre tre anni, e quella di Dresden ad uranio leggermente arricchito ed acqua bollente con 180 MW di potenza elettrica, il cui funzionamento ha avuto inizio da pochi mesi;

— nell'Unione Sovietica la centrale di Troitsk in Siberia ad uranio naturale con moderatore grafite e refrigerazione con acqua, nella quale una prima unità di 100 MW è in esercizio dal 1958, e la più recente centrale di Voronezh ad uranio leggermente arricchito ed acqua in pressione con unità di circa 200 MW;

— in Gran Bretagna la centrale di Calder Hall ad uranio naturale, grafite ed anidride carbonica, in esercizio dal 1956, con 140 MW elettrici, e la molto simile centrale di Chapel Cross ultimata lo scorso anno;

— in Francia il complesso di reattori di Marcoule, con potenza elettrica di circa 60 MW, avente tuttavia finalità quasi esclusivamente limitate alla sperimentazione ed alla produzione di plutonio.

Sono attualmente in costruzione più o meno avanzata una ventina di altre centrali, nei quattro Paesi già ricordati ed anche in Italia, Giappone, Canada, Cecoslovacchia. La maggior parte di questi impianti è dotata di reattori ad uranio naturale, grafite e gas, ovvero ad uranio leggermente arricchito ed acqua, ripetendosi così, con gradualità miglioramenti, gli schemi degli impianti già in esercizio; ma alcuni battono altre vie che, già da tempo studiate e sperimentate, ancora non avevano portato ad impianti di potenza. Ad esempio, il reattore canadese ad uranio naturale ed acqua pesante, quello cecoslovacco analogo, ma con refrigerazione ad anidride carbonica, la centrale americana Enrico Fermi con reattore veloce autofertilizzante, quella, pure negli Stati Uniti, con uranio arricchito, grafite e refrigerazione mediante sodio liquido.

Tutti questi impianti sono costruiti con lo scopo essenziale di ampliare l'esperienza già conseguita, introdurre gradualmente miglioramenti tecnici ed economici, mettere alla prova nuovi tipi di reattori. Nessuno ha, per ora, la pretesa di contribuire vantaggiosamente alla produzione di energia elettrica, alla quale tutti i Paesi continuano per ora a far fronte con la costruzione di impianti tradizionali. Il solo pro-

gramma inglese, varato qualche anno fa, e comprendente numerose centrali di grande potenza, era concepito per contribuire sostanzialmente, seppure con costi più elevati, al fabbisogno nazionale. Esso tuttavia ha recentemente subito, come accennato, un notevole rallentamento. Le attività nei vari Paesi mirano dunque ad accelerare, quanto più è possibile, il conseguimento di caratteristiche tecniche ed economiche degli impianti, tali da permettere di contribuire al fabbisogno di energia senza sacrifici economici.

Questo lavoro si svolge secondo tre principali linee di azione:

— perfezionamento dei tipi già oggi più sperimentati, cioè quelli ad uranio naturale, grafite e gas, e quelli ad uranio arricchito ed acqua naturale;

— messa a punto di altri tipi, sempre a neutroni moderati, dai quali possono anche aspettarsi risultati economicamente assai interessanti;

— ulteriore sviluppo, sino alla pratica realizzabilità industriale, dei reattori veloci autofertilizzanti.

Per quanto concerne il primo punto, una graduale evoluzione è in corso sotto molti aspetti: più intensa utilizzazione del combustibile nucleare prima della sua rimozione e rigenerazione, accrescimento delle temperature di regime del reattore e quindi di uscita del fluido refrigerante, ottenimento di più elevate potenze specifiche, riduzione dei sovrabbondanti margini di sicurezza e cautele varie adottati nei primissimi impianti, rinuncia a talune complicazioni costruttive anch'esse introdotte inizialmente per maggior garanzia di buon funzionamento e sicurezza, normalizzazione di elementi costitutivi e di processi di lavorazione, aumento dei limiti di potenza di ogni singolo reattore imposti da esigenze tecnologiche.

Ingente lavoro è, ad esempio, dedicato alla tecnica di preparazione degli elementi di uranio, naturale od arricchito, tecnica che comporta, tra l'altro, l'approfondimento di conoscenze metallurgiche e chimiche su materiali il cui impiego industriale è del tutto nuovo. All'uranio metallico puro,

soggetto a cambiamenti di stato allotropico ed a deformazione per lo sviluppo di prodotti gassosi della fissione, si affiancano polveri di ossido di uranio o di carburo di uranio sinterizzate, ossido di uranio disperso in matrici ceramiche, leghe di uranio con altri metalli. Analoga evoluzione si verifica per l'incamiciatura degli elementi stessi, la quale ha dato luogo, tra l'altro, ad estese ricerche sulla corrosione da parte del fluido refrigerante. Oltre alle leghe a base di magnesio, già largamente adottate nei reattori a gas ed a quelle a base di zirconio dei reattori ad acqua, vengono sperimentati acciai inossidabili, leghe di berillio, leghe di alluminio ed anche acciai a basso tenore di elementi leganti.

Queste ricerche mirano soprattutto ad elevare, con sufficienti garanzie di sicurezza, le temperature di esercizio per ottenere più alte potenze specifiche — quindi minori costi unitari — e migliori rendimenti della parte tradizionale dell'impianto. Le temperature di lavoro delle prime centrali sono dell'ordine di $250 \div 300^\circ\text{C}$ per i reattori ad acqua, e di $330 \div 370^\circ\text{C}$ per quelli raffreddati a gas, contro temperature dell'ordine di $550 \div 600^\circ\text{C}$ nelle moderne grandi centrali termoelettriche. Questo divario ha naturalmente sensibile influenza sulle dimensioni, sul costo e sul rendimento della sezione termica della centrale nucleare.

La graduale evoluzione del reattore refrigerato a gas è dovuta non soltanto al vasto programma inglese orientato sul prevalente impiego di uranio naturale, ma anche a costruzioni sperimentali in corso negli Stati Uniti, in Cecoslovacchia e da parte dell'OECE con uranio arricchito e temperature assai elevate. Si apre così anche la prospettiva di estesa utilizzazione del fluido refrigerante in turbine a gas. Significativo è l'incremento delle temperature di esercizio. In Gran Bretagna dai 336°C di Calder Hall e di Chapel Cross si passa ai 390°C delle centrali in costruzione di Bradwell e di Hunterstone, mentre viene allestito a Windscale un impianto sperimentale con temperatura di uscita dei gas refrigeranti prevista in 575°C . Nel reattore sperimentale Dragon,

realizzato dall'OECE d'intesa con la Gran Bretagna, la temperatura di uscita del gas (elio) è di circa 750°C .

Analogo miglioramento riceve il reattore ad acqua nelle sue varie forme. La centrale Yankee ad acqua in pressione (Rowe, Massachusetts) e quella, pure ad acqua in pressione, di Indian Point (nello Stato di New York), quest'ultima con surriscaldamento del vapore mediante combustibile tradizionale, segnano sensibili progressi in confronto a quella di Shippingport, in esercizio da circa tre anni. La centrale di Dresden (Illinois), che ha iniziato il funzionamento qualche mese fa, attua industrialmente il concetto del reattore ad acqua bollente, e ad essa già fanno seguito altre fra cui, notevole per la potenza installata di 230 MW, quella italiana di Punta Fiume. Sensibili miglioramenti sono previsti con provvedimenti atti ad accrescere l'uniformità del flusso neutronico, con il perfezionamento degli elementi combustibili, con il surriscaldamento del vapore nell'interno del reattore.

L'orientamento sovietico verso la circolazione dell'acqua entro il nocciolo del reattore mediante tubi in pressione è considerato suscettibile di sviluppi assai interessanti. Per centrali in costruzione di questo tipo con sezioni di 100 MW elettriche ciascuna, sono annunciate condizioni di ammissione del vapore alla turbina di circa 90 atmosfere e 520°C , le più elevate sinora adottate in grosse centrali nucleari.

Per quanto concerne gli altri tipi di reattori a neutroni moderati, molte speranze continua a destare quello che, concepito nell'insieme come un reattore ad acqua in pressione, utilizza come moderatore un liquido organico (difenile e terfenile) avente bassa tensione di vapore e bassa reattività chimica con i materiali di corrente impiego nella costruzione del reattore. Ne risulta la possibilità di funzionamento con pressioni limitate ed impiego di materiali di basso costo come alluminio, acciai, ecc., con pericoli di corrosione molto minori di quanto non si verifichi con l'acqua. Questo tipo è, fra l'altro, oggetto

di un'iniziativa sperimentale italiana recentemente maturata ed entrata in fase di attuazione.

Anche i reattori moderati con acqua pesante, nonostante l'elevato costo di questo materiale, presentano interessanti prospettive, considerate le ottime proprietà di moderatore dell'acqua pesante stessa, che la rendono adatta all'impiego dell'uranio naturale. Questa soluzione ha avuto particolare sviluppo nei Paesi in grado di produrre notevoli quantitativi di acqua pesante come la Svezia, la Norvegia, il Canada; soprattutto i tecnici di questo ultimo Paese ne sono convinti sostenitori per impianti industriali a fronte dei tipi oggi maggiormente impiegati.

Altra possibilità è connessa con l'impiego di cicli di combustibile ad uranio e torio con fertilizzazione del torio stesso: anche questa via è oggetto di una recentissima iniziativa italiana in collaborazione con costruttori americani.

L'avvenire dell'utilizzazione dell'energia nucleare è tuttavia forse legato alla pratica attuazione industriale di reattori veloci autofertilizzanti. La possibilità di avere rapporti di conversione maggiori di 1 — cioè di produrre combustibile attivo in misura maggiore di quanto se ne consumi — e quindi di trasformare via via in sostanza fissile tutto l'uranio ed il torio esistenti in natura, costituisce un'attrattiva formidabile. Vi sono ancora in questo settore problemi tecnologici di esercizio e di sicurezza assai complessi da superare, ma sembra probabile che questi reattori possano costituire la base di un prossimo secondo stadio di sviluppo della tecnica dell'energia nucleare, come del resto era già stato previsto da Fermi nel 1945.

Recentissima è l'entrata in funzione del reattore sperimentale veloce autofertilizzante di Dounreay in Scozia. Negli Stati Uniti reattori veloci sperimentali sono in esercizio ed in costruzione e frattanto, con coraggiosa iniziativa, si è portata quasi ad ultimazione la centrale « Enrico Fermi » presso Detroit, di 90 MW elettriche, con impiego di uranio arricchito al 25,6 % e con refrigerazione mediante sodio liquido. Questa cen-

trale ha un rapporto di conversione pari ad 1,2.

Anche l'Unione Sovietica lavora attivamente in questo campo, soprattutto nel centro sperimentale del Volga: tre reattori veloci vi sono da tempo in esercizio ed è preannunciata la costruzione di un primo impianto di grande potenza.

Questi pochi cenni sull'evoluzione tecnica degli impianti nucleari, in pieno svolgimento, non hanno certo la pretesa di fornire un quadro esauriente della situazione, ma solo di dare un'idea della straordinaria vastità del nuovo settore, della quantità di vie che è possibile percorrere, delle branche scientifiche e tecniche, interamente nuove, che è necessario ulteriormente approfondire, e soprattutto delle prospettive di possibile, anzi indubbio, ulteriore miglioramento nell'attuazione di impianti di carattere industriale per la produzione dell'energia.

Le realizzazioni in scala industriale sono ancora poche. Soltanto l'esperienza che verrà via via acquisita consentirà di giungere ad un grado di efficienza, semplicità, sicurezza ed economicità paragonabile a quello degli impianti tradizionali, il cui stadio attuale risulta dall'accumulo di oltre mezzo secolo di pratica costruttiva e di esercizio.

Gli impianti dei tipi oggi maggiormente sperimentati presentano sin d'ora, anche sotto l'aspetto dell'esercizio, caratteristiche tranquillanti. Essi appaiono in grado di assicurare continuità di funzionamento adeguata alle esigenze delle reti e, nella maggior parte dei casi, sono suscettibili di seguire variazioni di carico anche di notevole ampiezza e rapidità, salvo quanto risulta dalle considerazioni economiche svolte più avanti per le quali appare necessaria un'utilizzazione quanto più estesa possibile della massima potenza erogabile. Anche la sicurezza nei confronti sia del personale di esercizio, sia delle popolazioni circostanti, risulta confortante per le caratteristiche intrinseche dei reattori e per le disposizioni complementari adottate. Tutto ciò sempre considerando che si tratta di materia del tutto nuova e che l'esperienza di eser-

cizio industriale è limitatissima. Cosicché molti problemi non hanno ancora trovato piena soluzione. Valga, come esempio, il grave problema del collocamento a rifiuto delle sostanze radioattive che residuano dopo le operazioni di rigenerazione del combustibile nucleare. Esse comprendono radioisotopi la cui vita può giungere anche a migliaia di anni e dei quali è difficile disfarsi con l'assoluta sicurezza che non abbiano un giorno a ricomparire e ad interferire nella vita dell'uomo.

Considerazioni economiche.

Se l'aspetto tecnico della produzione nucleare dell'energia si presenta oggi con attraenti soluzioni e brillanti prospettive, l'aspetto economico del problema è, almeno per ora, assai meno allettante.

Sul costo di produzione dell'energia nucleoelettrica è stata pubblicata una quantità di analisi dettagliate, molte delle quali eseguite con minuzia sproporzionata alle incertezze che ancora sussistevano, e che in parte tuttora sussistono, nei dati di partenza.

Innanzitutto, il costo di costruzione delle prime centrali, da considerarsi, del resto, come prototipi sperimentali, risultò di necessità non nettamente circoscritto in relazione alle spese attribuibili all'attività di ricerca, e comunque elevatissimo; solo ora tali costi vanno assumendo dimensioni meglio definite con tendenza a graduale avvicinamento a quelli relativi agli impianti tradizionali.

Ad esempio, per la centrale di Calder Hall viene citato un costo consuntivo che, tradotto per facilitare i confronti in valuta americana, risulta di circa 46 milioni di dollari, pari a circa 600 dollari, ossia 375.000 lire per kW installato ⁽¹⁾. Per Shippingport viene citato un costo di ben 72,5 milioni di dollari, pari a 1200 dollari, ossia 750.000 lire per kW installato. Ma per la centrale di Bradwell, oggi in avanzata costru-

zione in Gran Bretagna, è preventivata una spesa dell'ordine di 400 dollari, pari a 250.000 lire per kW installato, e per quella americana di Dresden, da qualche mese ultimata, una spesa di 300 dollari, pari a poco meno di 200.000 lire per kW installato.

Per gli impianti di cui si è recentemente iniziata la costruzione vengono indicati, in media ed in cifre tonde, costi di impianto dell'ordine di 250 ÷ 300.000 lire per kW installato per le centrali raffreddate a gas, e dell'ordine di 200 ÷ 250.000 lire per kW installato per quelle ad acqua.

Nella determinazione della quota gravante sul costo del kWh prodotto intervengono poi altri fattori di entità variabile entro ampi limiti: tasso di interesse sul capitale impiegato, lunghezza della vita dell'impianto, tenuto anche conto dell'eventualità di rapido superamento tecnico, utilizzazione annua della massima potenza.

Quanto alla quota di costo relativa al combustibile nucleare, anch'essa è influenzata in vario modo da circostanze singolari: interessi di carattere politico e militare connessi con l'estrazione dei minerali di uranio e la preparazione dell'uranio stesso; disponibilità, già scontata per ragioni militari, degli impianti per la separazione degli isotopi costitutivi dell'uranio naturale; possibilità di utilizzazione — e quindi valore — del plutonio che si genera durante il funzionamento del reattore, costo della rigenerazione dell'uranio dopo irraggiamento. Comunque, in condizioni medie e con riferimento alla situazione dei Paesi europei, si citano costi relativi al combustibile dell'ordine di 2 lire per kWh per le centrali ad uranio naturale e grafite, e di 2,50 lire per kWh per quelle ad uranio arricchito ⁽²⁾.

Altri elementi che conducono a formare il costo di produzione, spese di manutenzione, personale, assicurazione, comportano anche essi incertezze di valutazione a causa della scarsa esperienza sinora acquisita.

Il confronto fra i costi di pro-

⁽¹⁾ Una centrale termoelettrica moderna con unità di 100-150.000 kW comporta un costo unitario di costruzione dell'ordine di 80-90.000 lire per kW installato.

⁽²⁾ Ai prezzi odierni dei combustibili tradizionali l'analoga quota di spesa in impianti termoelettrici moderni risulta dell'ordine di 3 ÷ 3,50 lire per kWh.

duzione degli impianti nucleari e quelli degli impianti tradizionali è ulteriormente influenzato dalle modalità di inserimento della nuova produzione nel preesistente quadro di esercizio e dall'utilizzazione media annua che, di conseguenza, risulta possibile per l'impianto nucleare.

In condizioni medie e con particolare riferimento al nostro Paese, i vari Autori giungono a costi del kWh di origine nucleare che, per utilizzazioni elevate, cioè dell'ordine di 7.000 ore annue, sono almeno del 30 ÷ 50 % superiori a quelli relativi alle moderne centrali termoelettriche convenzionali, mentre per utilizzazioni meno elevate, ad esempio 5.000 ore annue, il divario aumenta ad un ordine del 50 ÷ 80 % circa.

A titolo indicativo si riporta da LOUIS [1] un fascio di curve (figura 1) relative alla differenza fra il costo del kWh nucleoelettrico e quello del kWh termoelettrico in funzione delle ore annue di utilizzazione della massima potenza degli impianti. Ciascuna curva si riferisce ad un particolare valore del tasso annuo di oneri finanziari (interesse + ammortamento) adottato nel computo. Il diagramma, in cui la scala delle ordinate è stata per comodità di chi legge tradotta in lire, è ricavato sulla base di studi condotti in Belgio per una centrale nucleare di 170 MW confrontata con impianti tradizionali a carbone di pari potenza.

Il confronto risulta dunque, nell'attuale situazione, sfavorevole agli impianti nucleari. Se tuttavia si considera che la tecnica di questi impianti sta appena uscendo da uno stadio del tutto sperimentale e tuttora batte, con ricerche ed esperienze industriali, numerose vie di possibile sostanziale affinamento, l'entità del divario di costi appare sufficientemente limitata per poterne prevedere, nel prossimo avvenire, la graduale eliminazione.

Autorevoli affermazioni all'accennata recente Sessione della Conferenza Mondiale dell'Energia

confermano questa atmosfera di fiducia. CISLER (Stati Uniti) [2], riferendosi alle condizioni esistenti nel suo Paese, cita previsioni secondo le quali verso il 1968 potrebbero raggiungersi per gli impianti nucleari costi di concorrenza con quelli tradizionali nelle zone in cui i combustibili classici sono più costosi, mentre verso il 1975 l'equilibrio potrebbe verificarsi anche per le altre zone, escluse quelle ove i combustibili classici hanno costi minimi. LOUIS (Belgio) [1], sulla base della situazione media europea, stima a pochi anni il tempo occorrente per il conseguimento di costi di concorrenza nelle regioni in cui si abbiano costi elevati dei combustibili tradizionali e limitati tassi di interesse dei capitali; nelle regioni in cui si verifica la situazione inversa il periodo di tempo potrebbe estendersi ad un decennio. HINTON, BROWN e ROTHERHAM (Gran Bretagna) [3], in relazione ad un programma di futuri sviluppi che essi ritengono probabile, valutano che il costo dell'energia producibile negli impianti nucleari inglesi abbia a di-

mezzarsi nel periodo intercorrente fra il 1961 ed il 1973.

È chiaro come previsioni di questo genere possano bene giustificare l'attiva prosecuzione in ogni Paese dell'attività sperimentale ed anche di costruzioni su scala industriale, pur con ingente sacrificio economico, nell'intento di accelerare il conseguimento di quella situazione di equivalenza nei costi che potrà aprire la via ad una estesa utilizzazione dell'energia nucleare.

Inserimento negli attuali sistemi di produzione.

Il prevedibile progressivo aumento della produzione nucleare pone evidenti problemi di coordinamento con le altre fonti di produzione dell'energia elettrica, problemi soprattutto connessi con l'utilizzazione annua dei vari tipi di impianti in relazione alla forma delle curve di prelievo da parte dell'utenza.

Le variazioni della potenza richiesta dagli utenti sono infatti rilevanti sia nell'ambito del ciclo giornaliero, sia in quello settimanale e stagionale. L'andamento

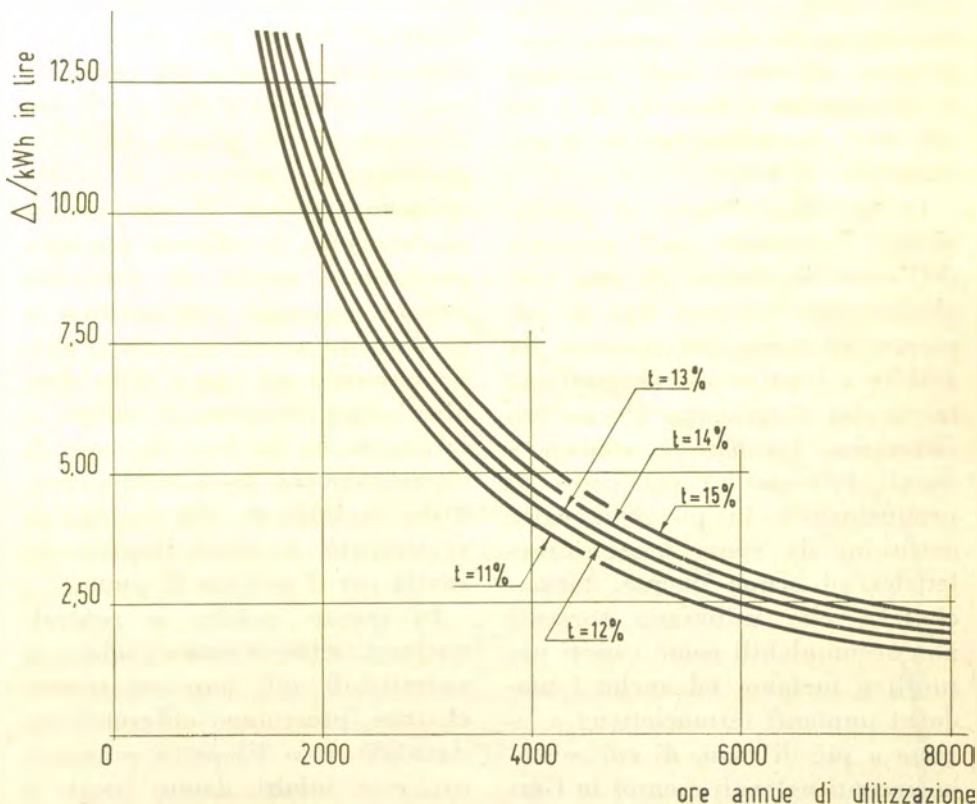


Fig. 1 - Differenza tra il costo del kWh nucleoelettrico ed il costo del kWh termoelettrico in funzione delle ore annue di utilizzazione della massima potenza dell'impianto e del tasso degli oneri finanziari (da Louis).

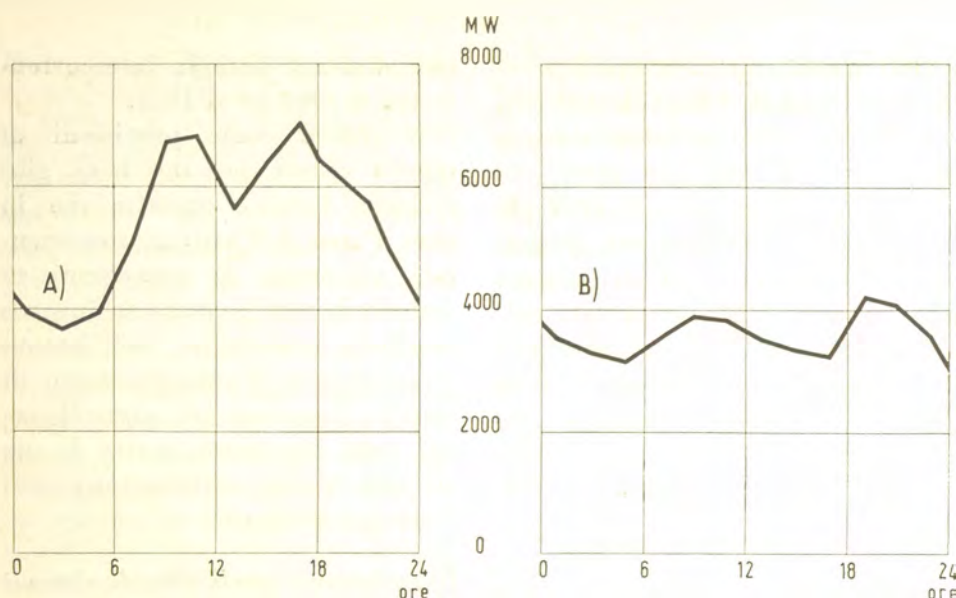


Fig. 2 - Curve di carico per la totalità della rete italiana: A) giorno feriale tipico (17 dicembre 1958); B) giorno festivo tipico (23 marzo 1958).

delle curve di carico, sebbene influenzato da molti fattori come le condizioni climatiche, il livello di industrializzazione, il benessere civile, gli orari abituali di lavoro, si presenta quasi ovunque in modo simile a quello riportato nella fig. 2 e relativo alla quasi totalità del carico italiano in un giorno feriale tipico (terzo mercoledì di dicembre) ed in un giorno festivo tipico (domenica successiva al terzo mercoledì di marzo) nell'anno 1958. In tale anno l'utilizzazione media della potenza complessiva efficiente degli impianti di produzione è risultata di 5.700 ore, pari cioè ad un fattore di utilizzazione di 0,65.

In un dato sistema di produzione, l'optimum nell'economia dell'esercizio deriva da uno scaglionamento dei vari tipi di impianto, in modo che ciascuno sia adibito a coprire una determinata fascia del diagramma giornaliero di carico. La base è affidata a quegli impianti il cui costo di produzione è in massima parte costituito da spese fisse: idroelettrici ad acqua fluente, termoelettrici che utilizzano sorgenti non accumulabili come vapori naturali o metano, ed anche i moderni impianti termoelettrici a lignite a piè di cava, di cui esistono recenti notevoli esempi in Germania ed in Italia, per i quali il costo del combustibile è costituito essenzialmente dagli oneri fissi

relativi alle attrezzature di coltivazione del giacimento. Nella zona centrale del diagramma, troviamo gli impianti termoelettrici a combustibile di acquisto, avendosi verso la base quelli di più moderne caratteristiche con costi d'impianto più elevati e minor consumo di combustibile, e verso l'alto quelli che presentano minori oneri fissi e maggior consumo. La zona di punta infine è coperta dalla produzione idroelettrica di serbatoio che, entro determinati limiti, può essere concentrata nelle ore e nei giorni di maggior richiesta e che, per le sue caratteristiche di grande elasticità, prontezza e sicurezza, si presta ottimamente per il servizio di modulazione. Si affianca a questa produzione quella di eventuali impianti termici con turbina a gas: questa macchina infatti, particolarmente nei tipi a ciclo semplice senza ricupero di calore, è caratterizzata dal limitato costo di costruzione con basso rendimento, il che, unitamente alla rapidità di avviamento, la rende soprattutto adatta per il servizio di punta.

In questo quadro le centrali nucleari, sebbene concettualmente assimilabili agli impianti termoelettrici, presentano differenze sostanziali sotto l'aspetto economico: esse infatti danno luogo a spese di impianto assai più elevate di quelle per le centrali termoelettriche tradizionali (da due

a tre volte), mentre il costo del combustibile riferito all'energia prodotta risulta notevolmente inferiore (la metà o poco più). L'economicità della produzione dipende quindi dalla possibilità di realizzare un'estesa utilizzazione annua dell'impianto. Questa esigenza di ordine economico vincola l'impianto nucleare ad un servizio di base in misura anche maggiore di quanto non comportino le sue caratteristiche tecniche, le quali consentono sin d'ora e consentiranno sempre più, con l'affinarsi dei mezzi di regolazione, di seguire variazioni di carico con relativa rapidità, anche entro ampi limiti.

In un sistema essenzialmente dotato di impianti termoelettrici, la nuova produzione nucleare deve necessariamente occupare la parte bassa del diagramma di carico per conseguire la massima possibile economicità di esercizio dell'impianto nucleare. Ma in un sistema come, ad esempio, quello attuale italiano [4] con produzione mista idrica, e termica e con preponderanza, almeno per ora, di quella idrica, la zona più bassa del diagramma deve rimanere occupata dall'energia idrica fluente cui si aggiunge quella termoelettrica da vapori naturali e lignite. Di conseguenza la produzione nucleare viene a trovarsi spostata verso l'alto del diagramma, dal che deriva una minor estensione dell'utilizzazione annua dell'impianto e quindi, in definitiva, una produzione nucleare più onerosa. Questa situazione limita le possibilità di rapido sviluppo dell'impianto nucleare, come del resto già limita la possibilità di ampia utilizzazione delle moderne centrali termoelettriche ad elevato rendimento, le quali in un funzionamento di piena base potrebbero dar luogo a produzione più economica.

Tradotto l'andamento dei diagrammi di carico in una curva di durate annuali delle potenze richieste sulla rete, la ripartizione in fasce dell'energia prodotta dai vari tipi di impianto assume la

forma schizzata in fig. 3, ove è pure indicato il gioco dell'energia accumulata per pompaggio secondo quanto più avanti esposto.

Va ancora osservato che l'inserimento di una fascia di produzione nucleare alla base del diagramma di carico, o immediatamente al di sopra della produzione idrica fluente o termica a costi praticamente fissi, sospinge verso la parte alta le restanti produzioni termica ed idrica di serbatoio. Il costo di queste produzioni risulta accresciuto per effetto della più limitata utilizzazione degli impianti. Si tratta in sostanza di un onere supplementare dovuto all'inserirsi della produzione nucleare con le sue particolari caratteristiche economiche e che quindi andrebbe a questa addossato. Può allora presentarsi l'opportunità di rivedere le caratteristiche tecniche degli impianti che fanno il servizio di punta, sia per accrescere le loro caratteristiche di elasticità e prontezza nel seguire le variazioni di carico, sia per rendere quanto più possibile economica la loro produzione in rapporto alla prevedibile utilizzazione annua.

Sotto questo aspetto, potrà apparire conveniente per alcuni impianti termoelettrici un orientamento verso tipi di limitato costo di costruzione e maggior elasticità di esercizio, anche se ciò possa andare a scapito del rendimento: ad esempio, centrali a vapore con caratteristiche non molto spinte e turbine a gas a ciclo semplice.

Per gli impianti idrici a serbatoio si renderà necessario esaltarne le possibilità di regolazione, soprattutto giornaliera e settimanale, accrescendo il volume di invaso ed il rapporto tra potenza e producibilità. È soprattutto su questi impianti che nelle regioni topograficamente, geologicamente ed idrologicamente dotate, si farà affidamento per quella modulazione di cresta, le cui esigenze saranno sempre più rigorose.

Per contro, quando il complesso di impianti termoelettrici ed anche nucleari divenga sempre più rilevante in rapporto alla quantità di produzione idrica, la necessità di realizzare invasi idrici con funzione stagionale potrà anche risultare meno impellente. Il limite di convenienza di questi potrà abbassarsi, considerata la possibilità di integrazione stagionale mediante produzione termica, anche con un'opportuna distribuzione nell'anno delle fermate per revisione e manutenzione di questi ultimi impianti.

Un'ulteriore possibilità di potenziamento del servizio di punta è connessa con l'attuazione, notevolmente sviluppata da qualche anno, soprattutto all'estero, di impianti ad accumulo per pompaggio. A questi impianti, attrezzati con gruppi pompa-macchina elettrica turbina, ovvero anche in qualche caso con alternatori accoppiati a macchine idrauliche reversibili, è affidato il compito

di utilizzare energia producibile a costi marginali nelle ore di basso carico, per pomparla in serbatoio di adeguata capacità, utilizzando poi l'acqua così accumulata per produrre energia pregiata nelle ore di massima richiesta.

La convenienza di realizzare siffatte installazioni trova naturalmente dei limiti connessi con il costo di costruzione dell'impianto stesso, i valori dell'energia nelle diverse situazioni di esercizio, il rendimento globale del complesso di operazioni, compresa la trasmissione dell'energia verso e dall'impianto di pompaggio, rendimento che può valutarsi mediamente intorno al 60 %. Computi eseguiti con riferimento alla situazione italiana, condurrebbero a concludere che la convenienza di questi impianti è discutibile quando siano utilizzati in collegamento con produzione termoelettrica od idroelettrica fluente, mentre il beneficio è assai più concreto nel caso di abbinamento alla

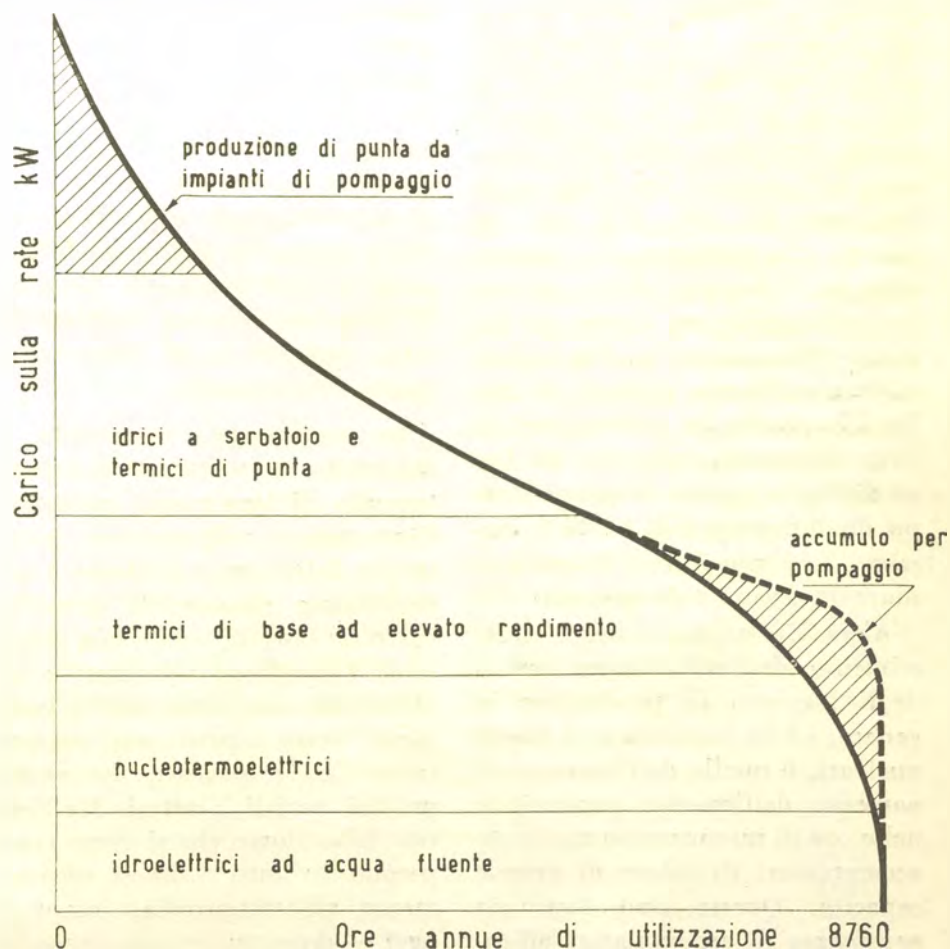


Fig. 3 - Curva indicativa delle durate annuali dei carichi richiesti su di una rete ipotetica e ripartizione dell'energia prodotta dai vari tipi di impianti.

produzione nucleotermoelettrica fatta con centrali dei tipi e dei costi attuali o prevedibili per un immediato futuro. Sotto questo aspetto l'impianto di pompaggio e di accumulo può dunque anticipare l'epoca di raggiungimento da parte della produzione nucleare di costi di concorrenza con le altre sorgenti di energia.

Alcuni impianti con pompaggio sono da tempo in esercizio anche in Italia (ad es. il sistema della Terni), ma le più interessanti realizzazioni con rilevante potenza installata sono di data recente.

Nelle Alpi Austriache l'impianto di Limberg di 100 MW, e quello da poco ultimato del Lunersee con 250 MW; in Baviera Occidentale l'impianto di Reissach-Rabenleite con 60 MW; in Gran Bretagna il grande impianto di puro pompaggio di Ffestiniog in via di completamento nel Galles del Nord con 300 MW ripartiti su quattro unità; negli Stati Uniti la centrale con serbatoio stagionale di Hiwassee, nella vallata del Tennessee, dotata di un gruppo con macchina idraulica reversibile di 70 MW, la più grande sinora costruita; sulla riva canadese delle cascate del Niagara un impianto di 240 MW su sei gruppi che consente di compensare la riduzione della portata derivabile nelle ore diurne per lasciare sulle cascate, ai fini turistici, una sufficiente portata; in Italia l'impianto in costruzione di Villa Gargnano, sulle rive del Lago di Garda, dotato in primo tempo di due gruppi di 60 MW ciascuno, con possibilità di raddoppiare in futuro tale potenza.

Altra via suggerita per l'accrescimento dell'utilizzazione annua degli impianti di produzione in genere, ed in particolare di quelli nucleari, è quella dell'immagazzinamento dell'energia producibile nelle ore di minor carico mediante accumulatori di calore di grande capacità. Questo può farsi sia per mezzo di accumulatori affiancati alla centrale di produzione ed opportunamente inseriti

nel ciclo termico, come proposto da MARGUERRE (Germania) alla citata riunione di Madrid [5], sia con applicazioni termiche presso le utenze mediante opportuni apparecchi ad accumulazione in grado di prelevare energia nelle ore di minor carico e consentire l'utilizzazione del calore quando richiesto. Queste ultime applicazioni vanno dai ben noti riscaldatori d'acqua ad accumulazione agli apparecchi per il riscaldamento di ambienti con accumulo del calore in adatti materiali solidi (magnesite, steatite, argilla refrattaria), forni per cottura, impianti di essiccazione, ecc. [6]. In particolare, impianti per il riscaldamento di ambienti ad accumulazione hanno avuto interessanti applicazioni in Austria, in Belgio (nuovo palazzo delle Sociétés Réunies d'Energie du Bassin de l'Escaut ad Anversa) ed altrove. L'accumulazione di calore presso l'utenza fa parte, del resto, di tutta una serie di possibili provvedimenti per modificare il diagramma giornaliero, settimanale o stagionale di richiesta dell'energia comprendente tariffe opportunamente studiate, distacchi preordinati di determinati carichi, scaglionamento degli orari di lavoro. L'opportunità e l'efficacia di ciascuno di essi è tuttavia funzione di numerosi fattori ambientali, assai variabili e di importanza spesso determinante.

In conclusione, nonostante il diminuito ottimismo ed il rallentamento di importanti iniziative, l'economica utilizzazione industriale dell'energia nucleare è generalmente riconosciuta attuabile entro un lasso di tempo non eccessivo. I problemi affrontati e da affrontare sono assai vasti e complessi, sotto aspetti non soltanto tecnici ed economici, ma anche politici, sociali, sanitari. Ma l'entità dello sforzo che si viene compiendo in tutti i Paesi tecnicamente all'avanguardia, compresa oggi — dopo un periodo di modesta ma qualificatissima attività — anche l'Italia, è garanzia di ra-

pida evoluzione verso l'effettiva pratica attuabilità degli impianti nucleari di produzione. Un adeguato coordinamento di programmi, progetti ed iniziative nucleari e tradizionali, con adattamento delle caratteristiche degli impianti tradizionali alle nuove esigenze, non potrà che facilitare tale evoluzione.

Guido Bonicelli

BIBLIOGRAFIA

[1] F. LOUIS, *Les problèmes que pose la production d'énergie nucléaire aux producteurs d'électricité*, Conférence Mondiale de l'Energie, Session Partielle, Madrid 1960.

[2] W. L. CISLER, *Development of commercially practical nuclear power reactors*, World Power Conference, Sectional Meeting, Madrid 1960.

[3] C. HINTON, F. H. S. BROWN, L. ROTHERHAM, *The economics of nuclear power in Great Britain*, World Power Conference, Sectional Meeting, Madrid 1960.

[4] G. PADOAN, M. MAINARDIS, A. ROTA, E. VERDUCCI, G. BONICELLI ed altri, *Perspectives d'une insertion de la production nucléothermoélectrique dans la production d'énergie électrique traditionnelle en Italie*, Conférence Mondiale de l'Energie, Session Partielle, Madrid 1960.

[5] F. MARGUERRE, *The application of heat storage in nuclear and conventional power stations*, World Power Conference, Sectional Meeting, Madrid 1960.

[6] O. HERBATSCHKE, *Improvement of load characteristics of nuclear power plants by electro-heat*, World Power Conference, Sectional Meeting, Madrid 1960.

Per i problemi tecnici ed economici di carattere generale vedasi, ad es.:

— O.E.C.E., *L'industrie devant l'énergie nucléaire*, Conférence de Stresa, 1959, 3 volumi.

— *Atti della LX Riunione Annuale dell'Associazione Elettrotecnica Italiana*, Venezia, 1959.

— *Atti della Conferenza Mondiale dell'Energia, sezioni IVA, IVB, e V*, Madrid 1960.

Note sulla produzione industriale dell'D₂O

RENATO GRIGNOLIO svolge alcune considerazioni sulla estrazione dell'D₂O per distillazione frazionata dell'acqua; con qualche accenno, agli effetti storici, a poco note realizzazioni effettuate in passato.

Tra i problemi connessi alla tecnica nucleare quello della produzione dell'acqua pesante è stato ed è tuttora di vivo interesse, anche se l'elevato costo di tale materiale ne ha consigliato in molti casi la sostituzione nel pratico impiego con materiali economicamente più accessibili. A parte le intraviste possibilità di impiego come combustibile secondo reazioni di termofusione per ora incontrollabili, l'acqua pesante con le sue costanti nucleari costituisce il moderatore migliore in reattori termici ad uranio naturale, solvente nei reattori omogenei e possibile fluido intermedio.

La disponibilità in natura di acqua pesante può ritenersi illimitata. Si può valutarne la consistenza in $1,8 \times 10^{14}$ tonnellate; il Po a Piacenza ne trasporta in media 500 tonnellate ogni ora; ma è notevolmente basso il rapporto di abbondanza: circa una parte su 7.000.

L'acqua pesante, che nella molecola contiene in luogo dell'idrogeno l'isotopo naturale stabile con numero di massa 2 di questo (esattamente 2,0147), differisce in assai piccola misura dall'acqua comune nelle proprietà fisiche e nel comportamento chimico (una più notevole differenza si nota, secondo alcuni Autori, dal punto di vista biologico: non mantiene la vita). Pur riscontrandosi sensibili variazioni in acque di diverse provenienze si considera che il contenuto in acqua pesante nell'acqua comune sia 0,000149. Appaiono evidenti le difficoltà di separazione e rilevante l'onere. Occorre aggiungere che quasi tutti i metodi di separazione devono tenere conto del fatto che in realtà, nell'acqua, per ragioni di equilibrio, non si trova il composto D₂O ma bensì HDO le cui proprietà, non ben note in quanto non isolabile con sicurezza, vengono interpolate tra quelle dei due composti noti.

In particolare si valuta la tensione di vapore dell'HDO come media geometrica tra quelle dell'H₂O e del D₂O.

Si può osservare che accanto al D₂O esiste, con rapporto di abbondanza assai maggiore, anche l'acqua contenente l'isotopo con numero di massa 18 dell'ossigeno e quello con numero di massa 17. Ma, a parte il minore interesse tecnico, nessun metodo ne permette una separazione su scala industriale a causa delle minime differenze nelle costanti fisiche e chimiche. Altri isotopi dell'H e dell'O sono artificiali e con varie durate di vita media.

Sorvolando su aridi elenchi di costanti fisiche, interessa definire un elemento fondamentale atto a caratterizzare in genere ogni metodo di separazione: il coefficiente di separazione, normalmente indicato con α . Essendo x ed y le frazioni atomiche dell'isotopo pesante rispettivamente nella fase arricchita ed in quella impoverita (ad esempio nella fase liquida ed in quella vapore) si definisce il coefficiente di separazione α come quoziente dei relativi rapporti di abbondanza a loro volta definiti dalle:

$$\xi = \frac{x}{1-x}; \quad \xi' = \frac{y}{1-y} \quad (1)$$

da cui:

$$\alpha = \frac{x(1-y)}{y(1-x)} \quad (2)$$

In sostanza α indica numericamente il risultato teorico ottenibile da una singola operazione di separazione, quale il passaggio

attraverso ad un piatto teorico della colonna di frazionamento.

Nel caso della distillazione frazionata dell'acqua il valore di α , indipendente dalla concentrazione dell'isotopo pesante, risulta:

$$\alpha = \sqrt{\frac{\text{pressione vapore H}_2\text{O}}{\text{pressione vapore HDO}}} \quad (3)$$

Se si considera che a 100° C le pressioni di vapore di H₂O e di D₂O sono rispettivamente 760 e 721,6 mm Hg è facilmente prevedibile che α assuma valori prossimi all'unità (valori più elevati si avrebbero per esempio nella distillazione frazionata dell'idrogeno).

In tab. 1 sono riportati valori sperimentali di α .

La produzione industriale di D₂O è stata realizzata secondo vari metodi tra cui classico quello della elettrolisi dell'acqua; metodo che ne permise la prima produzione in laboratorio (Lewis e Mac Donald) nel 1933 dopo la scoperta del deuterio (Urey e Murphì) avvenuta per via spettroscopica nel 1932; scoperta resa possibile dalla sua diversa costante di Rydberg rispetto all'idrogeno ordinario che si traduce in spostamento delle righe spettrali. L'idrogeno che si svolge durante l'elettrolisi è meno ricco in D₂ che non l'acqua elettrolizzata. Con elettrolisi frazionata (e riciclo oltre un certo grado di concentrazione) è possibile arricchire il residuo sino ad un elevato grado di purezza. È naturalmente necessario procedere a successive distillazioni onde eliminare l'accumulo di sali ed impurezze nel residuo.

TABELLA 1

T°C	mm Hg	α HDO	α' D ₂ O	$\frac{\alpha-1}{\alpha} \times 100$	$\frac{1}{r}$
10	9,19	1,088	1,1003	8,13	12,28
20	17,50	1,076	1,0873	7,02	14,25
30	31,76	1,066	1,0748	6,18	16,17
40	55,29	1,058	1,0629	5,47	18,29
50	92,43	1,051	1,0540	4,86	20,60
60	149,34	1,046	1,0490	4,41	22,70

È evidente che, industrialmente, secondo tale metodo la produzione del D_2O non può che essere collegata alla produzione di idrogeno elettrolitico destinato alla industria chimica di sintesi (ammoniaca). Ma in Italia la produzione di H_2 , per ragioni economiche, viene fatta in massima parte per combustione incompleta su catalizzatore del metano. La produzione elettrolitica del D_2O è stata sin dall'inizio realizzata in Norvegia; il prezzo di vendita risultava dell'ordine di L. 120.000 al Kg.

Altro metodo di separazione che di fronte ad un elevato coefficiente α presenta difficoltà tecniche per le basse temperature a cui occorre lavorare consiste nella distillazione frazionata dell' H_2 . Comunque la produzione è legata a forti disponibilità di idrogeno.

Un metodo che sembra dia buoni risultati consiste nell'arricchimento per scambio tra H_2 e vapore acqueo secco; altro metodo tecnicamente molto brillante di doppio scambio a due temperature venne studiato e messo a punto in Italia.

Non è possibile soffermarsi su questi ed altri metodi che pure presentano un elevatissimo interesse tecnico e scientifico. Si osserva soltanto che, almeno da un punto di vista nazionale, appaio-

no di scarso interesse i metodi che considerano ingenti disponibilità di idrogeno. Da un punto di vista generale qualsiasi metodo deve rispondere a requisiti essenzialmente economici.

Il metodo di separazione per distillazione frazionata dell'acqua venne attuato tra l'altro in un gruppo di tre grandi impianti della E. J. Du Pont de Nemours Co. Inc. - U.S.A.

Lo schema di una colonna di frazionamento (I stadio) è indicato in fig. 1 in cui B è il bollitore, R condensatore del vapore, A l'alimentazione, E estrazione aliquota arricchita, S scarico vapore condensato.

Il basso valore di α rende inconcepibile una unica colonna che possa, dall'acqua naturale, estrarre alla base D_2O a concentrazione pressochè totale; l'operazione non può che essere effettuata in un certo numero di stadi. Sorvolando sugli sviluppi che riguardano la progettazione del diagramma generale di lavorazione, interessa esaminare il primo stadio che è quello che di gran lunga incide sugli oneri della lavorazione: l'assorbimento di energia da parte del I stadio può infatti raggiungere ed anche superare il 90 % di quella complessivamente occorrente a tutto l'impianto di estrazione e rettifica.

Essendo (fig. 1) $1 x_p$ le molecole estratte da E con frazione atomica x_p ; $N+1$ le molecole entrate come acqua naturale da A ed N le molecole uscenti come vapore condensato da S , rispettivamente con frazioni atomiche x ed y , per la continuità deve valere la:

$$(N+1)x = N y + 1 x_p \quad (4)$$

$1 x_p$ rappresenta il prodotto utile del I stadio. Il rendimento r di tale operazione è rappresentato dal rapporto tra quantità di isotopo pesante estratta alla base e quantità entrata, cioè:

$$r = \frac{1 x_p}{(N+1)x} = \frac{(N+1)x - N y}{(N+1)x} \quad (5)$$

Per N molto grande e per x ed y molto piccoli rispetto alla unità,

condizioni entrambe sempre soddisfatte nel I stadio, dalla (5) si ottiene:

$$r = \frac{x - y}{x} \quad (6)$$

e dalla (2)

$$\alpha = \frac{x}{y} \quad (2')$$

dalle quali immediatamente:

$$r = \frac{\alpha - 1}{\alpha} \quad (7)$$

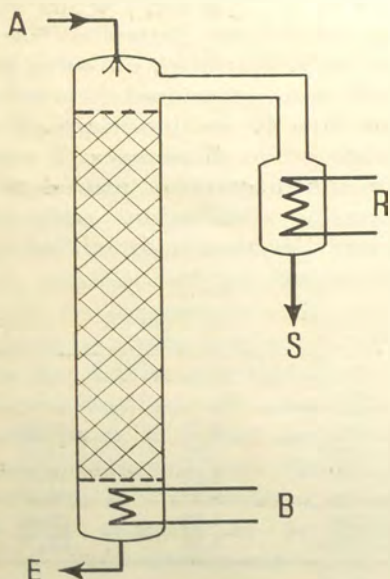
Il prodotto del I stadio passa agli stadi successivi sino a concentrazione completa senza ulteriori perdite teoriche. Ma resta il fatto che nella prima operazione di separazione è possibile recuperare soltanto una aliquota del D_2O contenuto nell'acqua di alimentazione. I valori di tale aliquota, invero modesti, sono indicati nelle ultime due colonne della tabella 1 per la miscela binaria H_2O -HDO ed espressi in mol D_2O recuperabili per 100 mol D_2O entrate da A . La differenza va perduta con il vapore uscente da S . In pratica il rendimento è notevolmente inferiore; gli impianti già accennati della Du Pont lavorarono con rendimento 1,94 % estraendo una mol D_2O su 360.000 mol acqua naturale di alimentazione.

Da queste sommarie considerazioni appare l'ingente bilancio energetico della produzione di acqua pesante per distillazione frazionata dell'acqua; ma si osserva che in generale con ogni altro metodo di produzione il fabbisogno di energia appare dello stesso ordine di grandezza.

Il dimensionamento degli impianti è relativamente notevole. Già acquisito che a pressioni ridotte migliora il coefficiente α ed il rendimento, il che comporta sezioni di colonna adeguate ai grandi volumi di vapore ed alle velocità necessariamente limitate di questo, è opportuno rendersi conto dell'altezza necessaria.

Il numero minimo teorico n di piatti ideali necessario ad ottenere una determinata concentra-

Fig. 1



zione si ricava dalla espressione:

$$n = \frac{\ln \frac{x_p (1 - x_A)}{x_A (1 - x_p)}}{\ln \alpha} \quad (8) \quad (1)$$

essendo x_p ed x_A frazioni atomiche dell'isotopo pesante rispettivamente nel prodotto e nella alimentazione. Per $x_A = 0,000149$ (I stadio) si ottengono a titolo di esempio le coppie di valori al variare di x_p indicate in tab. 2.

TABELLA 2 - $x_A = 0,000149$

$\alpha = 1,05$	$x_p = 0,998$ (99,8 %)	$n = 308$
$\alpha = 1,08$	$x_p = 0,998$ (99,8 %)	$n = 186,8$
$\alpha = 1,08$	$x_p = 0,010$ (1 %)	$n = 54,7$
$\alpha = 1,08$	$x_p = 0,005$ (0,5 %)	$n = 44$
$\alpha = 1,08$	$x_p = 0,003$ (0,3 %)	$n = 40$
$\alpha = 1,05$	$x_p = 0,001$ (0,1 %)	$n = 22,6$
$\alpha = 1,08$	$x_p = 0,001$ (0,1 %)	$n = 37$

Le dimensioni pratiche della colonna di frazionamento terranno conto del relativamente basso rendimento del singolo piatto, facilmente inferiore al 60 % di quello del piatto teorico.

Molto vi sarebbe da dire sui tipi di colonna; il classico tipo a piatti parrebbe meno conveniente che non il tipo a riempimento nel quale sono ammissibili maggiori velocità di vapore e perdite di carico minori. Tra i molti tipi di materiale di riempimento, tutti aventi in comune il costo elevato, apparve interessante il tipo Spraypake (U.S.A.) costituito da lembi di superficie metalliche espanse. Parrebbero con questo materiale ammissibili velocità del vapore di oltre 10 m/sec calcolate come di norma sulla sezione della colonna considerata vuota.

Sempre nei riguardi del I stadio si constata che non solo ivi insiste il maggiore onere della produzione ma insistono anche i maggiori costi di impianto. Nei già citati impianti della Du Pont il I stadio era costituito da 5 torri in parallelo con $\varnothing$ m 4,5 circa (più 5 torri minori in serie alle prime) con 80 piatti ciascuna, velocità del vapore m 2/sec e potenzialità per ciascuna torre 14 tonn

ora; l'acqua vi veniva arricchita allo 0,1 % impiegando l'87 % dell'energia termica complessivamente assorbita da tutto l'impianto. Costo complessivo degli impianti dollari 14.500.000. La produzione si aggirò sui 1.200 Kg mensili di D_2O .

Dai sommari cenni esposti derivano alcune semplici considerazioni:

convenienza tecnica di effettuare la distillazione a temperatura e pressione per quanto possibile basse onde aumentare α ;

convenienza economica di raggiungere nel I stadio una concentrazione per quanto possibile elevata onde ridurre il bilancio nei successivi;

convenienza di rendere minime le perdite di pressione lungo la colonna;

è necessario in ogni caso trattare ingenti quantità di acqua naturale e disporre di forte quantità di energia termica.

Anche limitando l'attenzione ai soli costi industriali di produzione non appare facile raggiungere risultati effettivamente economici; qualunque sia il metodo di produzione si impone necessariamente la condizione che il forte quantitativo di energia termica necessaria sia a basso costo, non solo, ma anche che per tale energia non esistano convenienti impieghi di altro genere tali da consigliarne un diverso più remunerativo uso anche nel caso limite che la stessa avesse costo nullo.

Conforta ad un ulteriore esame la considerazione che il metodo di distillazione frazionata dell'acqua richiede bensì, come gli altri metodi, un ingente flusso di energia termica ma, a differenza da altri metodi, fornita ad un alto livello entropico. Cioè energia poco pregiata, non utile per esempio agli effetti della produzione di energia meccanica. Diviene così realizzabile una delle condizioni necessarie perchè si possa parlare di convenienza economica.

Molte fonti naturali di calore,

tra cui quella solare e sorgenti calde a temperatura non superiore, o poco superiore, ai 100° C, rispondono a tale esigenza; sempre che si disponga contemporaneamente ed economicamente della sorgente fredda occorrente alla condensazione. Nel caso dell'energia solare, inoltre, la facilità di accumulare calore a temperature inferiori ai 100° C permette di sopperire alla discontinuità notturna.

Anche il condensatore di una turbina a vapore può costituire valida sorgente di energia termica con minima o nulla perdita di rendimento del ciclo termodinamico.

Ma a parte tali possibilità naturali e trascurando, a causa della bassa pressione a cui si lavora, il sistema della termocompressione del vapore tra S e B (fig. 1) appare suggestiva altra soluzione ben nota nei suoi fondamenti teorici.

Alimentando un motore termico con Q calorie fornite da opportuno combustibile si otterrà sull'asse motore lavoro L il cui equivalente termico (L/E) sarà $\eta_1 Q$ Cal essendo η_1 il rendimento della trasformazione (prodotto del rendimento termodinamico teorico per quello meccanico complessivo).

Utilizzando il lavoro L in un ciclo invertito di Carnot si otterrà il passaggio di Q_2 Cal dalla temperatura T_2 alla temperatura $T_1 > T_2$ con rendimento teorico

$$\frac{Q_2}{\eta_1 Q} = \frac{T_2}{T_1 - T_2} = \eta \quad (9)$$

e con rendimento pratico $\eta\eta_2$ essendo η_2 il rendimento meccanico della trasformazione; in definitiva:

$$Q_2 = \eta \eta_1 \eta_2 Q \quad (10)$$

Così nello schema fig. 2 è possibile togliere da R , a temperatura T_2 , Q_2 Cal che verranno trasferite in B , a temperatura T_1 , spendendo sull'asse del compressore un lavoro L equivalente ad $\eta_1 Q$ Cal a sua volta ottenute alimentando con Q Cal il motore M .

Posto ad esempio $T_2 = 300^\circ K$ e $T_1 - T_2 = 8^\circ$ risulta $\eta = 37,5$; con

(1) Ind. Eng. Chem. - 24,482 (1932).

$\eta_1=0,4$ ed $\eta_2=0,85$ si ricava $Q_2=12,75 Q$.

Se d'altra parte lo stesso combustibile venisse bruciato in un generatore di vapore si ricaverebbero in B Cal $Q'=0,9 Q$; quindi $Q_2=14,18 Q'$.

Poichè i motori Diesel di grande diametro possono funzionare con nafta per caldaie i suddetti rapporti di rendimento si traducono direttamente in rapporti di costi di produzione a parte le spese di ammortamento e manu-

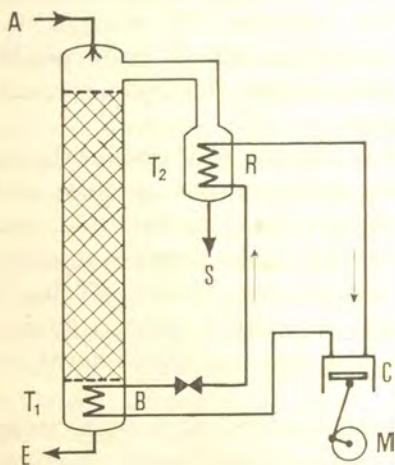


Fig. 2

tenzione non certo trascurabili ma ben lontane dai rapporti sopra ricavati.

I rendimenti migliorano, a parità di T_1-T_2 , aumentando la temperatura in colonna di frazionamento, ma in cambio si riduce il coefficiente α . Essenziale la riduzione di T_1-T_2 soprattutto ottenibile con la riduzione delle perdite di carico nella colonna. Semplici procedimenti analitici permettono di determinare i parametri più opportuni in linea teorica che devono naturalmente essere corretti ed adeguati alle esigenze pratiche.

Simile applicazione di pompa di calore venne eseguita in ben diverso ma analogo caso e diede risultati soddisfacenti pur essendosi riscontrate alcune difficoltà pratiche nella realizzazione.

Il costo di produzione del D_2O viene effettivamente ad allinearsi su di un piano industriale. La produzione quantitativamente non è subordinata a quella di altre industrie.

Può essere interessante un confronto con il costo, a parità di condizioni di impiego, dell'energia solare. In questo caso il costo della Cal è dovuto essenzialmente a quello del capitale occorrente agli impianti di raccolta e di accumulo per le ore notturne (assai preponderante il primo), relativa manutenzione, oneri normali di gestione. Pur tenendo conto di molte favorevoli condizioni sia relative al funzionamento (temperature agli scambiatori molto basse e quindi elevatissimi coefficienti di rendimento nella raccolta del calore incidente e costo relativamente basso con grande semplicità di impianto) sia alla zona (Cal incidenti utilizzabili $2,5 \times 10^6$ annue per mq; temperature ambiente elevate) il costo dell'energia termica, ad una diligente analisi, risulta leggermente superiore a quello della stessa energia ottenibile da combustibili di tipo nafta con l'applicazione di ciclo termodinamico inverso. Il fatto che due eguali quantità di energia termica, ad eguale livello entropico, ottenute per due ben diverse vie, presentino un costo unitario pressochè eguale suggerisce l'idea di un generale equilibrio della complessa questione dell'energia. Ed appaiono, incidentalmente, anche le difficoltà e la dubbia convenienza economica attuale di utilizzazione del calore solare per l'ottenimento di altre forme pregiate di energia; difficoltà che deriva dal basso rendimento nella raccolta del calore solare quando occorra utilizzarlo a temperature tali da ammettere rendimenti termodinamici non irrisori.

Con medie o basse pressioni in colonna di frazionamento il dimensionamento e quindi il costo delle colonne risulta elevato, diviene anzi rapidamente proibitivo al diminuire della pressione in quanto il materiale di riempimento rappresenta un onere (analogo del resto al costo delle colonne a piatti) dell'ordine di 150.000 a 400.000 L/mc a seconda dei tipi.

E pertanto, anche raggiunto un equilibrio tra valore del prodotto

e costo di produzione per quanto riguarda il consumo di energia, occorre ancora raggiungere analogo equilibrio tra valore della produzione e costo degli impianti occorrenti a realizzarla. Possono a ciò soccorrere particolari sistemi di colonne di frazionamento sui quali non è possibile dilungarsi.

Il notevole sviluppo delle superficie degli scambiatori, dipendente dai piccoli salti di temperatura disponibili, non appare invece tale da incidere in misura preoccupante sui costi di ammortamento e di manutenzione.

A differenza dai comuni tipi di colonne considerati nella industria chimica, il tipo indicato in fig. 1 per il I stadio non prevede riflusso; è alimentato direttamente sul piatto superiore. È cioè eliminato il tratto di colonna comunemente denominato di concentrazione; il che è ovvio poichè la materia prima ha costo nullo rispetto all'onere di estrazione. È immediato dedurre che la presenza di un tronco superiore di concentrazione non influirebbe sul fabbisogno di energia termica ma soltanto sull'acqua circolante a parità di produzione. Nulla osterebbe infatti a realizzare valori di riflusso anche elevati, fermo restando praticamente il fabbisogno di energia termica per unità di prodotto, fabbisogno che dipende soltanto dalla concentrazione esistente sul piatto di alimentazione e dal valore del coefficiente di separazione.

Tale variante verrebbe convenientemente attuata nel caso in cui fosse possibile alimentare la colonna con acqua alquanto arricchita preventivamente con altri metodi in grado di effettuare tale operazione con spesa limitata. Per tale via sarebbe possibile giungere ad illimitate produzioni di acqua pesante per distillazione frazionata dell'acqua con modesti consumi di energia.

È ovvio che le colonne degli stadi successivi al primo sono invece di tipo classico, ad esaurimento spinto al massimo valore

economico del prodotto che ricevono dal I stadio, e con alimentazione su di un piatto intermedio che separa la colonna nei due normali tronchi di concentrazione e di esaurimento.

Può essere interessante determinare la temperatura più economica di funzionamento dello schema fig. 2 in funzione della spesa per combustibile e per ammortamento impianti; il che può essere fatto in modo molto semplice se pure con qualche necessaria approssimazione.

Poste le condizioni:

velocità del vapore nella colonna considerata vuota: $v=10$ m/sec

produzione 1 Kg/ora D_2O alla concentrazione 1 %

ammortamento in 30.000 ore (tenuto conto degli interessi e manutenzione il periodo di ammortamento risulta notevolmente più lungo)

calore totale necessario alla evaporazione acqua: considerato

per semplicità costante alle diverse temperature previste dal problema ed eguale a 600 Cal/Kg

materiale di partenza: acqua comune con $x_A=0,000149$,

in funzione della variabile T_2 che indicheremo semplicemente con T ($^{\circ}K$) si ricava:

calorie occorrenti al ricupero nel I stadio di 1 Kg D_2O : tenendo presente la (10) occorrono:

$$Q \text{ Cal} = \frac{0,000149}{\text{Kg l}} \times \frac{1}{r} \times 600 \text{ Cal/Kg} \times \frac{1}{\eta_1 \eta_2} \times \frac{T_1 - T}{T} \quad (11)$$

Il parametro r è funzione di α a sua volta funzione complessa e sperimentale di T . Dall'esame della tabella 1 e del diagramma fig. 3 appare che nell'intervallo da 293° a 323° K può essere con sufficiente approssimazione adottata la relazione empirica:

$$\frac{1}{r} = 1,9 \times 10^{-9} \times T^4 \quad (12)$$

In fig. 3 la curva sperimentale è

indicata a tratto intiero e la curva empirica punteggiata. Così anche negli analoghi diagrammi successivamente indicati.

In definitiva, con i valori $\eta_1 \eta_2$ già accennati e considerato un salto di temperatura $T_1 - T = 10^{\circ}$, si ottiene:

$$Q = 0,225 T^3 \text{ Cal} \quad (13)$$

necessarie ad ottenere 1 Kg D_2O . Tale valore evidentemente non dipende dalla concentrazione dell'estratto alla base della colonna, nulla ostando in linea teorica a prolungare in basso la colonna sino a concentrazione elevata a piacere. Soluzione tecnicamente impensabile non fosse che per il tempo (molti anni) che la colonna impiegherebbe per mettersi a regime con estrazione a concentrazioni elevate;

volume della colonna e quindi del riempimento. La sezione della colonna deve dare passaggio ogni ora ad un peso di vapore acqueo che con il valore $1/r$ già ricavato vale:

$$\frac{\text{Kg l}}{0,000149} \times \frac{1}{r} = 1,276 \times 10^{-5} \times T^4 \quad (14)$$

e per velocità 10 m/sec e volume specifico v_0 mc/Kg la sezione sarà:

$$S = 1,276 \times 10^{-5} \times T^4 \times \frac{v_0}{10 \times 3.600} \text{ mq} \quad (15)$$

(nel caso particolare T rappresenta semplicemente un numero quindi l'espressione è omogenea; così negli altri analoghi casi).

Dal diagramma fig. 4 si vede che nell'intervallo da 293° a 323° K il volume v_0 risulta empiricamente esprimibile con la:

$$v_0 = 5,7 \times 10^{38} \times T^{-15} \quad (16)$$

Sostituendo e semplificando si ottiene:

$$S = 0,202 \times 10^{30} \times T^{-11} \quad (17)$$

Onde ricavare il volume interno della colonna occorre determinarne l'altezza. Calcolando, come attendibile, un'altezza di riempimento di m 0,60 equivalente ad un piatto, già fissate le concentrazioni di alimentazione e di estra-

Fig. 3

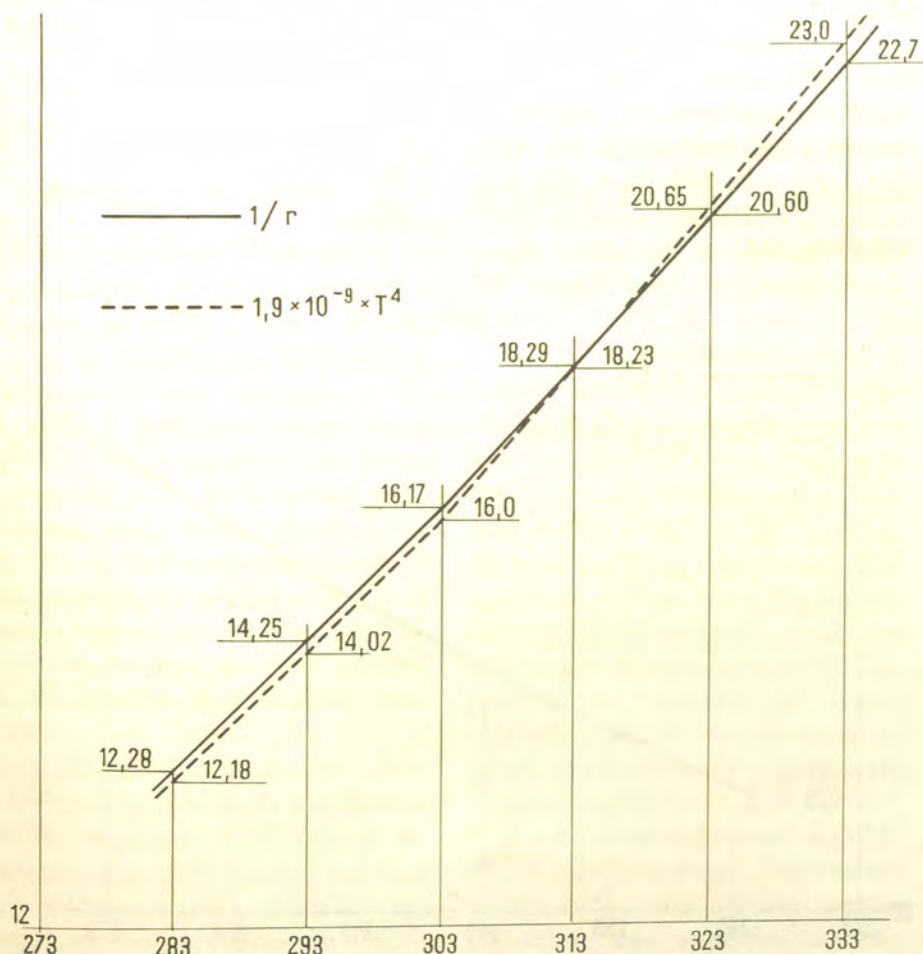


TABELLA 3

$T^{\circ}K$	α	$n \times 0,6$	$T^4 \times 10^{-8}$ 2,14
283	1,088	29,95	29,90
293	1,076	34,34	34,45
303	1,066	39,46	39,42
313	1,058	44,80	44,80
323	1,051	50,80	50,80
333	1,046	56,16	57,40

zione, l'altezza è ancora funzione di T essendola, secondo la (8), di $\alpha = f(T)$. Dalla tabella 3 e dal diagramma fig. 5, sempre nell'intervallo di temperatura già considerato, l'altezza H risulta:

$$H = \frac{1}{2,14} \times 10^{-8} \times T^4 \quad (18)$$

ed il volume complessivo di riempimento:

$$V = S \times H = 0,09435 \times 10^{22} \times T^{-7} \quad (19)$$

il peso in Kg del fasciame in acciaio della colonna si ha immediatamente dalla espressione:

$$P \text{ Kg} = 2 \sqrt{\pi S} \text{ (ml)} \times H \text{ (ml)} \times s \text{ (mm)} \times 8 \text{ (Kg/dmc)} \quad (20)$$

in cui s per pressione esterna 1 Kg/cm² e carico di sicurezza 10 Kg/mm² è ricavabile dalla espressione praticamente accettabile:

$$\begin{aligned} s \text{ (mm)} &= 1,6 \times \frac{1 \text{ (Kg/cm}^2\text{)} \times \varnothing \text{ (mm)}}{200 \times 10 \text{ (Kg/mm}^2\text{)}} = \\ &= 1,6 \sqrt{\frac{S}{\pi}} \quad (21) \end{aligned}$$

e sostituendo nella (20) si ha:

$$\text{peso fasciame} = \text{Kg } 2,416 \times 10^{22} \times T^{-7} \quad (22)$$

complesso dei macchinari atto ad assorbire e trasformare Cal Q (p.c.s. del combustibile) orarie:

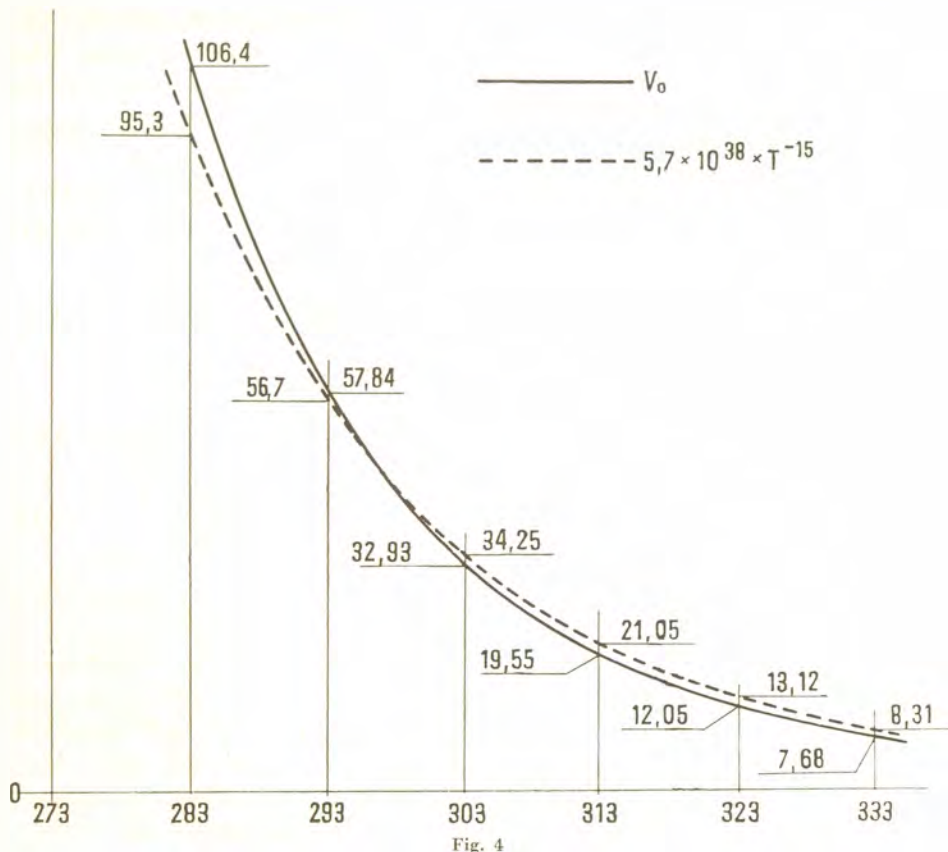
$$Q = 0,225 T^3 \quad (13')$$

Il costo y di 1 Kg D_2O , quale produzione oraria, risulterà sommando i vari termini funzione di T moltiplicati ciascuno per i costi unitari parziali, cioè:

$$y = 0,225 T^3 \times C_1 + 0,09435 \times 10^{22} \times T^{-7} \times C_2 + 2,416 \times 10^{22} \times T^{-7} \times C_3 + 0,225 T^3 \times C_4 \quad (23)$$

Possono considerarsi, in base a dati statistici correnti, i seguenti costi unitari di energia e di ammortamento:

$C_1 = 1$ Cal teorica (p.c.s.) del combustibile (nafta pesante + lubrificanti + varie) = L. 0,003;



$$\begin{aligned} C_2 &= 1 \text{ mc riempimento} = \\ &= \frac{\text{L. } 240.000}{30.000} = \text{L. } 8/\text{mc ora}; \end{aligned}$$

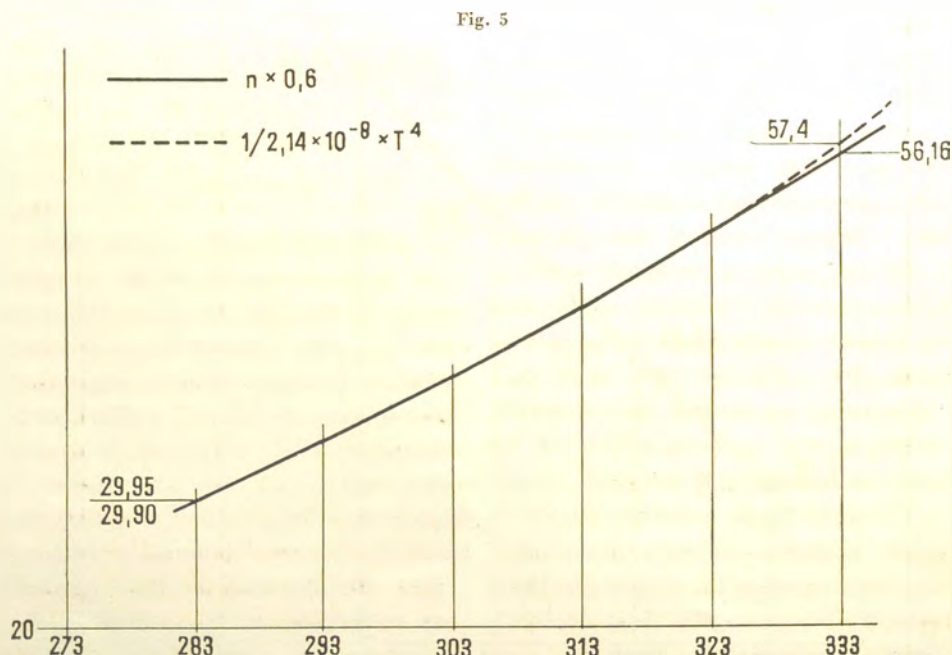
$$\begin{aligned} C_3 &= 1 \text{ Kg fasciame acciaio} = \\ &= \frac{\text{L. } 420}{30.000} = \text{L. } 0,014/\text{Kg ora}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C_4 &= \text{complesso del macchinario per 1 Cal teorica/ora del combustibile} = \\ &= \frac{\text{L. } 150}{30.000} = \text{L. } 0,005/\text{Cal installata ora}. \end{aligned}$$

Sostituendo nella (23) e semplificando si ottiene la funzione $y = f(T)$ rappresentante il costo di 1 Kg D_2O quale produzione oraria dell'impianto; funzione continua e derivabile e tali le sue derivate successive:

$$y = 0,0018 T^3 + 0,788624 \times 10^{22} \times T^{-7} \quad (23')$$

$$\frac{dy}{dT} = 0,0054 T^2 - 5,520368 \times 10^{22} \times T^{-8} \quad (24)$$



$$\frac{d^2y}{dT^2} = 0,0108 T + 44,162944 \times 10^{22} \times T^{-9} \quad (25)$$

La $\frac{dy}{dT} = 0$ fornisce una equazione che è soddisfatta dalla radice reale fisicamente accettabile, non multipla, $T = 316,93$. Dalla $\frac{d^2y}{dT^2}$ appare evidente trattarsi di un minimo. La temperatura teoricamente più economica, con le caratteristiche poste a base del problema, risulta quindi di $43,7^\circ\text{C}$.

Dall'espressione y' è altresì facile vedere che la tangente alla $y=f(T)$ è poco inclinata sull'asse delle ascisse a monte ed a valle del valore di T sopra ricavato (e, come logico, le due inclinazioni risultano di segno opposto). Ciò era ragionevolmente da attendersi.

Quanto esposto costituisce un esempio, se pur sommario, della generale impostazione del problema. Analoghi sviluppi comporterebbe la determinazione della concentrazione più conveniente alla base del primo stadio, e si troverebbe che la concentrazione adottata è eccessiva. Per il calcolo della cascata ideale conviene tenere conto anche del tempo che l'impianto impiega a mettersi a regime. Ad esempio la colonna sopra esaminata impiegherebbe teoricamente 13 mesi a mettersi a regime; in pratica molto di più.

Per la determinazione delle caratteristiche più convenienti del I stadio è opportuno impostare il calcolo contemporaneo di questo e dei successivi in funzione delle due variabili indipendenti T ed x_p del I stadio e determinare il minimo con la semplice anche se più laboriosa applicazione del sistema delle due derivate parziali e del relativo determinante hessiano.

Poichè lo sviluppo di calcolo con tre variabili risulta di applicazione molto penosa e difficile, è necessario preventivamente valutare con calcolo a parte il riflusso (rapporto di retrogradazione) e l'al-

tezza di colonna più conveniente nel II stadio e nei successivi e la conseguente perdita di prodotto in questi, visto che una estrazione teoricamente totale richiederebbe un riflusso teoricamente infinito od una infinita altezza di colonna. Di tale perdita pratica negli stadi successivi al primo si terrà conto nell'impostare il calcolo generale con due variabili ad evitare di dover ripetere il calcolo dopo verificati i rendimenti totali complessivi di tutto l'impianto. Siccome gli stadi successivi al primo insistono in modesta misura sul fabbisogno totale di energia, l'utilizzare per detta valutazione elementi approssimati non comporta generalmente la necessità di successive rettifiche dopo ricavata la soluzione generale del problema.

Comunque, e qualunque sia il numero di stadi, converrà fissare preventivamente una concentrazione x_n all'uscita dall'ultimo stadio che sia $x_n \ll 100\%$. Oltre un certo limite da determinarsi analiticamente caso per caso è infatti estremamente consigliabile procedere alla concentrazione per via elettrolitica secondo il sistema classico, con riciclo dell'idrogeno che viene bruciato e riportato alle vasche di elettrolisi immediatamente precedenti; calcolando anche qui la cascata ideale con semplici procedimenti analitici.

In base ai suaccennati criteri di calcolo un modesto impianto venne costruito, non recentemente, in una località dell'Africa Settentrionale, atto alla produzione giornaliera media di 420 gr. D_2O partendo da acque il cui contenuto di isotopo pesante era circa doppio del normale. Precisamente, quale accertato con bilancia molecolare appositamente costruita ed avente sensibilità 3×10^{-6} (e ciò in mancanza di altri metodi più moderni di misura), risultava $x_A = 0,00029$. Il che fu motivo potente di intervenire alla estrazione. Per ragioni contingenti venne utilizzata energia solare con superficie di rac-

colta mq 5.800 e con accumulo parziale di energia termica sì da portare a 14 ore giornaliere il funzionamento normale della colonna del I stadio. Gli stadi successivi venivano alimentati invece con funzionamento continuo e superficie di raccolta calore solare di mq 950 ed accumulo in serbatoio (acqua ad 85°C) del volume di mc 600.

Concentrazione all'uscita dal I stadio $0,22\%$; concentrazione alla uscita dal IV ed ultimo stadio 28% . La concentrazione a $99,6\%$ venne progettata, ma non effettuata, per via elettrolitica; lasciando gli ulteriori incombeni di rettifica ad altra organizzazione.

Il rendimento pratico nel I stadio risultò $3,09\%$. Le perdite negli stadi successivi portarono il rendimento complessivo a $2,88\%$.

Il I stadio era costituito da una unica torre del diametro m 2,85 ed altezza m 22,30. Gli stadi successivi, costituiti da torri di diametri scalarmente molto minori, avevano altezze sino a m 27. Velocità del vapore m 3,20/sec nel I stadio. Temperatura in testa al I stadio 38°C . Riempimenti in Raschig (unico materiale allora disponibile) in varie misure secondo gli stadi.

Gravissimo problema fu rappresentato dalla corretta ed uniforme distribuzione del liquido in discesa, sì da realizzare una perfetta « bagnatura » del riempimento. Problema tanto più grave quanto più bassa è la velocità del vapore e la pressione in colonna. Vari delicati artifici dovettero essere messi in opera, il cui risultato fu sancito dal rendimento ottenuto.

L'impianto raggiunse il funzionamento di regime in 38 giorni.

Renato Grignolio

FONTI

Ricerca sperimentale diretta.
EGGERT - *Chimica Fisica*.
J. H. PERRY - *Chem. Eng. Hand.*
Ind. Eng. Chem. - varie.
Riviste scientifiche varie.

Il Centro Studi sulle Sospensioni (attività, attrezzature e programmi)

A. RUSSO-FRATTASI riferisce sulle attrezzature e sugli impianti che presso l'Istituto Trasporti del Politecnico di Torino sono in funzione o sono in fase di montaggio, per lo studio dei problemi vibrazionali nei veicoli stradali.

Il « Centro Studi sulle Sospensioni » ha iniziato la sua attività, nel quadro dei lavori di ricerca e sperimentazione dell'Istituto Trasporti del Politecnico di Torino, nell'autunno del 1958 e già nell'ottobre del 1959, al Congresso dell'ATA svoltosi a Milano, ha potuto presentare i primi risultati di una lunga serie di indagini e sperimentazioni effettuate su veicoli industriali adibiti al trasporto persone ⁽¹⁾.

La « Giornata di Studio » ⁽²⁾ da noi organizzata segna un ulteriore passo in avanti ed ha lo scopo di portare a conoscenza di tutti i tecnici qualificati gli scopi della nostra attività, le attrezzature di cui disponiamo, il programma dei lavori già predisposto e nel contempo ci permetterà di raccogliere consigli, collaborazione ed aiuti per ampliare la nostra attività e metterla realmente al servizio dell'industria in un settore nel quale la necessità di una conoscenza approfondita dei problemi che si pongono al progettista di autoveicoli, in vista di trovare delle nuove soluzioni che permettano di migliorare il comfort del veicolo stesso, è di capitale importanza.

⁽¹⁾ V. ZIGNOLI, *Il comfort degli autoveicoli*, « ATA » marzo 1960. A. Russo-Frattasi, *Prove comparative per la determinazione delle accelerazioni verticali e delle frequenze trasmesse alla cassa del veicolo da sospensioni di tipo meccanico e pneumatico*. Febbraio 1959 « Atti e Rassegna tecnica ». Istituto Trasporti del Politecnico di Torino: Determinazione delle accelerazioni verticali e delle frequenze trasmesse alla cassa di autobus da sospensioni meccaniche con molle a balestra, miste semipneumatiche e pneumatiche.

⁽²⁾ Giornata di Studio sui problemi delle sospensioni, svoltasi a Torino presso l'Istituto Trasporti del Politecnico il 13 luglio 1960 alla presenza di un gruppo di tecnici qualificati durante la quale sono state discusse le relazioni del programma riportato in appendice.

Per questo il piano dei lavori di ricerca è stato impostato — dopo i primi rilievi complessivi con gli apparecchi a disposizione — in modo da cercare di scindere gli effetti oscillatori che, nella loro totalità, sono dovuti ai sedili, al telaio, alle sospensioni, agli ammortizzatori, ai pneumatici, etc., allo scopo di avere delle idee ben concrete sul come ciascuno di essi influisca sul comfort generale del trasportato.

È evidente che, trattandosi di fenomeni vibrazionali, gli elementi base sui quali occorre indagare per poter conoscerne l'effettiva entità sono essenzialmente la accelerazione verticale e la frequenza: *bassa* e cioè dell'ordine da meno di 1 Hz a qualche Hertz per le oscillazioni proprie della cassa, *media* sui 10/15 Hertz per effetti delle sospensioni ed *alta*, cioè oltre i 20 Hz, per le vibrazioni distribuite nelle diverse parti del veicolo.

Per le vibrazioni generate dalle sospensioni è opportuno ricorda-

re che per molle aventi caratteristica lineare, vale a dire in cui la deflessione s sia proporzionale al carico P , la frequenza naturale f_n , in cicli/sec, è data da

$$f_n = 314 \sqrt{1/s}$$

di ingrandimento e = ampiezza inoltre la trasmissibilità o fattore della vibrazione forzata/ampiezza del disturbo, che eguaglia forza trasmessa/forza impressa, è espressa da

$$e = \frac{1}{1 - (f/f_n)^2}$$

dove f è la frequenza del disturbo: ne consegue che sia il valore di f , sia quella della sollecitazione impressa, hanno influenza determinante sulle prestazioni della sospensione.

Poichè però il rapporto tra la deflessione della molla senza carico e la deflessione a pieno carico può variare entro ampi limiti ⁽³⁾ diventa impossibile assicurare un buon comfort nell'interno del veicolo per tutta l'estensione dei carichi possibili. È desiderabile perciò cercare di conservare la frequenza naturale f_n costante, indipendentemente dal carico imposto alla sospensione il che comporta che la sospensione debba avere una caratteristica non lineare, con rigidità K in aumento quando aumenta il carico P ; questa caratteristica, denominata sopra-lineare, è il principio sul quale si basano tutte le molle ad aria, quelle miste etc.

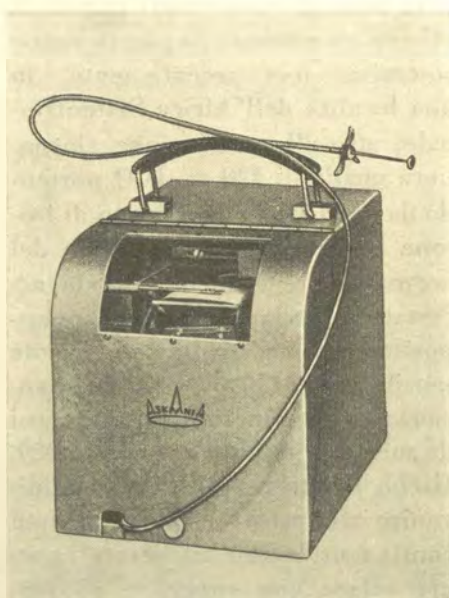
Impostazione matematica del problema.

Il problema dinamico — al quale occorre dare veste matematica per lo studio delle sollecitazioni vibrazionali trasmesse dai vari organi del veicolo alla cassa — è un problema estremamente complesso perchè interessa non soltanto una massa rigida vincolata ad altre due masse rigide a mezzo di molle, ammortizzatori etc., ma tutto un insieme elastico che è soggetto ad oscillare sia per impulsi dovuti al sedime stradale sia per quelli dovuti alla sorgente ed alla trasmissione del moto.

In realtà le superfici stradali presentano sempre delle gobbe ed

⁽³⁾ Nei rimorchi d'autobus può salire da 1 fino a 3, ciò significa che i rapporti f/f_n possono variare da 1 a $\sqrt{3}$.

Fig. 1 - Frenoscrittore Askania



avvallamenti così che le ruote dei veicoli sono costrette ad una serie di moti verticali successivi nei due sensi. Le accelerazioni di detti moti e le forze di inerzia che ne nascono, come le forze trasmesse



Fig. 2 - Oscillogramma registrato sugli assali anteriori di veicoli Fiat 306/2 attrezzati con sospensioni a balestra (veicolo scarico).

dagli assali alla cassa del veicolo, crescono con il quadrato della velocità di marcia e sono influenzate dalle dimensioni delle ruote. Se ruote e veicolo fossero perfettamente rigidi le accelerazioni del centro della ruota verrebbero trasmesse integralmente al veicolo per cui con semplici calcoli si potrebbe dimostrare come gobbe quasi impercettibili sul passo stradale provocherebbero, a velocità discretamente elevate, accelerazioni verticali e quindi forze d'inerzia assolutamente non tollerabili dai passeggeri.

Le vibrazioni provocate dal motore e dagli organi di trasmissione sono dovute invece alle rapide combustioni dentro i cilindri, a fenomeni di natura torsionale⁽⁴⁾ etc. e sono in genere, rapide regolari e persistenti finché non cambia il regime del moto.

Negli autoveicoli gli stati vibrazionali più intensi, oltre che ad essere dovuti a fenomeni di risonanza, si hanno per la sovrapposizione di alcune perturbazioni di frequenze molto prossime; ad esempio, oscillazioni di beccheggio che si compongono con oscillazioni verticali dando luogo al caratteristico fenomeno dei battimenti etc.

⁽⁴⁾ Una deformazione di torsione dell'albero a gomito provoca contemporaneamente uno spostamento assiale dei diversi gomiti; in regime di vibrazione torsionale a distanza sufficiente dai regimi di risonanza, le ampiezze di vibrazione sono piuttosto modeste; in risonanza invece le deformazioni di torsione e quindi quelle assiali — secondo Warning — possono assumere valori rilevanti ed il sistema si troverà in un regime di vibrazioni complesso nel quale le vibrazioni assiali si sovrappongono a quelle torsionali. Infatti se il momento torcente alterno dovuto alla vibrazione torsionale è superiore al momento medio trasmesso dall'albero, detta vibrazione è in grado di eccitare una vibrazione assiale di frequenza doppia.

DRAMINSKY e WARNING - *Vibrations axiales des arbres manivelles*, « Bull. Techn. Vent. », n. 22, maggio 1960.

Se si volessero quindi considerare tutti i gradi di libertà possibili nel sistema elastico costituito dalle parti di un qualsiasi veicolo, si vedrebbe subito come, senza alcuna limitazione restrittiva, il

numero dei gradi di libertà sarebbe elevatissimo e la soluzione del problema si presenterebbe estremamente complessa; infatti essa comporterebbe la soluzione di un



Fig. 3 - Dispositivo registratore della forza esercitata sul pedale di freno, nonché dei tempi e spazi di frenatura.

sistema di equazioni pari al numero dei gradi di libertà, equazioni in ognuna delle quali si ritrovano termini inerziali, elastici, eccitatori e dissipativi. È evidente come tali sistemi non siano risolvibili che attraverso le calcolatrici elettroniche numeriche che possono affrontare problemi con 50 e più

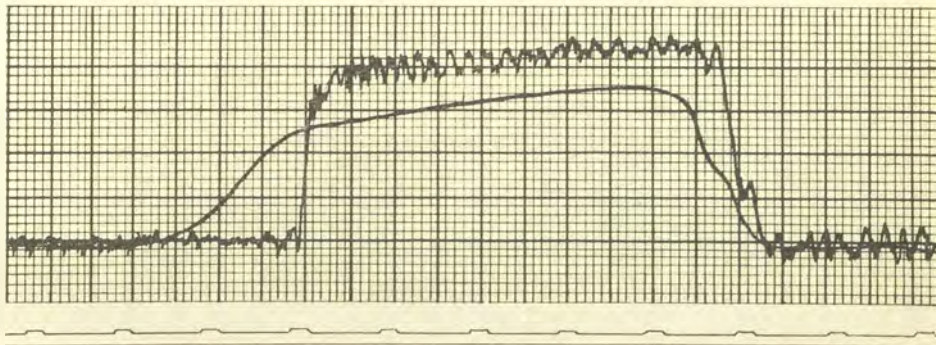
gradi di libertà. È però opportuno valutare bene, preventivamente, la utilità di una indagine così spinta.

L'orientamento generale invece degli studiosi di tali problemi è quello di trasferire, in un modello analogico, i fenomeni vibrazionali oggetto di studio limitando i gradi di libertà a quelli che permettano di riprodurre i moti rigidi principali del veicolo. Si arriva così ad un modello a 7 gradi di libertà, 3 per la cassa (oscillazioni verticali, rullo e beccheggio) 2 per le sospensioni anteriori e 2 per quelle posteriori (oscillazioni verticali e rullo), modello che, dai dati sperimentali ottenuti, ha permesso di ottenere dei risultati sufficientemente in accordo con i rilievi sperimentali. Questo modello permette — da una parte — di rilevare direttamente dall'oscilloscopio, e registrare su nastro magnetico o su carta il comportamento del sistema e di esaminare con una certa rapidità un gran numero di valori dei parametri in esame, — dall'altra — di elaborare elementi con caratteristiche di variazione non lineari nonché funzioni forzanti di andamento qualsiasi⁽⁵⁾.

Se invece, per ottenere una chiara — se pur parziale — rappresentazione di alcuni dei fattori in gioco, si effettuano alcune semplificazioni e si trascura l'effetto sulle caratteristiche di vibrazione, dei sedili molleggiati, dei pneumatici, della distribuzione delle masse nel veicolo, della differenza di molleggio anteriore e posteriore e del centro di gravità etc., il problema può essere considerato come sistema ad un solo grado di liber-

⁽⁵⁾ In tal caso infatti basta inviare alla calcolatrice degli impulsi elettrici aventi lo stesso andamento delle funzioni desiderate.

Fig. 4 - Esempio di misure effettuate controllando l'impianto di frenatura di un camion.



tà rappresentabile con una formula del tipo

$$M \frac{d^2 S}{dt^2} + K \frac{dS}{dt} + p S = F(t)$$

nella quale S indica i cedimenti della sospensione dotata di rigidità K con una massa sospesa M .

Strumenti di misura e di prova.

Le considerazioni precedenti sull'indagine matematica dei fenomeni oscillatori nell'interno dei veicoli e sulla necessità di separare gli effetti dovuti alle diverse sorgenti, portano alla conclusione che una proficua analisi delle bande registrate — analisi che permetta di ottenere dei risultati concreti — dovrebbe essere effettuata, con l'ausilio di opportuni filtri di frequenza per isolare l'entità delle singole vibrazioni, su di una calcolatrice analogica all'uopo attrezzata.

È per questo motivo che il nostro Istituto ha in atto avanzate trattative per cercare di installare, entro il prossimo anno, una calcolatrice che permetta di sviluppare più a fondo ed analiticamente tutti gli studi vibrazionali sulla

cassa del veicolo e sulle sue strutture ⁽⁶⁾.

Per la parte sperimentale con apparecchiature più semplici invece, si è detto che una delle prime grandezze da misurare, per analizzare una vibrazione, è lo spostamento o la sua ampiezza.

Se consideriamo una massa sospesa ad un elemento elastico ed assoggettiamo l'incastellatura che la sostiene a sollecitazioni vibrazionali secondo l'asse della molla stessa, possiamo calcolare che il moto relativo m tra la massa M ed il telaio, per uno spostamento unitario risulta

$$m = \frac{(f/f_n)^2}{\sqrt{[(f/f_n)^2 - 1]^2 + \beta^2 (f/f_n)^2}}$$

dove f = frequenza delle vibrazioni impresse al telaio;

f_n = frequenza naturale della massa M sospesa;

β = coefficiente di smorzamento.

Ne consegue che se il rapporto $f/f_n = 1$ si ha una condizione di

⁽⁶⁾ Un impianto analogo è già stato realizzato con brillanti risultati dalla Soc.p.az. Pirelli nello stabilimento della Bicocca ed è affidato alle cure del Dr. A. Chiesa.

Fig. 5 - Macchina prova vibrazioni per auto - Schema - scala 1:30.

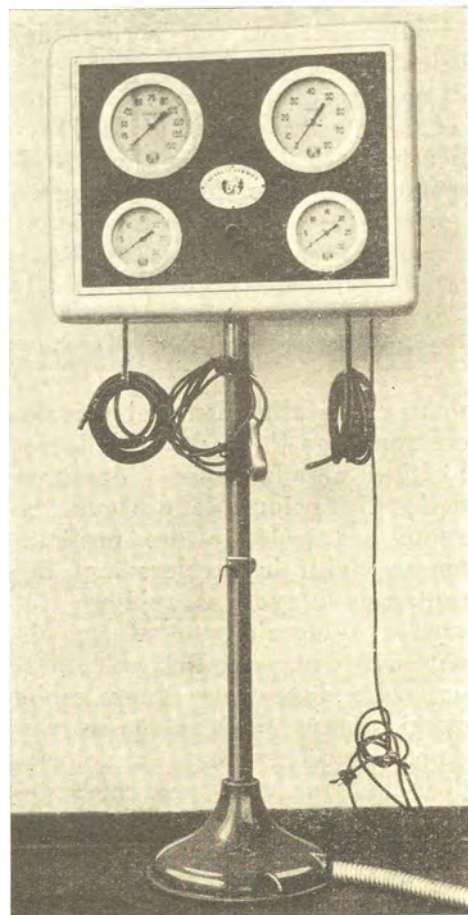
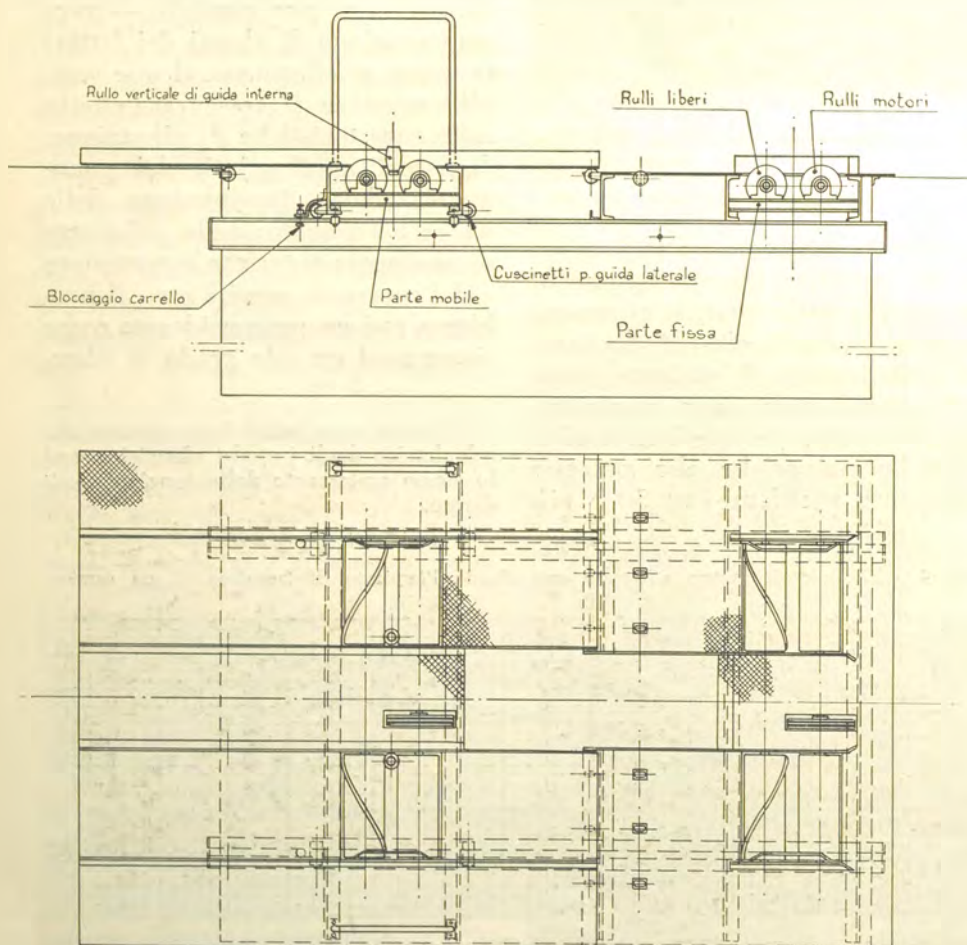


Fig. 6 - Quadro di controllo per il banco prova freno.

risonanza ed il moto relativo m sarebbe infinitamente grande senza l'intervento dello smorzamento; se $f/f_n < 1$ il valore di m risulta praticamente nullo, mentre se f/f_n dà un risultato di molto superiore all'unità di valore di m risulta praticamente uguale a quello dello spostamento S . Quindi sospendendo la massa ad una molla e lavorando in campi di frequenza di vibrazioni nei quali l'inerzia della massa sia più grande delle forze che ad essa applica la molla per effetto del moto relativo m , si riesce facilmente a conoscere, dalle misure di m , il valore di S e cioè dello spostamento dovuto alla vibrazione, valore che è legato all'ampiezza ed alla frequenza della vibrazione da una espressione del tipo

$$S = a \sin(2\pi ft)$$

dove a = ampiezza della vibrazione;

f = frequenza della vibrazione;

t = tempo ⁽⁷⁾.

⁽⁷⁾ Espressione generica delle armoniche componenti una vibrazione complessa nella quale si è trascurato l'angolo di fase supponendo $S=0$ per $t=0$.

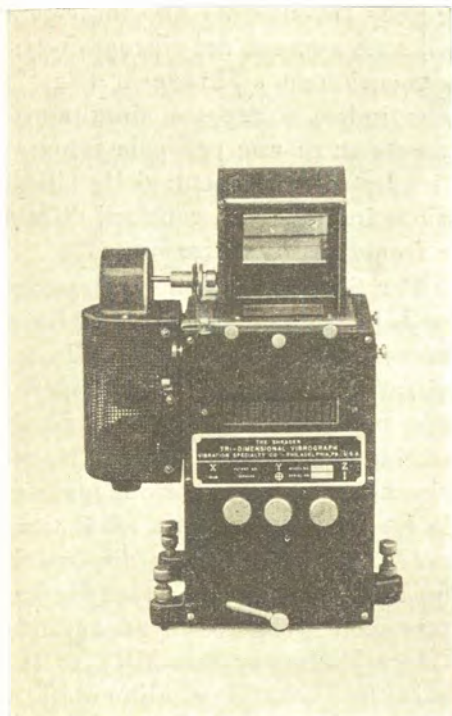


Fig. 7 - Vibrografo tridimensionale « Shrader ».

Ne consegue che la caratteristica fondamentale dei normali registratori di vibrazione è la frequenza propria.

Volendo quindi misurare le accelerazioni con dispositivi meccanici registratori, basati sul principio di massa a molla è indispensabile che la frequenza propria sia molto maggiore di quella massima del fenomeno da misurare.

Questi naturalmente sono i principi costruttivi di alcuni apparecchi in dotazione al Centro per le registrazioni a bordo dei veicoli, registrazioni che finora sono state effettuate a mezzo di una frenoscrivente Askania ⁽⁸⁾, montata ver-

⁽⁸⁾ La Frenoscrivente Askania (fig. 1) modello 1635 n. 540732 è un vibrografo costruito secondo il principio molla e massa, con quest'ultima del peso di circa 5,7 Kg fissata a quattro molle a balestra verticali.

L'oscillazione della massa, unidirezionale dato il sistema di fissaggio, è regolata in modo che essa possa oscillare con una autofrequenza di circa 5 Hz. con uno spostamento massimo di 10 mm.

Lo smorzamento delle oscillazioni della massa è ottenuto a mezzo di un mantice di gomma posto tra detta massa e la parete di fondo della carcassa racchiudente l'apparecchio; quindi corrispondentemente alla velocità del movimento oscillatorio della massa, l'aria entra ed esce nel mantice — modificandone la pressione — attraverso un ugello che è regolato in modo da permettere uno spostamento semiaperiodico della massa stessa.

L'impianto scrivente registra le oscillazioni della massa inerte su di un nastro

ticamente nell'interno dei veicoli in corrispondenza degli assali anteriore e posteriore, apparecchio dotato di una frequenza propria di oscillazione di 5 Hz. (fig. 1).

Naturalmente tale sistema di registrazione grafica (fig. 2), che richiede poi un lavoro enormemente abile ed accurato allo scopo di cercare di trarne almeno alcune indicazioni complessive e più che altro comparative sul comportamento di veicoli attrezzati con diversi tipi di sospensioni, dovrà essere integrato da registratori su nastro magnetico che permettano di avere a disposizione, in qualsiasi momento, il segnale vivo in laboratorio dove è più facile disporre di tutta la strumentazione di indagine e di ricerca.

Prima di elencare gli altri apparecchi di cui dispone il Centro, è opportuno far presente come le difficoltà incontrate nell'effettuare

incenerato largo 50 mm dei quali 40 mm sono destinati alla registrazione delle variazioni di accelerazione e 10 mm alla durata ed all'inizio e fine delle misurazioni.

Inoltre tale apparecchio è dotato di una attrezzatura supplementare, parte montata sull'apparecchio stesso, parte esterna, che permette di effettuare la registrazione sia della forza esercitata sul pedale del freno sia del tempo che dello spazio di frenatura. Ciò permette di controllare i fenomeni vibrazionali anche nelle fasi di variazione della legge del moto (fig. 3).

Nella fig. 4 sono riportati degli esempi di misure effettuate controllando l'impianto di frenatura di un camion.

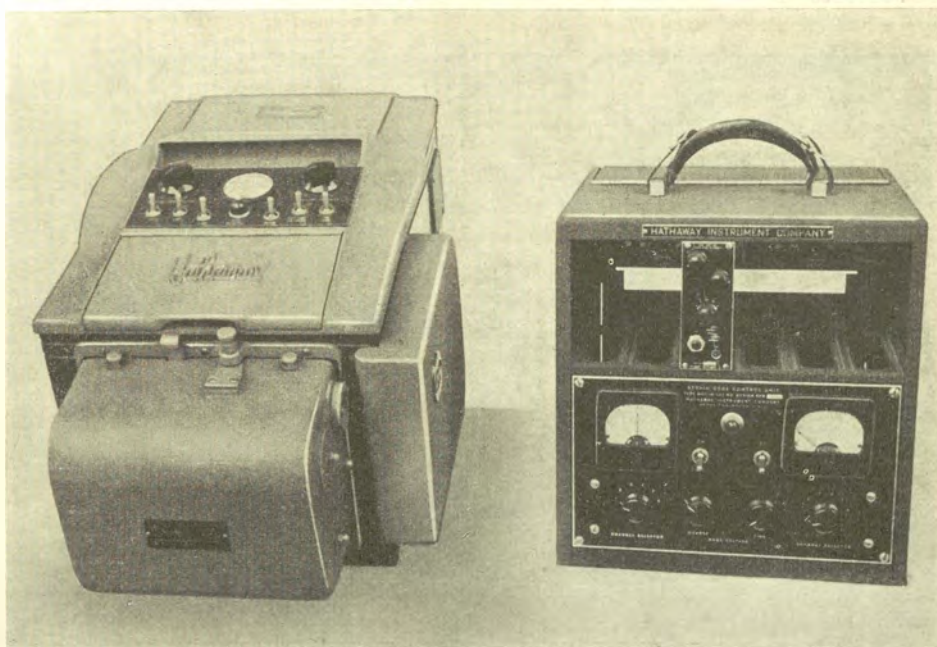
dei rilievi sui veicoli marcianti su strada ordinaria e la impossibilità pratica di utilizzare i mezzi su strada in condizioni sperimentali che non siano in perfetto assetto di marcia, ci abbia spinto a realizzare in Istituto l'impianto cosiddetto di « strada in casa ».

Tale impianto ⁽⁹⁾, illustrato nella fig. 5, permette di riprodurre sulla massa sospesa del veicolo, delle sollecitazioni pressochè analoghe a quelle trasmesse dai di-

⁽⁹⁾ L'impianto « strada in casa » (figura 5) è costituito da due coppie di rulli montati su unico telaio e con passo variabile sui quali possono salire veicoli con carico per asse fino a 100 q.li o del peso complessivo di 13.500 Kg. Ogni coppia di rulli può funzionare con entrambi i rulli folli, oppure con uno comandato e l'altro folle in modo da poter studiare il comportamento vibrazionale della parte sospesa del veicolo sia col motore in moto che col motore fermo sotto sollecitazioni identiche. Infatti variando opportunamente la rugosità superficiale dei cilindri si possono generare, nell'interno del veicolo marciante a diverse velocità, delle vibrazioni pressochè analoghe a quelle trasmesse da diversi tipi di strada.

Inoltre la coppia dei rulli posteriore può servire da banco freno potendosi collegare uno dei due rulli con un dispositivo di freno idraulico. In questo caso naturalmente, a seconda della variazione di carico, la misura della potenza assorbita viene data dalla coppia che il braccio del freno fa registrare dall'apposito meccanismo sul quadrante allo strumento applicato sul quadro di controllo (fig. 6). Aumentando e diminuendo la resistenza sui cilindri rotanti, qualunque tipo di strada o condizione di carico e dislivello possono essere fedelmente riprodotti.

Fig. 8 - Oscillografo registratore Hathaway mod. S14-E e amplificatore Hathaway tipo MRC-18.



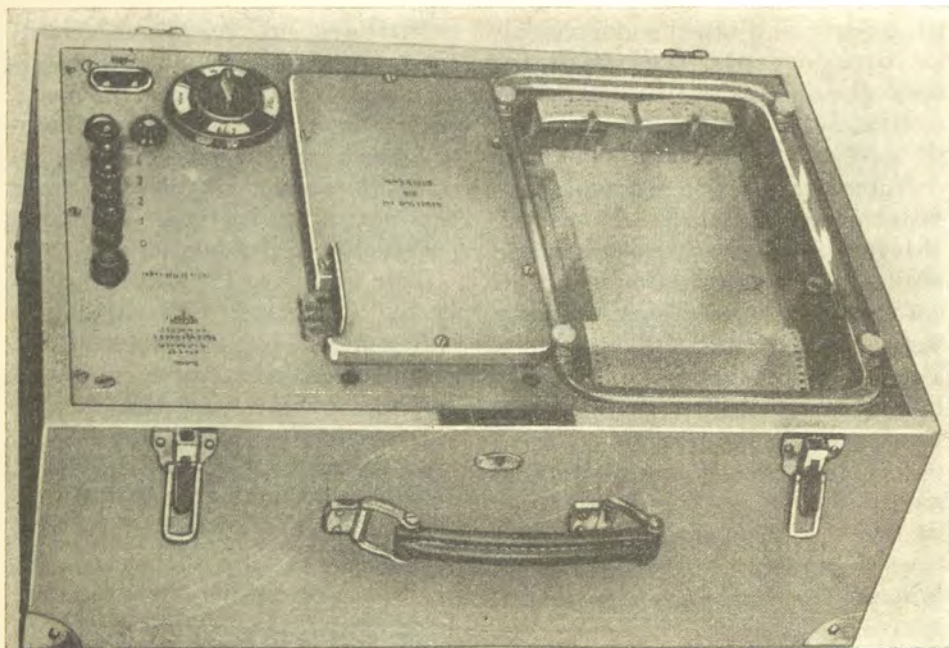


Fig. 9 - Registratore degli angoli del rullo e del beccheggio.

versi tipi di strada. Infatti un veicolo con carico fino a 10 q^l per asse, in completo assetto di marcia oppure privo di quegli elementi la cui influenza si vuol escludere dalla prova, può facilmente montare sui rulli ed in funzione della rugosità superficiale degli stessi, ricevere una serie di sollecitazioni facilmente registrabili con gli apparecchi installati a bordo od a terra a seconda del tipo di attrezzature disponibili.

Tale banco permetterà, tra l'altro, di vagliare a fondo l'influenza e le caratteristiche degli ammor-

tizzatori nei veicoli con sospensione pneumatica o mista. Infatti poichè le molle ad aria presentano una bassa isteresi elastica e minimi attriti, con conseguente coefficiente di smorzamento proprio molto basso, gli elementi ammortizzanti devono possedere un coefficiente di smorzamento elevato soprattutto alle basse frequenze prossime a quelle di risonanza, coefficiente che dovrebbe aumentare con l'ampiezza dell'oscillazione ed ipoteticamente ridursi con l'aumentare della frequenza.

Inoltre le vibrazioni dei motori

e delle trasmissioni possono essere rilevate a mezzo del vibrografo tridimensionale « Shrader » (fig. 7) che indica e registra simultaneamente su di una pellicola fotografica le tre componenti della vibrazione in ampiezza, rapporti di fase e frequenza di vibrazione ⁽¹⁰⁾.

Per il rilievo delle vibrazioni nella cassa del veicolo, poichè è necessario poter eseguire delle registrazioni multiple contemporanee per poter essere in grado di tracciare linee elastiche reali e precise nonchè semplificare le misure, la loro interpretazione ed il tempo dei rilievi, il Centro dispone di un oscillografo registratore Hathaway mod. S 14-E e di un amplificatore Hathaway tipo MRC-18 (figura 8) portatili e alimentati a batteria, i quali permettono di conoscere contemporaneamente le caratteristiche delle oscillazioni in 12 punti diversi della struttura in esame. Questo apparecchio funziona a frequenza portante, vale a

⁽¹⁰⁾ Il vibrografo tridimensionale (figura 7) è una specie di sismografo che permette di registrare con mezzi ottici o fotografici i movimenti relativi nelle tre dimensioni tra telaio e massa sospesa, massa in piombo del peso di circa 5 Kg sostenuta da 4 molle in lega di rame e berillio la cui lunghezza e rigidità sono tali che la frequenza naturale di vibrazione della massa in ognuna delle tre direzioni è di circa 150 oscillazioni al minuto.

La registrazione dei tempi, che appare come una successione di punti lungo il registratore di vibrazione è ottenuta da una canna sintonizzata a 30 cicli e montata in modo da interrompere, una volta per oscillazione, uno dei raggi di luce riflessi dagli specchi concavi del sistema ottico.

Per le osservazioni preliminari sull'ampiezza e forma d'onda della vibrazione si adopera un dispositivo a specchio rotante che permette di avere immediatamente e chiaramente la perfezione del fenomeno vibrazionale. Inoltre l'apparecchio è dotato di un registratore di fase di squilibrio a mezzo del quale può essere determinata la posizione angolare di squilibrio e con l'uso di pesi di prova si può determinare la quantità di peso correttivo necessario ad eliminare completamente la vibrazione. Tale registratore consiste in un dispositivo atto a sincronizzare la posizione angolare di squilibrio di una parte rotante con la massima ampiezza di vibrazione indicata dal vibrografo.

Fig. 10 - Sede del « Centro Studi Sospensioni » presso l'Istituto Trasporti del Politecnico di Torino.



dire l'oscillatore invia la propria frequenza portante direttamente all'ingresso dei ponti del rilevatore; il segnale in uscita dal rilevatore entra nell'amplificatore, viene amplificato, demodulato ed inviato al galvanometro. Siccome la frequenza portante dell'apparecchio è di 500 per/sec. è possibile registrare fenomeni fino ad un massimo di 500 per/sec. ⁽¹¹⁾.

Per completare le attrezzature oscillografiche da installare a bordo dei veicoli per il rilievo di tutti i fenomeni vibratorii, il Centro è dotato di un apparecchio Askania « Registratore degli angoli di rullo e di beccheggio » ⁽¹²⁾. Con tale apparecchio è possibile osservare la grandezza delle angolazioni di veicoli terrestri sia nella loro lunghezza sia rispetto all'asse verticale, e contemporaneamente registrarli. Con lo strumento a bordo si può facilmente registrare il comportamento di un veicolo su strada o su rotaia il che permette di fornire al costruttore, al collaudatore ed al controllo parecchi dati di notevole interesse (fig. 9).

Questa apparecchiatura giroscopica assomiglia quindi ad un pendolo bicardanico con ampio momento d'inerzia e smorzamento aperiodico, che — a differenza del pendolo normale — oscilla nella direzione apparente della verticale con una velocità d'angolo costante di circa 1° al minuto. I telai del giroscopio, in genere, si mantengono in orizzontale, donde la misurazione dell'angolo di inclinazione del veicolo avverrà praticamente sempre in rapporto all'orizzonte assoluto.

Alberto Russo-Frattasi

⁽¹¹⁾ L'apparecchio MRC-18 (fig. 8) può essere usato con diversi tipi di misuratori di sollecitazioni (Baldwin, Hathaway, etc.) con rivelatori di accelerazione, di velocità ed altri, per registrare valori di sollecitazione, accelerazione, spostamento e varie altre qualità fisiche aventi una frequenza variabile da 0 a 1500 per/sec. Tale apparecchio è costituito da:

— sei elementi amplificatori per comandare i galvanometri oscillografici in funzione delle erogazioni di tensione prodotte dagli Straing-gages;

PROGRAMMA DI PROVE DA SVOLGERSI DAL CENTRO

1. Sospensioni.

1.1. — Prove sul banco a rulli.

1.1.1. — Rilevazione delle oscillazioni verticali forzate indotte nella massa sospesa dai diversi tipi di sospensioni, normali, miste, pneumatiche sotto l'effetto dell'eccitazione esterna variabile in grandezza e frequenza;

1.1.2. — Idem come in 1.1.1. variando il valore della massa sospesa, le caratteristiche elastiche della sospensione e quelle di smorzamento degli ammortizzatori;

1.1.3. — Idem come in 1.1.1. e 1.1.2. rilevando le oscillazioni verticali libere smorzate con e senza ammortizzatori;

1.1.4. — Rilevazione delle oscillazioni di beccheggio e di rullo su veicoli percorrenti una teorica strada tipo e dotati di diversi tipi di sospensione.

1.1.5. — Rilevazione delle sollecitazioni dinamiche impresse dalle sospensioni alle strutture dalla massa sospesa.

1.2. — Prove su strada.

1.2.1. — Rilevazione dell'ampiezza delle oscillazioni verticali, dell'accelerazione verticale e delle frequenze trasmesse dalle sospensioni pneumatiche realizzate su determinati tipi di veicoli alla massa sospesa. (Le prove sono da condursi su *piste-tipo* preventivamente attrezzate e a base rigorosamente misurata).

— un elemento oscillatore portante a 5000 per/sec.

— una serie di apparecchi di controllo tra cui un indicatore statico, un voltmetro sensibile per indicare l'equilibrio del ponte e per misurare la tensione portante di 5000 cicli; un alimentatore che fornisce alta tensione regolata, a corrente continua, all'elemento oscillante e agli elementi amplificatori.

L'oscillografo Hathaway può ospitare fino a 12 elementi galvanometrici ed è costituito da:

— una parte ottica che comprende una piastra di base, una sede per lampada, una lampada di registrazione, due condensatori (lenti), 6 specchi, e 6 aperture regolabili;

— una parte galvanometrica che è quella base o supporto sul quale vengono montati i galvanometri;

— una serie di apparecchiature elettriche quali lampade, reostati, voltmetro etc. che permettono il funzionamento della lampada di registrazione e della lampada segnatempo nonché il controllo e la misura dei voltaggi applicati alle lampade;

— un motore e meccanismo di trasmissione che servono il primo, per l'azio-

1.2.2. — Rilevazione delle oscillazioni di beccheggio e di rullo su veicoli dotati di sospensioni pneumatiche.

1.2.3. — Rilevazione del comportamento dei veicoli dotati di diversi tipi di sospensione in fase di frenatura.

2. Pneumatici.

2.1. — Prove al banco.

2.1.1. — Determinazione della rigidità dinamica di vari tipi di pneumatici sotto l'azione delle sollecitazioni verticali oscillatorie forzate trasmesse dalla *rullo-strada* per vari valori della pressione di gonfiaggio.

2.1.2. — Determinazione delle oscillazioni della ruota, sotto l'azione delle sollecitazioni verticali forzate trasmesse dalla *rullo-strada*, per vari valori della rigidità del pneumatico, della rigidità della sospensione e del rapporto fra massa sospesa e non sospesa.

2.2. — Prove su strada.

2.2.1. — Determinazione dell'influenza di vari tipi di pneumatici sull'ampiezza e frequenza delle vibrazioni trasmesse dalla strada tipo alla massa sospesa dei veicoli.

3. Sedili.

3.1. — Prove al banco.

3.1.1. — Rilevazioni della influenza dei diversi tipi di sedili sulle sollecitazioni trasmesse al trasportato.

— namento del nastro per le registrazioni; il secondo, a mezzo di ingranaggi elicoidali di precisione che forniscono rapporti 10 : 1 a trasmettere il moto a tre alberi per trasmissione;

— una piastra anteriore che contiene una lente cilindrica di registrazione;

— uno schermo di visione graduato in mm che permette all'operatore di osservare la posizione e la deflessione della registrazione in qualsiasi momento, con l'oscillografo in funzione oppure no. Naturalmente come rilevatori di sollecitazione vengono usati degli Straing gages.

⁽¹²⁾ Il registratore del rullo e del beccheggio (fig. 9) consiste di un giroscopio, di un dispositivo di registrazione e di un trasformatore, il tutto montato su un basamento racchiuso in un unico involucro.

Il giroscopio è un cursore a corrente trifase, con una velocità di 30.000 g/m alimentato a 500 Hz. Mediante un controllo a doppio pendolo si evitano gli influssi di frizione, di squilibrio e lo spostamento del giroscopio sospeso nella sua posizione orizzontale dal grado di latitudine.

Il dispositivo di registrazione contiene un movimento di orologeria che aziona, ad una determinata velocità, la striscia di registrazione scorrente sulla tavola di scrittura.

C.D. 620.198 = *Trattamenti superficiali dei materiali metallici.*

UNI 4179: Trattamenti superficiali dei materiali metallici - Metodi per l'identificazione della natura dei rivestimenti metallici (fascicolo unico di 3 tabelle).

UNI 4195: Id. - Direttive per la misurazione dello spessore dei rivestimenti metallici con il metodo magnetico (fascicolo unico di 2 tabelle).

C.D. 621.595 - *Bombole per gas compressi, liquefatti e disciolti.*

UNI 4045: Bombole per gas compressi, o liquefatti, o disciolti sotto pressione - Colorazioni distintive (fascicolo unico di 2 tabelle).

C.D. 621.643.2 = *Tubi.*

UNI 3824: Tubi di acciaio senza saldatura e saldati - Tubi gas commerciali serie normale, filettati, con manicotto di giunzione (fascicolo unico di 2 tabelle) - (Sostituisce UNI 341 e UNI 1286).

UNI 4148: Id. - Tubi gas serie media, filettati, con manicotto di giunzione (fascicolo unico di 2 tabelle).

UNI 4149: Id. - Tubi gas serie pesante, filettati, con manicotto di giunzione (fascicolo unico di 2 tabelle) - (Sostituisce UNI 342 e UNI 1287).

UNI 349: Raccordi filettati per tubi gas - Manicotti di acciaio (2^a Ed.).

C.D. 621.753.2 = *Tolleranze.*

UNI 4224 P: Sistema di tolleranze ISO per lavorazioni meccaniche per dimensioni sopra 500 sino a 3150 mm - Tolleranze e scostamenti (fascicolo unico di 5 tabelle).

UNI 4225 P: Id. - Valori degli scostamenti per alberi (fascicolo unico di 4 tabelle).

UNI 4226 P: Id. - Valori degli scostamenti per fori (fascicolo unico di 2 tabelle).

C.D. 621.798.146 = *Contenitori - Tubetti metallici.*

UNI 4165: Tubetti deformabili d'alluminio verniciati internamente - Norme per i controlli (fascicolo unico di 4 tabelle).

C.D. 621.822-7.8 = *Cuscinetti a sfere e a rulli.*

UNI 4203: Cuscinetti a rotolamento - Cuscinetti radiali, rigidi, ad una corona di sfere, serie leggera (Serie ISO 02) - (Sostituisce UNI 606).

UNI 4204: Id. - Cuscinetti radiali, rigidi, ad una corona di sfere, serie media (Serie ISO 03) - (Sostituisce UNI 607).

UNI 4205: Id. - Cuscinetti radiali, rigidi, ad una corona di sfere, con schermo

di protezione non strisciante, serie leggera (Serie ISO 02) - (fascicolo unico di 2 tabelle).

UNI 4206: Id. - Cuscinetti radiali, rigidi, ad una corona di sfere, con schermo di protezione strisciante, serie leggera (Serie ISO 02) - (fascicolo unico di 2 tabelle).

UNI 4207: Id. - Cuscinetti radiali, rigidi, ad una corona di sfere, con schermo di protezione non strisciante, serie media (Serie ISO 03) - (fascicolo unico di 2 tabelle).

UNI 4208: Id. - Cuscinetti radiali, rigidi, ad una corona di sfere, con schermo di protezione strisciante, serie media (Serie ISO 03) - (fascicolo unico di 2 tabelle).

UNI 4209: Id. - Cuscinetti radiali, rigidi, ad una corona di sfere, per mandrini, serie leggera (Serie ISO 02) - (fascicolo unico di 2 tabelle) - Sostituisce UNI 3068).

UNI 4210: Id. - Cuscinetti radiali, rigidi, ad una corona di sfere, per mandrini, serie media (Serie ISO 03) - (fascicolo unico di 2 tabelle) - (Sostituisce UNI 3069).

UNI 4211: Id. - Cuscinetti obliqui, a due corone di sfere, serie leggera (Serie ISO 32) - (Sostituisce UNI 3084).

UNI 4212: Cuscinetti a rotolamento - Cuscinetti obliqui, a due corone di sfere, serie media (Serie ISO 33) - (Sostituisce UNI 3085).

UNI 4213: Id. - Cuscinetti radiali a rulli, rigidi, con bordi sull'anello interno, serie leggera (Serie ISO 02) - (fascicolo unico di 2 tabelle) - (Sostituisce UNI 618).

UNI 4214: Id. - Cuscinetti radiali a rulli, rigidi, con bordi sull'anello interno, serie media (Serie ISO 03) - (fascicolo unico di 2 tabelle) - (Sostituisce UNI 619).

UNI 4215: Id. - Cuscinetti radiali a rulli, rigidi, con bordi sull'anello esterno, serie leggera (Serie ISO 02) - (fascicolo unico di 2 tabelle) - (Sostituisce UNI 621 - 622).

UNI 4216: Id. - Cuscinetti radiali a rulli, rigidi, con bordi sull'anello esterno, serie leggera larga (Serie ISO 22) - (Sostituisce UNI 623) - (fascicolo unico di 2 tabelle).

UNI 4217: Id. - Cuscinetti radiali a rulli, rigidi, con bordi sull'anello esterno, serie media (Serie ISO 03) - (fascicolo unico di 2 tabelle) - (Sostituisce UNI 624).

UNI 4218: Id. - Cuscinetti radiali a rulli, rigidi, con bordi sull'anello esterno, serie media larga (Serie ISO 23) - (fascicolo unico di 2 tabelle) - Sostituisce UNI 625).

UNI 4219: Id. - Cuscinetti a rulli conici, serie leggera (Serie ISO 02) - fascicolo unico di 2 tabelle) - (Sostituisce UNI 636).

UNI 4220: Id. - Cuscinetti a rulli conici, serie leggera larga (Serie ISO 22) - (Sostituisce UNI 637).

UNI 4221: — Id. - Cuscinetti a rulli conici, serie media (Serie ISO 03) - (fascicolo unico di 2 tabelle) - (Sostituisce UNI 638).

UNI 4222: Id. - Cuscinetti a rulli conici, serie media larga (Serie ISO 23) - (fascicolo unico di 2 tabelle) - (Sostituisce UNI 639).

UNI 4223: Id. - Spallamenti e profondità delle camere per cuscinetti a rulli conici (fascicolo unico di 2 tabelle).

C.D. 621.867.6 = *Trasportatori a rulli.*

UNI 4181: Trasportatori a rulli - Nomenclatura - Dimensioni principali - Designazione (fascicolo unico di 2 tabelle).

C.D. 621.869.3 = *Palette di caricamento.*

UNI 4121: Palette di caricamento - Tipi - Dimensioni - Caratteristiche principali (fascicolo unico di 4 tabelle).

C.D. 621.882.1 = *Generalità sulla bulloneria.*

UNI 4151: Smussature delle filettature e distanze di spallamento per filettature metriche (fascicolo unico di 2 tabelle) - (Sostituisce UNI 949).

UNI 4152: Gole di scarico delle filettature e distanze di spallamento per filettature metriche (fascicolo unico di 2 tabelle) - Sostituisce UNI 951).

UNI 4153: Gole di scarico sottotesta delle filettature per viti con guarnizione.

C.D. 621.882-082.22 = *Filettature gas.*

UNI 338: 3^a ed. - Filettatura gas cilindrica (fascicolo unico di 2 tabelle).

UNI 339: 2^a ed. - Filettatura gas conica (fascicolo unico di 3 tabelle).

C.D. 621.9.025 = *Utensili a punta singola.*

UNI 4101 P: Utensili a punta singola, d'impiego generale, con placchetta di carburi metallici - Prospetto dei tipi unificati (fascicolo unico di 2 tabelle).

UNI 4102 P: Id. - Utensili diritti per sgrossatura (fascicolo unico di 2 tabelle).

UNI 4103 P: Id. - Utensili piegati per sgrossatura (fascicolo unico di 2 tabelle).

UNI 4104 P: Id. - Utensili piegati per sfacciatura (fascicolo unico di 2 tabelle).

UNI 4105 P: Id. - Utensili diritti per finitura (fascicolo unico di 2 tabelle).

UNI 4106 P: Id. - Utensili piegati per finitura (fascicolo unico di 2 tabelle).

UNI 4107 P: Id. - Utensili frontali per sgrossatura (fascicolo unico di 2 tabelle).

UNI 4108 P: Id. - Utensili piegati per spianatura (fascicolo unico di 2 tabelle).