


# CISE

Centro **I**nformazioni **S**tudi **E**sperienze

programmi  
competenze  
attrezzature

1977



# CISE

Centro Informazioni Studi Esperienze

\*

programmi  
competenze  
attrezzature

Segrate (Milano), 1977

*Il CISE ringrazia tutti coloro  
che hanno contribuito alla realizzazione  
di questo volume.*

# INDICE

PRESENTAZIONE	IX
SCHEDA DEL CISE	XI
CONSIDERAZIONI SUL CISE E SUL SUO SVILUPPO	XIX
UNO SGUARDO SULLA STORIA, SUL PRESENTE E SULLE PROSPETTIVE DEL CISE	
Cenni storici	XXV
I programmi attuali	XXVII
Prospettive	XXX
Pubblicazioni e varie	XXXI

## I programmi, le competenze e le attrezzature del CISE

1. INFORMATICA	
1.1. Utilizzazione dei calcolatori al CISE	3
1.2. Sviluppo e gestione di un centro di calcolo	3
1.3. Automazione di sistemi di strumenti	4
1.4. Sviluppo di software di base e applicativo	5
1.5. Uso e programmazione di microelaboratori	6
1.6. Progettazione assistita dal calcolatore (PAC)	6
1.7. Strumenti di calcolo in dotazione al CISE	7
2. CALCOLO NUMERICO	
2.1. Scopo del calcolo numerico	8
2.2. Competenze acquisite nell'ambito del calcolo numerico	8
3. CALCOLO MECCANICO	11
	V

<b>4. ANALISI E PROGETTO DEI NOCCIOLI DEI REATTORI NUCLEARI</b>	
4.1. I compiti dell'analista e del progettista nucleare	15
4.2. Competenze acquisite nel campo dell'analisi e progetto dei noccioli	17
4.3. Programmi di calcolo	19
<b>5. STUDI DI TERMOIDRAULICA E DI SICUREZZA DEI REATTORI NUCLEARI</b>	
5.1. Problemi termoidraulici di un impianto nucleare	20
5.2. Inquadramento delle ricerche	21
5.3. Tipiche ricerche di termoidraulica	23
5.4. Programmi di calcolo	26
5.5. Gli impianti termoidraulici sperimentali	29
5.6. Sezioni di prova e dispositivi speciali	37
5.7. Sistema Barre Bifase per la regolazione del reattore CIRENE	40
5.8. Esperienze per lo studio degli effetti dello scoppio del tubo a pressione nel reattore CIRENE	42
<b>6. STUDI SUL COMBUSTIBILE NUCLEARE</b>	
6.1. Generalità	44
6.2. Prove in reattore	44
6.3. Prove fuori reattore	49
6.4. Strumentazione speciale per misure in reattore	53
<b>7. IMPIANTI E ATTREZZATURE IN REATTORE</b>	
7.1. Generalità	55
7.2. Impianti di grandi dimensioni	55
7.3. Attrezzature speciali	59
7.4. Attrezzature per controlli non distruttivi in reattore	62
<b>8. REALIZZAZIONI MECCANICHE</b>	63
<b>9. SISTEMI DI SORVEGLIANZA DI COMPONENTI DI IMPIANTI</b>	
9.1. Generalità	65
9.2. Identificazione di processi dinamici	65
9.3. Vibrazioni meccaniche	66
9.4. Emissione acustica nei materiali sotto sforzo	68
9.5. Diagnosi acustica di rotture in componenti a pressione	71

<b>10. STUDI SUI MATERIALI METALLICI E SVILUPPO DI TECNOLOGIE AVANZATE</b>	
10.1. Struttura dei materiali metallici	72
10.2. Materiali metallici con caratteristiche avanzate	75
10.3. Corrosione di materiali metallici	75
10.4. Prove meccaniche sui materiali metallici	79
10.5. Caratterizzazione di manufatti e di materiali metallici	80
10.6. Sviluppo della tecnologia dei giunti mandrinati	83
<b>11. SVILUPPO DI MATERIALI PER L'ELETTRONICA E DI DISPOSITIVI ELETTRONICI</b>	
11.1. Attività sui materiali semiconduttori	87
11.2. Genesi dell'attività sui dispositivi a semiconduttore al CISE	88
11.3. Dispositivi per microonde	89
11.4. Laser a semiconduttore	91
11.5. Rivelatori per il medio e lontano infrarosso	91
11.6. Celle solari	94
11.7. Attrezzature per la costruzione di dispositivi	95
<b>12. SVILUPPO DI STRUMENTAZIONE ELETTRONICA ED ELETTROOTTICA</b>	
12.1. Strumentazione elettronica	96
12.2. Strumentazione elettroottica	99
<b>13. L'ELETTRONICA QUANTISTICA E LO SVILUPPO DI SORGENTI LASER</b>	
13.1. Cenni sull'elettronica quantistica	100
13.2. Proprietà statistiche del campo e.m. emesso da un laser	101
13.3. Attività sulle sorgenti laser	101
13.4. Laser a gas	103
13.5. Laser a stato solido	104
13.6. Laser accordabili in frequenza	105
13.7. Studio di fattibilità di un laser a raggi X	107
<b>14. APPLICAZIONI SCIENTIFICHE E TECNICHE DEI LASER</b>	
14.1. Esperimenti di diffusione di luce (scattering) da fluidi	110
14.2. Interferometria su lunga distanza e misura di vibrazioni di strutture	110
14.3. Olografia ed interferometria in luce diffusa (speckle pattern) per l'analisi di campi di spostamento e di vibrazioni	112

14.4. Misura di distanza con laser ad impulsi	115
14.5. Metodi per il miglioramento di visibilità nella nebbia o in mezzi diffondenti in genere	116
14.6. Misura a distanza della contaminazione atmosferica	117
15. STUDI DI CHIMICA	
15.1. Generalità	118
15.2. Chimica analitica strumentale	118
15.3. Tecniche di separazione	121
15.4. Tecniche di radiochimica	121
15.5. Attività di chimica-fisica	122
16. STUDI SULL'AMBIENTE	
16.1. Generalità	123
16.2. Contaminazione chimica	123
16.3. Radioattività ambientale	123
16.4. Studi sulle caratteristiche di alcune componenti ambientali	125
16.5. Scarichi termici di impianti termoelettrici	126
17. STUDI DI FISICA	
17.1. Competenze nel campo della fisica	129
17.2. Messa a punto e gestione del tandem Van de Graaff	130
17.3. Materiali criogenici	133
17.4. Diffusività termica in solidi non omogenei e in solidi anisotropi	135
17.5. Teoria della risposta non lineare	135
APPENDICE - ELENCO DELLE PAROLE-CHIAVE	137

## PRESENTAZIONE

Nel novembre 1976 è trascorso il 30° anniversario della fondazione del CISE (Centro Informazioni Studi Esperienze). Annoverabile tra i maggiori organismi di ricerca in Italia, e di notevoli dimensioni anche su scala internazionale, questo Centro, che opera nel campo della ricerca scientifica e tecnica con particolare riguardo ai problemi dell'energia, ha sviluppato gradualmente, con un ritmo quasi biologico, un complesso di competenze avanzate, particolarmente approfondite e diversificate, accompagnate da una duttilità e da una attitudine ad affrontare problemi nuovi, anche di tipo interdisciplinare, difficilmente riscontrabili in Centri di ricerca di altre dimensioni e con altra tradizione.

È ora maturato per il CISE il momento di farsi conoscere meglio e più estesamente, anche al di fuori degli ambienti scientifici - nazionali ed internazionali - con i quali esso è abitualmente in contatto, ed al di fuori della relativamente ristretta cerchia di quei grandi Enti ed industrie per conto dei quali esso ha svolto e svolge tuttora la maggior parte delle proprie attività. Il CISE ritiene infatti che le proprie competenze, se conosciute in un ambito più vasto, troverebbero sicuramente ulteriori e proficue utilizzazioni, nell'ambito sia nazionale che internazionale. Nel primo caso, basti considerare, ad esempio, che il tessuto connettivo dell'industria del nostro Paese - come è noto - è costituito da una molteplicità di medie e piccole imprese, alle quali è praticamente preclusa la possibilità di svolgere in proprio quelle attività di ricerca e sviluppo che sarebbero spesso indispensabili per una corretta soluzione di problemi tecnologici e per lo sviluppo di nuovi prodotti. Ne conseguono difficoltà concorrenziali e il frequente ricorso a licenze straniere. Il CISE può sensibilmente contribuire, grazie alle proprie competenze ed ai propri mezzi sperimentali, ad alleviare situazioni di questo tipo e si propone quindi come organismo qualificato di ricerca ai settori più disparati di questa area essenziale dell'industria nazionale.

Un'altra possibilità di utilizzazione sul piano nazionale delle competenze del CISE si delinea in relazione a problemi, come per esempio quelli ambientali, derivanti alle Regioni dalle responsabilità che il decentramento ha posto a carico di tali Enti. D'altro canto, anche agli organismi centrali preposti alla programmazione e controllo dello sviluppo del Paese il CISE può fornire il proprio appoggio, sia con attività finalizzate di ricerca, sia con indagini e studi di previsione tecnico-economici, ad esempio nell'ambito del vitale settore energetico.



Sul piano internazionale, una utilizzazione di determinate competenze ed attrezzature del CISE si è già verificata e si verifica tuttora anche nei Paesi industrialmente più avanzati, mentre prospettive più ampie potrebbero aprirsi in quei Paesi dove si riscontrano carenze di strutture di ricerca e sviluppo, come in particolare in quelli del cosiddetto « terzo mondo ».

Questo volume, pur uscendo – come si è detto – in corrispondenza col trentennale del CISE, non ha, se non in via accessoria, scopi commemorativi. Esso è invece essenzialmente ispirato alla finalità sopra enunciata ed è quindi destinato, da un lato, a coloro che, essendo già in contatto più o meno stretto col CISE, vogliono farsi un'immagine completa, organica e precisa dello stesso, dall'altro lato, a coloro che del CISE abbiano poca o nessuna conoscenza e che da una tale conoscenza possano trarre idee per una eventuale utilizzazione di competenze: ad esempio, dirigenti e tecnici delle industrie – in particolare di quelle di medie e piccole dimensioni –, funzionari e tecnici ad ogni livello di organismi ed enti pubblici, centrali o regionali, etc..

I criteri di compilazione del volume sono stati ovviamente uniformati alla suddetta finalità. La descrizione delle attività e dei risultati più recenti ed importanti conseguiti dal CISE è stata contenuta nella misura sufficiente a fornire una dimostrazione concreta delle competenze acquisite e disponibili nei vari campi. Si è cercato inoltre di usare, fin dove lo consentiva la natura degli argomenti, un linguaggio comprensibile anche ai non specialisti e si sono fatti precedere i capitoli sugli argomenti più avanzati da nozioni introduttive. In appendice è stato predisposto un elenco di « parole-chiave », che permette una più agevole localizzazione degli argomenti trattati.

Resta da formulare l'auspicio che il volume possa realmente contribuire a realizzare quella ancor più spinta utilizzazione del grande patrimonio di competenze del CISE, che è nelle aspirazioni di tutti i responsabili e ricercatori di questo, come pure nell'interesse del Paese.

## SCHEDA DEL CISE

Ragione sociale: CISE - Centro Informazioni Studi Esperienze S.p.A.

---

Capitale sociale: 2 miliardi di lire.

---

Azionisti: ENEL (Ente Nazionale per l'Energia Elettrica); Comune di Milano (attraverso l'AEM - Azienda Elettrica Municipale).

---

Struttura organizzativa: rappresentata nell'organigramma a pag. seguente.

---

Ricavi lordi dal bilancio annuale 1976: 9,74 miliardi di lire. L'andamento dei ricavi lordi annuali dagli inizi al 1976 è rappresentato nel diagramma a pag. XIII.

---

Numero totale dei dipendenti al 31 dicembre 1976: 562, di cui 164 laureati e 150 diplomati. L'andamento degli organici del CISE dagli inizi al 1976 è rappresentato nel diagramma a pag. XIII.

---

Sede: in località Redecesio del Comune di Segrate, attigua ai confini nord-est di Milano. L'ubicazione del CISE rispetto a Milano e le vie per raggiungerlo sono indicate nella piantina a pag. XIV. Gli uffici ed i laboratori del Centro coprono complessivamente una superficie di 14.600 m<sup>2</sup>, su un'area di 80.000 m<sup>2</sup>. La planimetria della sede del CISE è riprodotta a pag. XV, mentre alcune vedute esterne dello stesso sono presentate alle pagg. XVI e XVII. Importanti impianti sperimentali del CISE sono localizzati presso la centrale termoelettrica Emilia, dell'ENEL, situata a Piacenza.

---

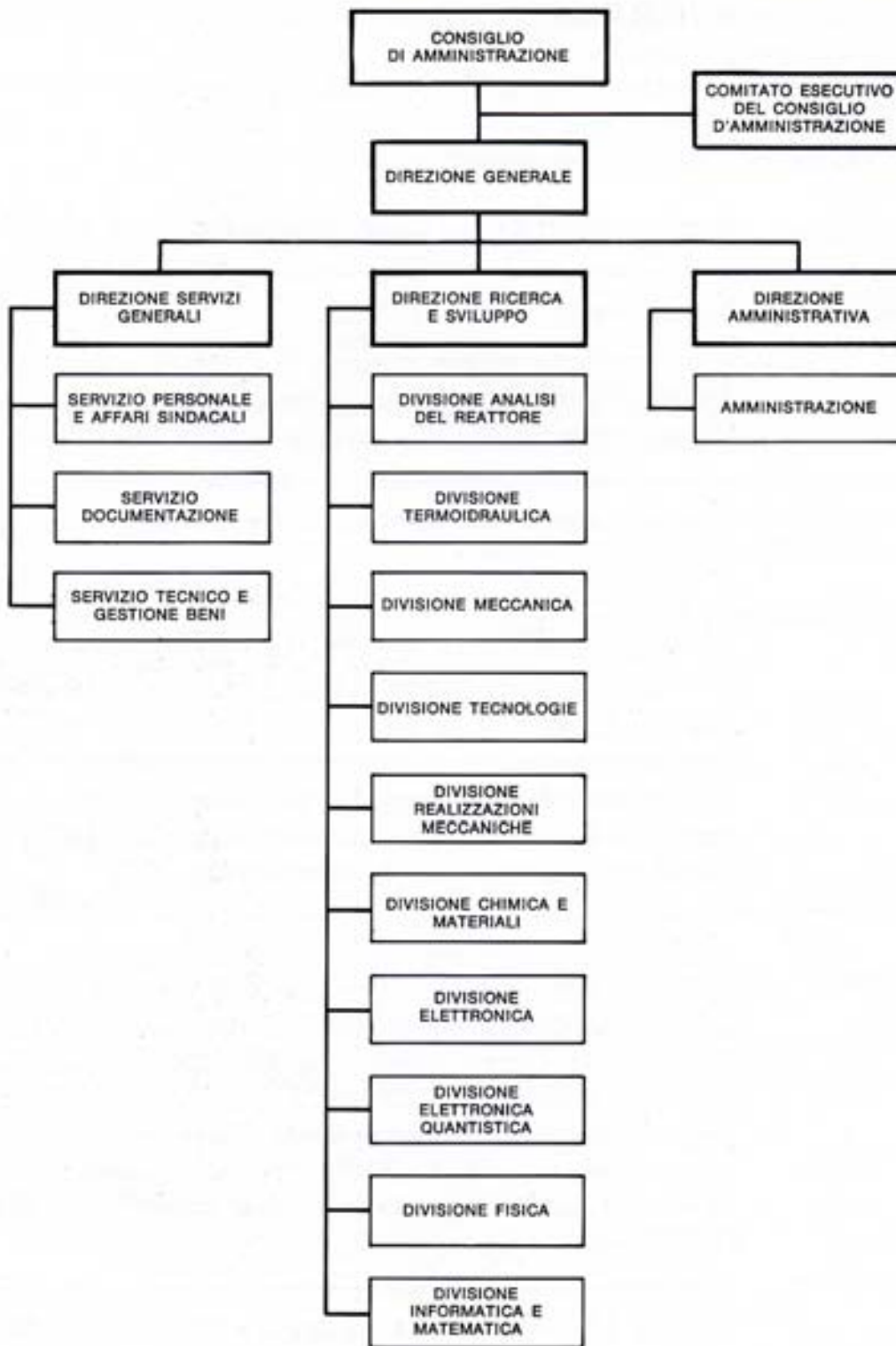
Indirizzo della sede: via Reggio Emilia - 20090 Segrate (Milano).

---

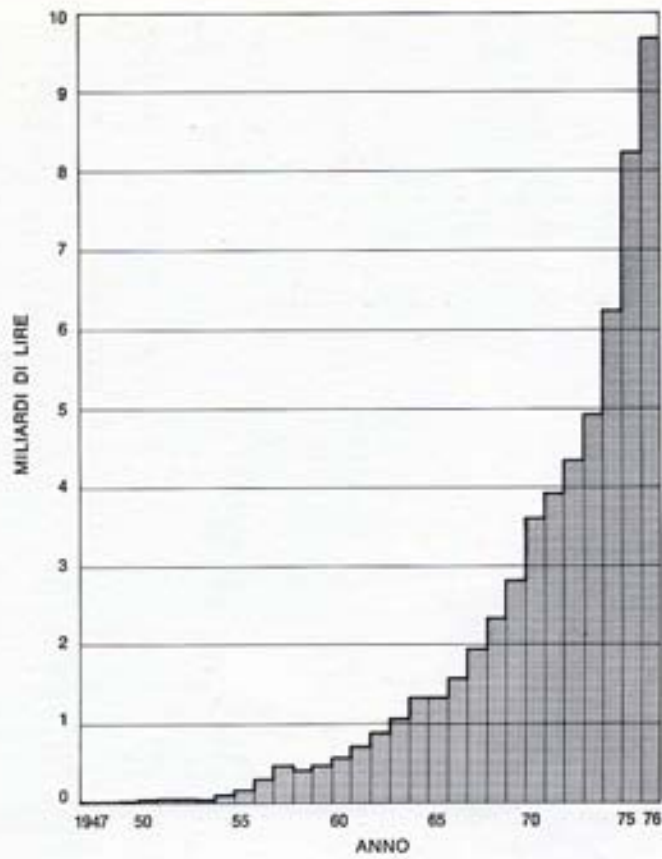
Indirizzo per la corrispondenza: Casella postale 3986 - 20100 Milano.

---

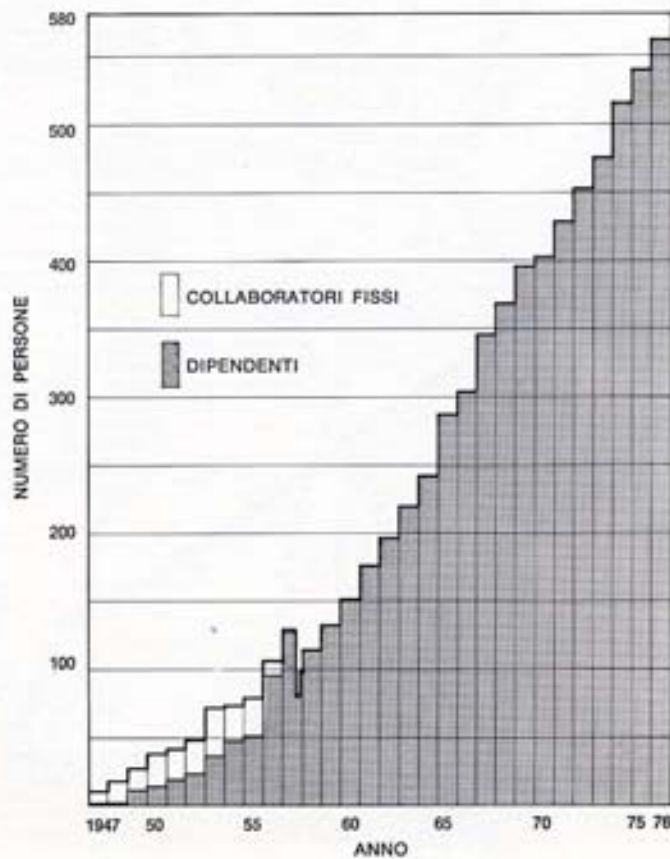
Telefono: 21.33.241 (5 linee); telegrafo: CISENERG - Milano; telex: 32643 CISENERG.



Struttura organizzativa del CISE.

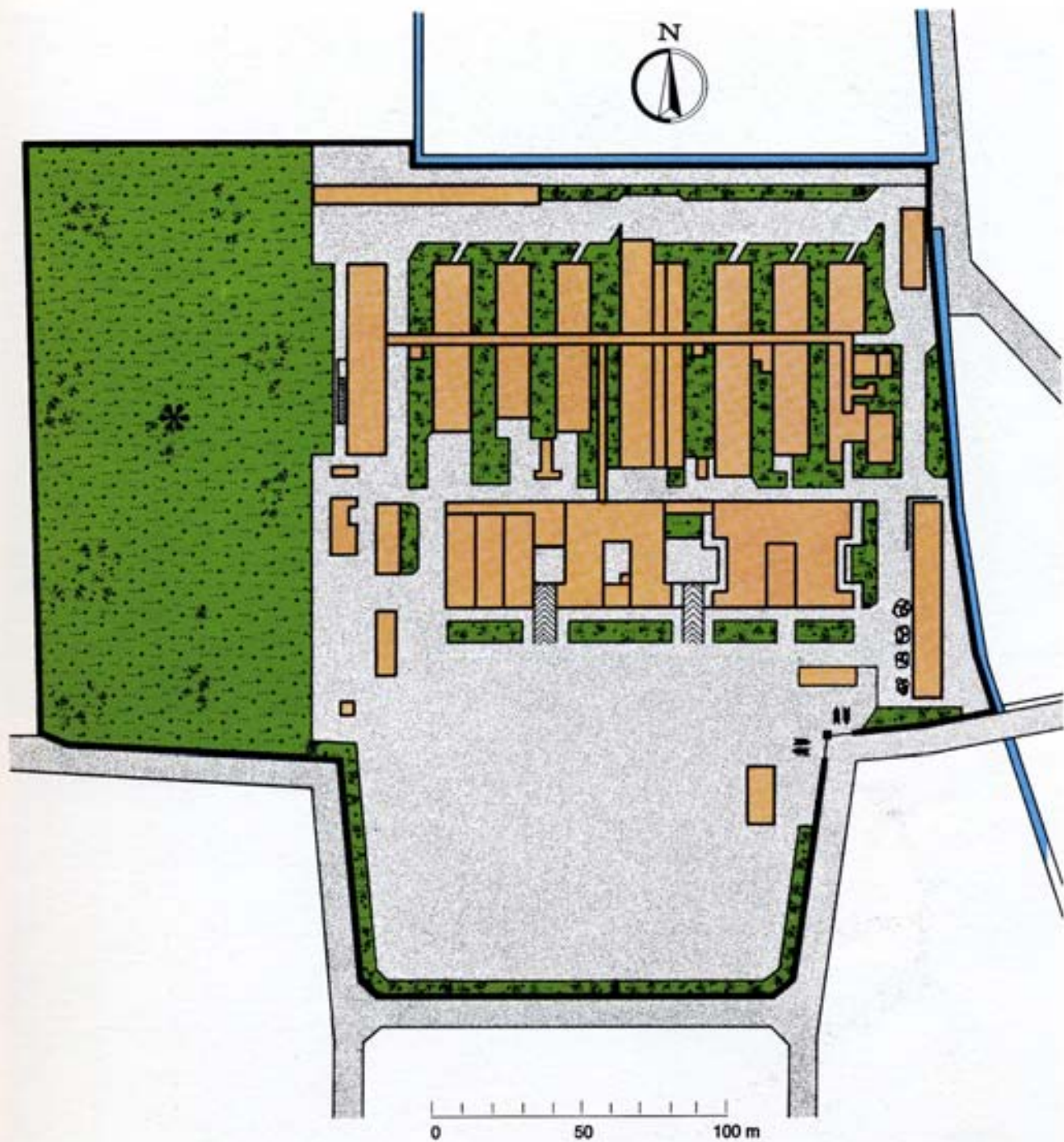


Ricavi lordi dai bilanci annuali del CISE dagli inizi al 1976.



Organici del CISE dagli inizi al 1976.

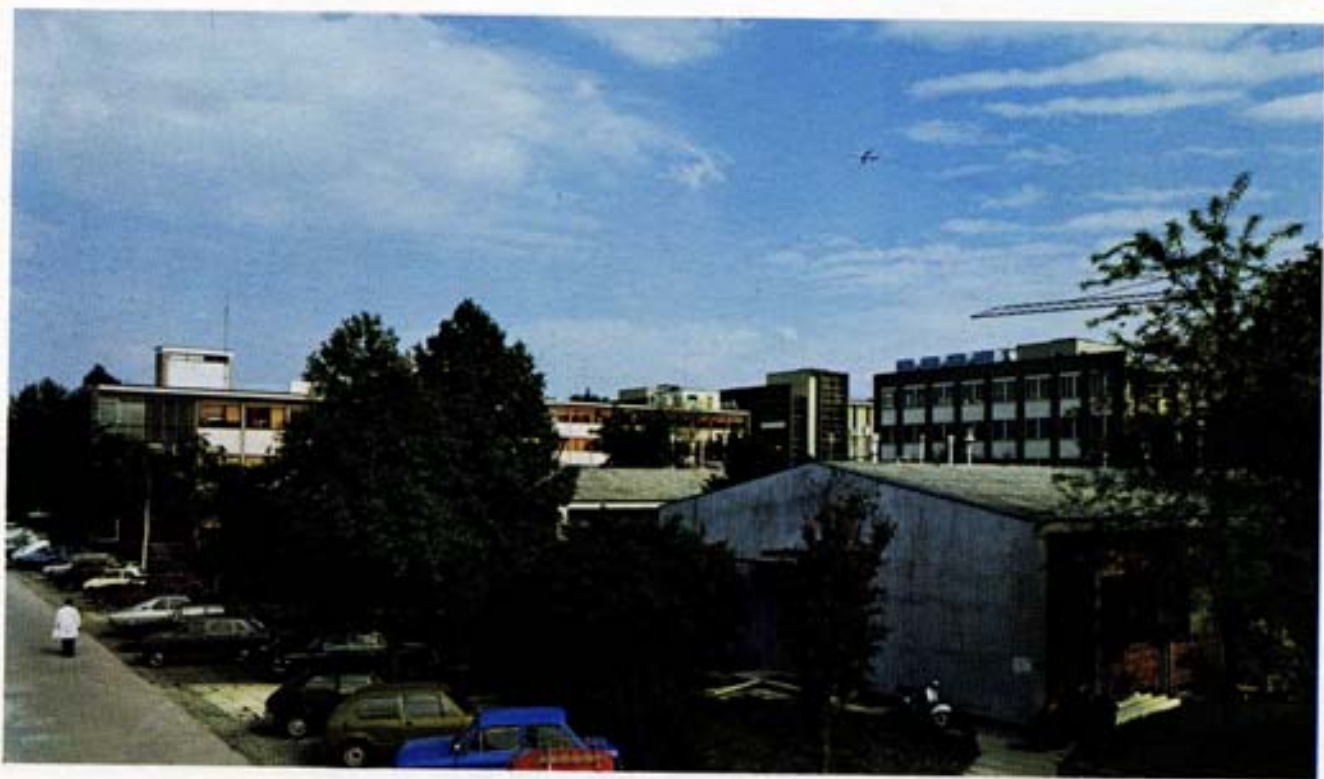




Planimetria della sede del CISE. Si distinguono le superfici coperte dai fabbricati - uffici e laboratori - (in colore beige), le vie e i piazzali interni (in grigio), nonché le zone a giardino (in verde). L'area verde a sinistra, contrassegnata con asterisco, è utilizzabile per eventuali future espansioni.



Veduta parziale del complesso edilizio del CISE (dal lato nord-est).



Veduta parziale del complesso edilizio del CISE (dal lato nord-ovest).



Veduta parziale del complesso edilizio del CISE dalla sommità della torre dell'acceleratore tandem Van de Graaff.



Veduta parziale del complesso edilizio del CISE dal tetto del fabbricato centrale (nello sfondo, la torre dell'acceleratore tandem Van de Graaff).



## CONSIDERAZIONI SUL CISE E SUL SUO SVILUPPO

Il CISE, quale balza fuori dalle pagine di questo volume, che lo descrivono nella sua complessa articolazione di programmi, competenze e attrezzature, può apparire niente più che un raffinato centro di ricerche in un vasto campo di tecnologie avanzate: e sarebbe già molto. Esso può apparire tale non solo ad un lettore affrettato e distratto, ma anche a chi, puntigliosamente inseguendo quanto più oltre è riportato, si voglia rendere conto esattamente di ciò che il CISE sarebbe in grado di compiere in determinati campi di suo eventuale interesse.

L'attività del CISE è infatti, a prima vista, di tipo disciplinare e interdisciplinare, non diversamente da quanto avviene in altri laboratori. Ma occorre prima definire il significato limitativo che l'accezione « interdisciplinare » ha acquistato nel gergo internazionale relativo ai problemi della ricerca. Interdisciplinare è definita un'attività la quale, richiedendo approfondite competenze in campi molteplici del sapere scientifico, richiede l'accostamento di specialisti, ciascuno versato in una particolare disciplina. Ma i diversi specialisti hanno bisogno di un minimo di linguaggio comune e di una conoscenza delle interrelazioni fra le singole attività disciplinari da essi portate avanti, al fine di raggiungere quella sintesi, che è pur sempre l'obbiettivo di una qualsiasi ricerca. Si deve allora dare per scontato che l'azione di coordinamento, di carattere non puramente gestionale e burocratico, sia perseguita attraverso un lavoro di gruppo. Gli uomini, tuttavia, lavorano per « gruppi » piccoli, e le unità di ricerca, in tutti i laboratori del mondo, difficilmente superano le quattro o cinque persone. Il lavoro di gruppo si traduce quindi, nella

pratica quotidiana, in una serie defaticante e spesso interminabile di riunioni, nel corso delle quali ciascuno mette al corrente gli altri dei risultati da lui raggiunti, e dove vengono prese, di comune accordo, le decisioni per l'ulteriore proseguimento delle ricerche nella direzione più proficua ai fini che si vogliono raggiungere.

Taluni laboratori operano in questo modo, perché sono nati secondo questa logica. La loro gestazione è stata relativamente breve, ed è consistita nel cercare di elaborare un « organigramma », costruito a priori individuando le diverse competenze richieste e le attrezzature necessarie. Dopo di che, valutati i mezzi finanziari necessari per l'acquisizione di beni capitali e di quelli indispensabili per l'esercizio, si è passati alla fase di selezione - nell'ambito non vasto del mercato della manodopera intellettuale scientificamente qualificata - di chi possa rispondere ai requisiti definiti in ciascuna delle scatole che compongono l'organigramma perfetto. Così, riempiti gli spazi vuoti con i nomi delle persone, magari valenti ma che non si conoscono, si pretende che la macchina si metta in moto e « produca ».

Che qualche laboratorio sia sorto in tal modo non vi è dubbio. L'evenienza è più frequente in Italia che altrove, perché in Italia più spesso che altrove si è creduto che questo fosse il modo di procedere più efficace per « guadagnare tempo »: il tempo che, nel settore della ricerca scientifica e tecnologica, l'Italia ha sempre perso, per non aver mai seriamente cercato di guadagnarlo. Accenni sul « gap tecnologico », come si usa dire con un neologismo non più freschissimo, si ritrovano addirittura negli scritti di Cavour a proposito dello sviluppo

di una rete ferroviaria italiana. La struttura di questi laboratori appare slegata e difficilmente amalgamabile. I risultati, spesso brillanti a livello individuale, lo sono meno come « lavoro di gruppo ». Se ne trae la erronea « riconferma » che gli italiani non sanno lavorare insieme, e che bisogna accontentarsi.

In realtà un laboratorio di ricerca multidisciplinare non dovrebbe sorgere in questo modo, quando se ne pretenda una crescita fisiologica. Il processo di sviluppo dovrebbe avvenire mediante l'individuazione iniziale di un obiettivo da raggiungere, attaccando poi questo obiettivo con i pochi uomini di buona volontà e di profonda competenza che si hanno sotto mano.

Così è nato il CISE. Il suo obiettivo iniziale fu la costruzione di un reattore nucleare di ricerca, di potenza zero; e questo fine condizionò fin dalle origini l'attività di coloro che per primi si accinsero a tale lavoro. Immediata fu tuttavia la constatazione che anche una macchina di quel tipo, apparentemente molto semplice, richiedeva conoscenze complesse e multiformi, alle quali nessuno era specificatamente preparato. Era quindi necessario che ciascuno attaccasse i vari problemi attraverso il travaglio del « prova e sbaglia », che, se accompagnato da una continua attività di studio, è ancora il mezzo maieutico più efficace per produrre scienziati di buona levatura. Ogni oggetto (ogni « componente », come si usa dire oggi) è infatti un sistema complesso, se guardato dall'interno: è un microcosmo, in cui sono nascoste pressoché tutte le leggi della natura, con diverso grado di importanza. A chi gli chiedeva se conoscesse bene il mondo, lo scrittore francese Bernanos rispose: « Certamente. Conosco molto bene il mio villaggio ». Lo stesso si potrebbe dire per una goccia d'acqua: chi di essa conosce tutto (il che è impossibile), può dirsi che conosca l'intero scibile umano.

Tale modo di procedere provoca uno sviluppo

del laboratorio e delle competenze assai diverso da quello che scaturirebbe da una gestazione programmata, secondo lo schema di quel tale organigramma. La base umana di partenza deve essere di qualità eccellente, e ciascuno dei primi ricercatori diviene centro di coagulazione per altri scienziati, guidandoli, facendoli lavorare e istruendoli al tempo stesso. L'esistenza di un obiettivo semplifica i processi di razionalizzazione necessari per la suddivisione dei compiti, e nello stesso tempo costringe chi lavora in questo quadro ad affrontare problemi via via più complessi e di natura diversa. La crescita di un tale laboratorio con le modalità descritte richiede che la conoscenza interdisciplinare sia già elevata a livello individuale, così che ciascuno divenga specialista in un certo settore, ma sia competente (e non solo orecchiante) in molti altri. Si scopre allora che ciò che si sta facendo ha affinità con quel che si fa in campi molto diversi, cosicché è possibile la specializzazione anche in questi altri campi, la cui visione era proibita solo da una parete di cartone, demolita la quale l'orizzonte mentale si affaccia su panorami sempre più vasti e diversi. Allora si che il lavoro di gruppo risulta estremamente semplice e richiede un impegno di tempo relativamente modesto. In altre parole, la conoscenza di base, nel singolo operatore, è molto ampia e l'interazione con altri scienziati risulta sintetica e moltiplicatrice di idee.

Sarebbe presunzione credere che il CISE, in ogni sua attività, si sia sviluppato secondo questo modello di crescita. Ma non è temerario affermare che questa è stata la regola e che le eccezioni sono giustificate dalla particolarità delle circostanze. La stessa crescita numerica del CISE, che può essere assimilata ad una sigmoide, come quella di tutte le popolazioni di esseri viventi in evoluzione, è la dimostrazione di questa sua storia passata: una crescita, che all'inizio sembra lenta, perché lo sviluppo for-

temente esponenziale delle origini è mascherato dalla piccolezza numerica degli effettivi, poi una crescita visibilmente esplosiva, cioè esponenziale; infine una crescita più controllata, di tipo lineare (che riflette l'adeguamento del laboratorio alle esigenze, crescenti sì, ma con una certa lentezza, della struttura industriale entro la quale opera).

Affinché quanto detto possa verificarsi, è necessario che sia elevata la qualità della base umana, che opera nel laboratorio. Di ciò si è già detto. Ma non sembri inutile insistervi, in tempi nei quali si fa spesso uso di locuzioni come « ricercatore », « mestiere del ricercatore », « lavoratore della ricerca » e simili (come se l'attività di ricerca richiedesse doti mediamente non diverse da quelle necessarie per svolgere qualsiasi attività umana). Ragionare in tal modo è come affermare, portando un esempio limite, che, dato un particolare addestramento, tutti gli uomini sono suscettibili di diventare degli Einstein, degli Heisenberg o dei Fermi. L'esempio va ridimensionato, se applicato alle attività degli addetti di un moderno laboratorio di ricerca, ma non è paradossale. E va sottolineato che il ricercatore deve essere, prima di tutto, uno scienziato, e che anche i suoi collaboratori a livello meno elevato, cioè i tecnici e persino gli operai, devono possedere delle qualità e delle doti di osservazione, di sintesi e di deduzione innate (o coltivate), che non sono richieste ai loro pari operanti in attività più strettamente produttive. Il « mestiere del ricercatore » si addice a quei tali laboratori costruiti sulla base di organigrammi studiati a tavolino, che non rispecchiano la realtà del vero laboratorio e in particolare quella del CISE. Appunto perché ogni oggetto rappresenta l'universo, le competenze necessarie a tutti i livelli, e la predisposizione ad osservarne la natura, sono ancor più indispensabili.

Il CISE ha avuto la fortuna, nel corso della sua esistenza, di poter dosare i propri sforzi nelle

due suddivisioni che vanno sotto la dizione di « ricerca » e « sviluppo ». Il suo grado di autofinanziamento è oggi elevato, ma esso ha potuto sempre disporre di somme da destinare a ricerche avanzate che non avevano ancora un mercato, o allo sviluppo di conoscenze di base, che sono la riserva dalla quale continuamente si estraggono le possibilità di applicazione. E se tali riserve diminuiscono o si svuotano, ecco che sono compromesse le possibilità di nuovi sviluppi o di nuovi filoni applicativi, che sono invece, nel loro divenire, l'essenza stessa del processo accumulativo del capitale (in tal caso estrinsecantesi sotto forma di capitale di natura intellettuale, non meno rilevante delle altre forme).

D'altra parte una eccessiva disponibilità di capitali « liberi » da vincoli, cioè non duramente sudati (il che al CISE non è mai avvenuto), porta senza eccezione a ricerche divergenti, nelle quali si perdono di vista i parametri economici, che pure sono un metro significativo anche nella ricerca scientifica di base; e soprattutto fa perdere il contatto con la realtà industriale del Paese. Da ciò (anche se non solo da ciò) l'accusa spesso rivolta ai laboratori italiani, da parte della nostra industria, di astrattezza e di « testa fra le nuvole », che non sempre è immeritata.

Il CISE è stato, per le modalità della sua crescita e per la struttura che di conseguenza si è data quando ha raggiunto lo stadio della maturità, un vivaio di scienziati dal quale la struttura industriale e la scuola universitaria hanno tratto, con successo e profitto, molti uomini preparati. Personalmente non mi è giunto all'orecchio alcun caso di persone, che abbiano considerato « perduto » o « sprecato » il tempo da essi trascorso al CISE, anche se le vicende della vita li hanno portati ad occuparsi di attività molto diverse. D'altra parte il CISE non ha mai deprecato questo rinnovo spontaneo dei quadri, sia perché è una delle funzioni di qualsiasi laboratorio di ricerca contribuire in que-

sto modo indiretto al progresso generale della nazione, sia perché l'avvento di forze fresche e giovani impedisce l'invecchiamento del corpo operante e costringe anche chi è ormai lontano dagli anni della scuola a tenersi aggiornato, per poter guidare, con la stessa autorevolezza, cioè con la stessa credibilità, le nuove leve. Non è azzardato affermare che tutto il personale del CISE è sottoposto ad un invisibile processo di autoaggiornamento permanente, che scaturisce come elementare esigenza dalle attività in cui ciascuno è portato ad operare. Il ricercatore è spesso costretto (talvolta con suo iniziale disappunto, salvo a riconoscerne criticamente il vantaggio dopo riflessione) a cambiare problema e magari « mestiere », anche se la parola è la meno adatta a definire il passaggio da un tipo di attività intellettuale all'altra.

Sono quindi gli obiettivi, che via via il CISE si è prefisso o che ad esso sono stati assegnati, che ne hanno determinato, senza condizionarla, la struttura attuale. La quale va vista anche essa in modo dinamico, cioè pronta ad essere modificata, se una migliore corrisponde ad un più efficace sfruttamento delle sue competenze. Queste sono oggi assai ampie e articolate. A livello di ricerca avanzata è più facile ricordare quelle in cui il CISE non si è ancora cimentato, piuttosto che il contrario. Il CISE non si è occupato, per es., di motoristica e di problemi aeronautici, né ha avuto occasione di lavorare, se non sporadicamente, nel campo, invero vastissimo, della chimica organica. Ma in molti altri rami della tecnologia è difficile trovare, aiutandosi con la lunga lista delle sue pubblicazioni, argomenti che i ricercatori del CISE non abbiano almeno sfiorato.

Tutto questo patrimonio è oggi largamente utilizzato dai grandi complessi industriali, quando ciò corrisponda alle loro esigenze e non risulti per loro conveniente sviluppare certe competenze scientifiche specifiche al loro interno:

perché lo scibile è vasto, e le competenze non si acquistano in un giorno. Meno frequente, anzi sporadica, è l'utilizzazione di questa miniera di conoscenze da parte dell'industria media e piccola. Eppure è mia convinzione che, in moltissimi casi, anche l'industria manifatturiera, in particolare quella leggera, potrebbe beneficiarne in misura notevole. A questo impiego è di ostacolo, spesso, il fattore economico: il costo della ricerca. Non c'è dubbio che la ricerca non è gratuita, e il suo utilizzo è sempre il frutto di un'analisi fra costi e benefici. Tuttavia l'ostacolo maggiore è di carattere psicologico. Fin che la ricerca viene vista come qualcosa di estraneo al processo produttivo, come un lusso di dubbia utilità, da rimandare a tempi migliori, si troverà che i tempi sono sempre peggiori e quelli migliori non vengono mai. Sfogliando le cronache economiche dell'ultimo secolo non si trova anno che sia definito buono o soddisfacente. Eppure a distanza di tempo, magari di alcune decadi, si rileva che quel tale periodo è stato economicamente assai proficuo. L'ottica vicina, come quella di colui che si trova a dieci centimetri da una immensa lavagna, deforma le immagini e impedisce di vedere il quadro d'insieme. A parte ciò, il costo della ricerca va considerato come un costo capitale, da introdurre nella valutazione del costo finale del prodotto, tenendo conto anche della sua obsolescenza, cioè della sua caducità. La ricerca applicata nell'industria manifatturiera, quando non serve alla creazione di nuovi prodotti, serve a controbattere il processo di invecchiamento, che in ogni oggetto comincia dal suo nascere.

La lettura di questo volume descrittivo deve perciò essere compiuta avendo in mente la natura stessa del CISE: è opportuno non limitarsi a leggere i paragrafi di più diretto interesse, ma allargare la visione anche a ciò che ne è lontano. Può allora succedere di trovare che talune ricerche, trasportate da un campo all'altro, po-

trebbero essere proficuamente adattate ad altre circostanze. E soprattutto si invitano i lettori a visitare il CISE, a vedere come i suoi scienziati e ricercatori operano, a osservare come sono affrontati nella pratica quotidiana i moltissimi problemi oggi allo studio.

Il processo di riconversione industriale che l'Italia si accinge ad affrontare, indipendentemente dai mezzi con cui esso verrà conseguito, consiste in definitiva nella riqualificazione più o meno spinta della produzione, per rendere i beni e i servizi italiani nuovamente competi-

tivi, laddove la competitività è andata perduta, o più competitivi, per conquistare nuovi mercati di esportazione, con i cui proventi è possibile acquistare ciò che all'Italia è necessario per vivere e sopravvivere. Nell'aiutare questa opera di riqualificazione della nostra industria, il CISE può svolgere una parte non trascurabile. E sarebbe questo l'ultimo servizio, in ordine di tempo, che esso renderebbe al nostro Paese attraverso l'opera di coloro che vi lavorano con affezionata dedizione.

*Mario Silvestri*

Il Prof. Mario Silvestri, ora consulente del CISE, è stato uno dei promotori della fondazione di questo Centro e ne ha diretto le attività nel campo dell'ingegneria nucleare fino

al 1967. A lui si deve, tra l'altro, l'avvio del programma di sviluppo del concetto del reattore nucleare CIRENE (di cui si parla ampiamente in questo volume).

## UNO SGUARDO SULLA STORIA, SUL PRESENTE E SULLE PROSPETTIVE DEL CISE

### Cenni storici

Il CISE fu fondato nel 1946 a Milano come società a responsabilità limitata senza fini di lucro, per iniziativa di un ristretto gruppo di ricercatori provenienti da alcuni Istituti Universitari e da grandi società industriali, con il supporto finanziario di queste ultime. Scopo originario di questa iniziativa era essenzialmente quello di raccogliere la scarsa documentazione allora disponibile sull'energia nucleare ed avviare ricerche preliminari connesse con tale nuova forma di energia, in vista delle sue prevedibili applicazioni per usi non militari. Da quel piccolo ma vitale nucleo quale era all'inizio, il CISE andò gradualmente sviluppandosi fino ad assumere la fisionomia di un vero e proprio centro di ricerche multidisciplinari. Attivo dapprima nei settori della fisica nucleare e dell'elettronica, esso si interessò ben presto anche della chimica dell'uranio, della separazione dell'acqua pesante (ossido di deuterio), e successivamente di argomenti di tecnologia ed ingegneria dei reattori nucleari, nonché di chimica nucleare e radiochimica. La storia dello sviluppo del CISE può grosso modo suddividersi in due periodi abbastanza ben definiti, separati da una breve fase di transizione. Il primo coincide col decennio 1947-1957, durante il quale il Centro rappresentò per l'Italia l'unico istituto organizzato di ricerca in campo nucleare, raggiungendo gradualmente, alla fine, una consistenza apprezzabile (con un organico intorno a 100 unità). Esso costituì anche, dal 1952 al 1957, la base operativa scientifico-tecnica cui si appoggiò il Comitato Nazionale per le Ricerche Nucleari (CNRN), istituito nel 1952.

Al termine del decennio si annoveravano tra le realizzazioni più salienti del CISE: un acceleratore Cockroft & Walton da 400 keV, con annesso spettrometro a tempo di volo (mediante il quale si misurarono le sezioni d'urto totali dell'uranio e di altri nuclidi ed i tempi di diffusione dei neutroni in acqua, ottenendo risultati in accordo con quelli già ottenuti negli Stati Uniti, ma resi di pubblico dominio solo in epoca successiva); un impianto elettrolitico su scala di laboratorio per la concentrazione dell'acqua pesante (fino al 99,8% in deuterio, partendo da acqua preconcentrata al 2%); un impianto chimico, pure su scala di laboratorio, per la purificazione dei sali di uranio e la produzione di uranio metallico mediante riduzione del tetrafluoruro di uranio con calcio. Per conto del CNRN furono anche sviluppati in quel periodo studi di progetto di un reattore da ricerca ad uranio naturale e ad acqua pesante, destinato al Centro di Ispra, studi che vennero poi accantonati, in quanto il CNRN decise l'acquisto negli S.U., con un contributo finanziario del governo americano, di un analogo e già collaudato reattore (CP-5).

Dal 1957 al 1960 il CISE attraversò una fase di transizione, all'inizio della quale subì un ridimensionamento dei propri organici in quanto, a seguito della decisione del CNRN di costituire gruppi operativi suoi propri, un consistente numero di suoi ricercatori passò alle dipendenze di questo Ente. Ben presto, tuttavia, gli organici del CISE vennero ripristinati al livello precedente e ripresero poi a crescere ulteriormente. Nel frattempo veniva realizzato, ad opera di una delle società finanziatrici (Edisonvolta), una nuova, unitaria e razionale

sede del Centro, in luogo di quelle preesistenti, che potevano dirsi di fortuna, anche se utilizzate per una quindicina d'anni. Durante la stessa fase ebbe luogo l'avvio di quelle ricerche di base sull'estrazione del calore mediante miscela acqua-vapore dai reattori nucleari, che sfociarono, alcuni anni più tardi, in un vero e proprio programma di ricerca e sviluppo di un reattore (CIRENE: CISE REattore a NEbbia), fondato appunto sull'impiego di tale fluido quale termovettore (v. par. 5.2). Le ricerche di base furono ben presto finanziate, per un triennio, nell'ambito della collaborazione allora in corso tra l'Euratom e l'U.S. Atomic Energy Commission. In quegli anni fu anche avviata la realizzazione di un acceleratore Van de Graaff da 3 MeV (per protoni), che venne completato nel 1961; furono sviluppati strumenti analizzatori di forme d'onda impulsive (classificatori di ampiezza di impulsi, misuratori di tempi dell'ordine dei nanosecondi), che furono anche oggetto di alcuni brevetti ed applicazioni industriali; venne realizzato un impianto per la separazione isotopica dell'ossigeno-18. Il 1960 può considerarsi l'inizio del secondo periodo di vita del CISE, periodo che vede il Centro consolidarsi ed espandersi con regolarità e continuità. Particolarmente determinante per tale espansione fu l'impulso dato alle attività di ricerca e sviluppo sul reattore CIRENE, il cui concetto ebbe sanzione ufficiale nel 1963 con il varo del programma omonimo, finanziato nel quadro di un'associazione Euratom-CNEN (Comitato Nazionale per l'Energia Nucleare, ex CNRN).

Nel 1964, a seguito della costituzione dell'Ente Nazionale per l'Energia Elettrica (ENEL), le quote sociali del CISE furono quasi totalmente rilevate da tale Ente. Il programma CIRENE venne finanziato congiuntamente dall'Euratom e dal CNEN fino al 1967. In quel periodo il CISE si impegnò a fondo nelle ricerche termoidrauliche, neutroniche, tecnologiche e ingegneristiche, come pure nello sviluppo di tec-

niche ed impianti sperimentali, relativi al programma CIRENE. La sperimentazione termoidraulica, in particolare, produsse risultati apprezzati e utilizzati anche all'estero, specie in Canada e in Gran Bretagna, Paesi impegnati - tra l'altro - in programmi di sviluppo di reattori di concezione affine al CIRENE. Per tale sperimentazione vennero realizzati alcuni impianti, uno dei quali (IETI-3, Impianto Esperienze Termoidrauliche-3), con potenza di picco di 7,5 MW (5,5 MW in servizio continuo), risultò tra i più importanti del genere esistenti nel mondo. Tali impianti vennero installati presso la Centrale termoelettrica Emilia dell'ENEL, situata a Piacenza.

Sono anche da menzionare: le prove in reattore per lo studio del comportamento di materiali e combustibili nucleari sotto irraggiamento, condotte con due circuiti di cui il maggiore (CART, CIRENE Assembly Reactor Test), della potenza massima complessiva di 1500 kW, venne installato nel reattore ESSOR del Centro Euratom di Ispra; le esperienze di fisica del reattore, in particolare quelle « integrali » (misure di buckling, di coefficiente di moltiplicazione infinito), svolte sul reattore Aquilon-2 di Saclay (Francia). In quel periodo venne anche avviato il lavoro di trasformazione dell'acceleratore Van de Graaff da 3 MeV in Tandem da 7 MeV (per protoni).

Nel 1967, ritiratosi l'Euratom dal Programma CIRENE per difficoltà finanziarie, il CNEN se ne addossò l'intero onere per la ricerca e sviluppo, inserendolo tra i massimi programmi tecnologici nazionali e continuando ad affidarne la parte essenziale al CISE. Al tempo stesso l'ENEL e il CNEN pervenivano alla decisione di realizzare congiuntamente un reattore CIRENE di piccola potenza (40 MW elettrici), inteso come prototipo per l'eventuale sviluppo di centrali di potenza CIRENE su scala commerciale. Ebbe così inizio, accanto all'attività di ricerca e sviluppo svolta dal CISE per conto del CNEN, il lavoro di progetta-

zione vero e proprio, al quale il Centro diede un contributo essenziale attraverso un proprio gruppo distaccato a Roma in seno ad una unità ad hoc istituita dall'ENEL.

Negli anni sessanta si svilupparono gradualmente altre importanti attività sia nel campo della tecnologia e strumentazione elettronica ed elettroottica, nonché dell'elettronica quantistica e dei laser, con il parziale supporto finanziario del CNR (Consiglio Nazionale delle Ricerche), sia nel campo della tecnologia dei materiali e degli impianti, tradizionali e nucleari, nonché degli studi ambientali, su commesse dello stesso ENEL. Tali attività sono state costantemente indirizzate lungo certe linee fondamentali che sono essenzialmente valide tuttora: essendo ancor oggi in pieno sviluppo, esse vengono citate più in dettaglio nel paragrafo successivo, dedicato ai programmi attuali.

Le attività fin qui ricordate sono state affiancate da una ricerca di base, di cui gli argomenti più meritevoli di menzione sono: lo sviluppo di un nuovo metodo per realizzare fasci di protoni polarizzati, largamente utilizzato all'estero nella costruzione di acceleratori; gli studi sull'evaporazione nucleare e gli esperimenti, primi in campo internazionale, sulle fluttuazioni della sezione d'urto di reazioni nucleari; le misure, prime in Italia, di effetti delle radiazioni sui materiali; gli studi sulla struttura elettronica e sulle proprietà magnetiche di metalli e leghe; l'analisi dei meccanismi di diffusione intermetallica; l'approfondimento dei presupposti teorici delle misure elettroniche di tempo e di ampiezza basate su metodi statistici; lo studio delle proprietà di coerenza del campo elettromagnetico mediante l'analisi della statistica dei fotoelettroni; la prima teoria della propagazione risonante di radiazione elettromagnetica, etc.

A conclusione di questi cenni storici non è fuori luogo ricordare che il CISE, oltre che con i risultati della sua attività, ha reso impor-

tanti servizi alla collettività nazionale anche sotto due altri aspetti. In primo luogo, ogni qualvolta si sono presentate nell'ambito nazionale esigenze di costituzione o potenziamento dei quadri in determinati settori della ricerca e dell'industria nucleare, è stato possibile soddisfarle anche attingendo al CISE non trascurabili quote dei suoi più qualificati effettivi. Nonostante ciò, quest'ultimo ha potuto ugualmente mantenere, con la continua assimilazione di energie nuove e l'avvicendamento interno dei ruoli, un ritmo di espansione quasi costante ed un eccellente livello qualitativo dei propri organici, che superano ora le 560 unità (contro le 100 di venti anni addietro).

In secondo luogo, il CISE ha dato sempre un contributo di attività alla scuola italiana (Istituti universitari e medi), sia attraverso i corsi tenuti dai propri liberi docenti ed esperti, sia offrendo a laureandi la possibilità di svolgere tesi teoriche o sperimentali presso i propri laboratori.

### **I programmi attuali**

Nel 1976 un importante cambiamento statutario ha contrassegnato la vita del CISE: da Società a responsabilità limitata, qual era fin dall'inizio, esso ha assunto la veste giuridica di Società per Azioni, più adeguata alle sue dimensioni ed alla sua consistenza patrimoniale. Oggi vediamo il CISE impegnato in una serie di programmi alquanto differenziati ed articolati: infatti le competenze acquisite nelle varie branche principali e collaterali dell'attività originaria hanno generato via via nuove attività, sia pure sempre nel quadro del dettato statutario, che, nella sua più recente formulazione, recita:

« Art. 4 - La Società ha per oggetto di promuovere ed eseguire ricerca scientifica pura ed applicata. A tale scopo essa potrà effettuare studi, progetti e sperimentazioni in qualsiasi campo; in particolare in quelli della fisica, della



chimica, dell'elettronica, della tecnologia e dell'ingegneria, relativamente alla soluzione dei problemi dell'energia, per usi civili ed industriali, con particolare riguardo a quelli dell'energia nucleare . . . ».

La politica programmatica del Centro, specie dopo il primo decennio di attività, ha costantemente mirato a conciliare le esigenze di spontaneità della ricerca con la necessità di realizzare il massimo grado di autonomia finanziaria, il che è possibile solo armonizzando i programmi con gli effettivi « fabbisogni » di nuove tecnologie, attuali o prevedibili, del Paese, così da poterne fare l'oggetto di commesse di ricerca. Il grado di autonomia attualmente raggiunto è assai elevato (intorno al 70%), ed infatti l'attività del CISE si svolge ormai prevalentemente su commesse per conto di altri Enti: principalmente il CNEN, l'ENEL stesso ed il CNR, poi numerose industrie, ed infine l'Euratom.

Per conto del CNEN, le attività del CISE riguardano in primo luogo il programma di ricerca e sviluppo CIRENE, cui si sono aggiunte ricerche sui reattori ad acqua leggera. Tra i principali filoni dell'attività attuale nell'ambito CIRENE citiamo gli studi e la sperimentazione sulla termoidraulica delle miscele acqua-vapore, con particolare riguardo ai problemi di sicurezza; gli studi sulla fisica dei reattori ad acqua pesante ed in particolare lo sviluppo di programmi di calcolo neutronici e termoidraulici; le esperienze sugli effetti di eventi limite, quale la rottura del tubo a pressione dei canali di potenza; le prove sul comportamento tecnologico del combustibile (in reattore e fuori reattore), sia in condizioni operative che in condizioni d'incidente, etc.

Tra le attrezzature impiegate, tutte progettate e realizzate dal CISE, citiamo: gli impianti di Piacenza per la sperimentazione termoidraulica (IETI-1, REM-Raffreddamento EMergenza, IETI-4 - che ha recentemente sostituito il già citato IETI-3 -, CIRCE - CIRENE Reac-

tor Circuit Experiment), che rappresentano un complesso di rilevante importanza nel suo genere su scala mondiale; l'impianto CART-TC (CART-Twin Channel), per le prove di irraggiamento del combustibile, derivato dal raddoppio del succitato CART nel reattore ESSOR di Ispra; le sezioni di prova a piena scala, la strumentazione e i dispositivi speciali per la termoidraulica; le attrezzature speciali per esperienze di irraggiamento e per controlli non distruttivi in reattore, etc.

In parallelo al programma CIRENE, e sempre per conto del CNEN, le competenze e le attrezzature acquisite sono utilizzate - come si è detto - anche per analoghe ricerche sui reattori ad acqua leggera, con particolare riguardo ai problemi di sicurezza ed al comportamento termoidraulico dei noccioli di tali reattori.

Alla ricerca e sviluppo sui vari problemi neutronici, termoidraulici, meccanici, tecnologici del progetto CIRENE ancora aperti, si aggiunge l'attività di appoggio alla progettazione esecutiva del prototipo per conto della NIRA (Nucleare Italiana Reattori Avanzati), società di Genova incaricata della costruzione dello stesso.

Per l'ENEL il CISE si muove lungo linee dirette a soddisfare le molteplici esigenze di questo ente quale produttore di energia elettrica da fonte sia tradizionale che nucleare. Si possono citare: le ricerche riguardanti i materiali strutturali per impianti elettrici, sia termici che nucleari; lo sviluppo di tecniche di diagnostica e sorveglianza di componenti di impianti; le ricerche di chimica analitica, chimica-fisica e radiochimica applicata ai problemi ambientali; la messa a punto di programmi di calcolo di interesse per la progettazione del nocciolo e per l'esercizio di reattori tipo BWR; le ricerche sugli effetti degli scarichi termici nell'ambiente ad opera degli impianti elettrici; l'applicazione del laser alla misura a distanza della contaminazione atmosferica; lo sviluppo del metodo degli elementi finiti per calcoli strut-

turali e meccanici; le esperienze di fattibilità di misure di vibrazione di strutture con laser nell'infrarosso; gli studi sull'applicazione dell'olografia e dell'interferometria a luce diffusa all'analisi di spostamenti e vibrazioni di strutture; lo studio di tecniche di telecomunicazione a breve distanza in fibra ottica; gli studi sui materiali superconduttori in connessione con i problemi di produzione e trasporto di grandi quantità di energia, etc..

L'attività patrocinata dal CNR tende essenzialmente allo studio e messa a punto di materiali, dispositivi e strumenti prototipi per un eventuale sviluppo degli stessi sul piano commerciale da parte dell'industria elettronica nazionale. Buona parte dell'attività in questo campo rientra nell'ambito di una commessa pluriennale CISE-CNR per la Tecnologia e Strumentazione Elettronica. Ricordiamo tra i vari argomenti studiati: nel campo dei materiali, la crescita e la caratterizzazione di materiali semiconduttori speciali, nonché di cristalli elettroottici; nel campo dei dispositivi, i diodi ad effetto Gunn ed i transistori ad effetto di campo per generazione di microonde, i laser a semiconduttore emettitori nel vicino infrarosso, i rivelatori a semiconduttore per il medio e lontano infrarosso, le celle solari; nel campo della strumentazione, gli studi biomedici (elettrocardiografo rapido a 240 sonde; misuratore della velocità del sangue con metodo non intrusivo), gli oscillatori per microonde, lo studio di un sistema per migliorare la visibilità attraverso la nebbia, telemetri ad alta precisione per misure di distanze di interesse topografico e geodetico, lo sviluppo di sorgenti laser (a gas, a stato solido, accordabili in frequenza) in vista di applicazioni alle lavorazioni meccaniche, alla fotochimica e alla separazione isotopica, al rilievo a distanza della contaminazione atmosferica; nel campo dei sistemi, lo studio dei sistemi non lineari, etc.. Altre attività patrocinate dal CNR riguardano

rispettivamente lo studio di fattibilità di un laser a raggi X e lo studio di fenomeni cooperativi nei fluidi con i metodi di analisi delle proprietà statistiche della radiazione laser.

Altri Enti italiani per conto dei quali sono state svolte attività di ricerca dal CISE sono stati l'INFN (Istituto Nazionale di Fisica Nucleare), l'ISPE (Istituto di Studi per la Programmazione Economica), il Ministero della Difesa, etc..

Tra le industrie per conto delle quali il CISE svolge o ha svolto attività di ricerca, si citano (trascorrendo per brevità i relativi argomenti): per l'Italia (oltre alla già citata NIRA), il Consorzio NUCLITAL, l'Ansaldo Soc. Gen. Elettromeccanica, l'AMN Impianti Termici e Nucleari, la PMN (Progettazioni Meccaniche Nucleari), la FIAT, la Montedison, la Carlo Erba, la Falk, la Breda Termomeccanica, la Franco Tosi, la Belleli Industrie Meccaniche, la Selenia, la LABEN, la SNIA, la SIAI Lericci, l'Elettronica SPA; per l'estero, la General Electric (S.U.) e l'ente canadese AECL (Atomic Energy of Canada Ltd.).

Infine, per conto dell'Euratom, nel quadro del potenziamento del reattore ESSOR di Ispra, il CISE è stato interessato alla realizzazione di un impianto per esperienze di irraggiamento di combustibile per reattori ad acqua leggera. Tra le attività non su commessa, la più cospicua è quella che ha portato al completamento della realizzazione dell'acceleratore Tandem Van de Graaff da 7 MeV (per protoni), già ricordato.

Queste citazioni sulle presenti attività del CISE non hanno alcuna pretesa di completezza; il loro scopo è solo quello di fornire un'approssimata visione d'insieme dei settori in cui il Centro è impegnato e, mediante questa, stimolare i potenziali interessati ad approfondire maggiormente, attraverso i successivi capitoli, la conoscenza delle competenze del CISE, che rientrano essenzialmente nei seguenti campi:

*Realizzazioni costruttive e tecnologiche*: impianti e loro infrastrutture; componenti sperimentali; gestione di grossi impianti (con particolare riferimento a quelli in reattore); studi di interesse tecnologico;

*Ingegneria*: sperimentazioni nell'ambito di processi e sistemi ingegneristici e messa a punto dei relativi metodi di calcolo; studi di progetto nel campo neutronico, termoidraulico e meccanico; sorveglianza degli impianti in esercizio e premonizione dei guasti;

*Fisica ed elettronica*: studio, messa a punto e sviluppo di processi, componenti e sistemi fondati su principi e metodologie fisici ed elettronici; studio, produzione e trattamento dei materiali per i suddetti componenti e sistemi, o per la messa a punto dei suddetti processi; applicazioni di interesse industriale dei componenti, sistemi e processi sopra definiti;

*Chimica e materiali*: determinazione delle proprietà chimiche, fisiche e meccaniche di materiali e sostanze di interesse tecnologico; aggiornamento delle tecniche, dei metodi, delle apparecchiature e degli strumenti attinenti ai processi chimici e radiochimici, ai materiali di interesse tecnologico, ai problemi di ecologia;

*Ambiente*: campagne di misure ambientali in sistemi terrestri ed acquatici per la scelta dei siti destinati ad impianti, anche nucleari.

## **Prospettive**

Nel futuro a breve e a medio termine le direttrici dell'attività del CISE possono delinearasi come segue. Nel settore degli impianti nucleari il Centro punta all'ulteriore sviluppo delle conoscenze sulla sicurezza e sulla tecnologia dei principali tipi di reattori. Sono anche prevedibili, ed in parte già avviate, attività dirette a fornire contributi nello sviluppo di fonti energetiche alternative (energia solare e geotermica) e di sistemi meccanici di accumulazione energetica (volani).

Un argomento suscettibile di ulteriore note-

vole sviluppo al CISE è quello della sorveglianza degli impianti di produzione di energia elettrica in esercizio e della rilevazione dei guasti al loro primo manifestarsi: argomento, questo, di primaria importanza, com'è ovvio, specie per quanto riguarda gli impianti nucleari.

Altra attività di cui è prevedibile una forte espansione è data dallo sviluppo sistematico dei rilievi radioecologici per la caratterizzazione dei siti degli impianti nucleari, come pure dei metodi di controllo delle condizioni ambientali e dell'impatto sull'ambiente di attività industriali, in particolare di quelle relative alla produzione di energia elettrica.

Grande impulso sarà dato allo sviluppo delle tecniche elettroniche, elettroottiche e laser ed alle loro applicazioni alla soluzione di problemi sia tecnologici che ecologici; ad esempio: sviluppo di celle solari, comunicazioni su fibre ottiche, misure di spostamenti e vibrazioni con tecniche olografiche e di interferometria a luce diffusa, misura a distanza della contaminazione atmosferica, sviluppo di sorgenti laser per lavorazioni meccaniche, misure di proprietà chimico-fisiche di fluidi con tecniche di diffusione di luce laser, etc..

L'acceleratore Tandem Van de Graaff potrà essere utilizzato per studi sui danni da radiazione ai materiali, per analisi speciali mediante fluorescenza X, etc.. Altre competenze suscettibili di applicazioni di interesse industriale sono, ad es., quelle sui materiali superconduttori, sugli strati sottili, sulla progettazione di apparecchiature ad altissima pressione idrostatica (decine di kbar).

Infine, l'esperienza acquisita in passato dal CISE nel campo della separazione isotopica potrebbe essere riutilizzata nell'ambito di programmi nazionali o europei. Oltre a ciò si prevede che il CISE darà contributi nuovi in questo campo attraverso lo sviluppo di sorgenti laser utilizzabili per processi di fotodissociazione selettiva.

## Publicazioni e varie

### Publicazioni interne

Le pubblicazioni del CISE sono essenzialmente di due tipi. I resoconti dei lavori svolti su commessa, e di cui è proprietario l'Ente committente (CNEL, ENEL, etc.), vengono editi sotto forma di documenti interni, che prendono, a seconda dei casi, il nome di Rapporto, Relazione Tecnica, Nota Tecnica. Tali documenti sono assoggettati - permanentemente o per un periodo limitato - a regime di riservatezza e possono essere resi di pubblico dominio o accessibili a terzi solo con il benestare dei committenti. Un certo numero di Rapporti appartiene ad una serie speciale, esente da tali restrizioni.

I lavori non svolti su commessa, o svolti con

il supporto del CNR, vengono di preferenza pubblicati sotto forma di articoli su riviste tecniche o scientifiche, italiane e straniere, oppure vengono presentati a Congressi sotto forma di memorie.

Dalle origini del CISE ad oggi sono stati emessi circa 600 Rapporti, ed altrettanti documenti interni di altro tipo; circa 1100 sono gli articoli apparsi su riviste, mentre le memorie presentate ai Congressi ammontano a diverse centinaia.

L'elenco delle pubblicazioni disponibili può essere richiesto al Servizio Documentazione del CISE.

### La rivista *Energia Nucleare*

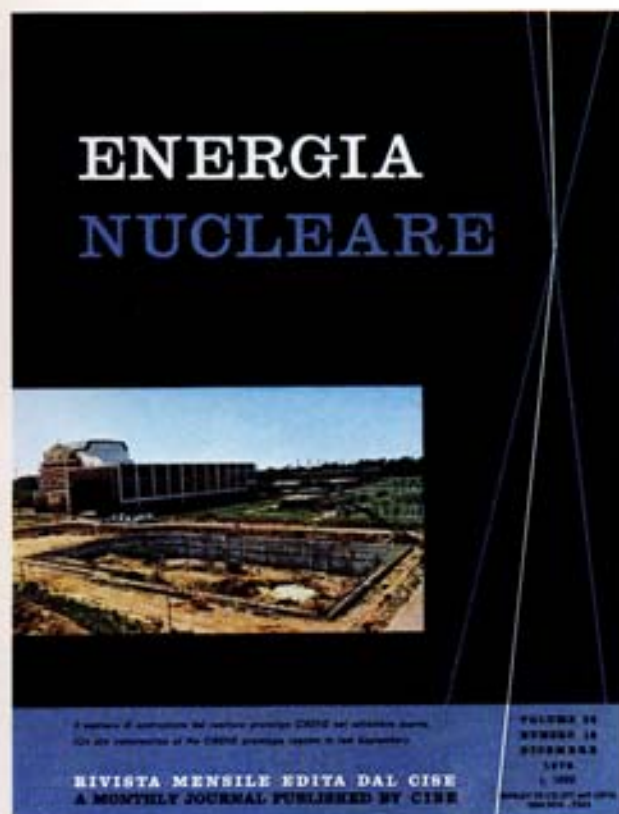
Il CISE è presente anche nel settore dell'editoria scientifica con la rivista mensile *Energia Nucleare* (v. fig. a fianco), la cui fondazione risale al 1951. Vi appaiono lavori scientifici ed articoli di rassegna a firma di ricercatori ed esperti non solo del Centro, ma di qualsiasi altra provenienza. Un Comitato di « referees » garantisce la validità scientifica dei lavori pubblicati. Completano la Rivista una rubrica di notizie sugli eventi più importanti in campo tecnico ed economico nel settore nucleare ed una di recensioni di novità librarie.

Parte dei lavori scientifici viene pubblicata in inglese, il che favorisce la circolazione della Rivista anche all'estero (che è dello stesso ordine di grandezza di quella in Italia).

*Energia Nucleare* viene distribuita in abbonamento. Essa è anche un ottimo mezzo di promozione pubblicitaria, di cui si avvale una clientela industriale altamente qualificata.

### La biblioteca

La biblioteca del CISE (v. fig. a pag. XXXII) è utilizzata di norma dai dipendenti del Centro, ma possono essere autorizzati ad accedervi anche ricercatori non dipendenti, come pure do-



Copertina di un numero della rivista *Energia Nucleare*.



Veduta parziale della sala di lettura della biblioteca del CISE.

Veduta della sala congressi del CISE.



centi e studenti. Modernamente organizzata e dotata di indici del materiale disponibile ottenuti mediante elaborazione elettronica, la Biblioteca dispone di circa 15 000 volumi, 12 000 annate rilegate di periodici, 72 000 « reports » (intendendosi con questo termine le pubblicazioni interne dei centri di ricerca nazionali ed esteri, affini ai rapporti CISE). Vengono inoltre regolarmente ricevuti oltre 600 periodici.

La Biblioteca ha carattere multidisciplinare: sono però particolarmente numerose, accanto alle opere e pubblicazioni di tipo generale, quel-

le relative agli argomenti tecnici e scientifici sui quali si concentra l'attività del CISE.

#### *La sala congressi*

Il CISE è dotato di una sala congressi (v. fig. a pag. XXXII), da 200 posti, attrezzata con tutti i più moderni servizi ausiliari, in particolare per la traduzione simultanea e le proiezioni. Utilizzata per i congressi ed i seminari organizzati dal CISE stesso, essa può essere anche ceduta in uso ad altre organizzazioni per analoghi impieghi.

## I programmi, le competenze e le attrezzature del CISE

# 1. INFORMATICA

## 1.1. Utilizzazione dei calcolatori al CISE

Un Centro quale il CISE, che svolge attività di ricerca applicata e di base e attività di progettazione e sperimentazione avanzata, fa largo uso dei calcolatori elettronici di grande e di piccola dimensione. Esso sviluppa modelli matematici dei fenomeni studiati, elabora programmi di calcolo che traducono tali modelli e verifica la validità di questi ultimi confrontando i risultati del calcolo coi dati sperimentali; utilizza per la progettazione i modelli ed i programmi collaudati; elabora dati sperimentali, con il duplice scopo di rappresentarli adeguatamente per una facile lettura da parte dello sperimentatore e di interpretarli mediante il modello matematico del fenomeno esaminato. Esso inoltre sviluppa ed utilizza strumentazione avanzata, nella quale sono sempre più ampie le funzioni di elaborazione numerica per mezzo di calcolatori speciali, o di minicalcolatori o microelaboratori opportunamente programmati.

I calcolatori speciali sono utilizzati quando l'applicazione è ben definita e non cambia significativamente nel tempo (ad esempio correlatori, analizzatori di spettro, sistemi per il filtraggio numerico, etc.).

I minicalcolatori ed i microcalcolatori, essendo programmabili, sono usati quando si richiedono notevole versatilità nelle applicazioni e prestazioni non molto spinte. Più in particolare, i microcalcolatori sono adatti per piccoli calcoli e per il controllo di apparecchiature lente, i minicalcolatori per il controllo di apparecchiature complesse e con elevato flusso di dati.

Queste attività richiedono competenze specifiche di tipo informatico nei seguenti campi: gestione e uso dei calcolatori di media e grande dimensione e modalità per accedere ad essi; sviluppo di software di base, applicativo e gestionale, che tenga conto delle caratteristiche del calcolatore e delle esigenze dell'utente; sistemistica degli impianti di misura e di controllo per un uso corretto delle elaborazioni numeriche in linea.

Il CISE ha pertanto sviluppato una serie di competenze riguardanti in particolare: lo sviluppo e la gestione di un centro di calcolo (v. fig. 1) (utilizzazione di grandi calcolatori per applicazioni scientifiche, realizzazione di terminali remoti intelligenti di grandi calcolatori); l'automazione di sistemi di strumenti mediante l'utilizzazione di minicalcolatori; lo sviluppo di software di base ed applicativo; l'uso e la programmazione di microelaboratori; la progettazione assistita dal calcolatore.

## 1.2. Sviluppo e gestione di un centro di calcolo

### *Utilizzazione di grandi calcolatori*

In tale ambito sono state sviluppate competenze specifiche per quanto riguarda la gestione di calcolatori di medie e grandi dimensioni sia per applicazioni in tempo reale, sia per applicazioni scientifiche e gestionali. Per applicazioni scientifiche le competenze acquisite riguardano i seguenti sistemi operativi: MPX (IBM 1800), DOS/VS (IBM 370/125), OS/MVT (IBM 370/155), OS/MVS (IBM 370/168), EXEC8 (Univac 1100), SCOPE (CDC 6600 e 7600), GCOS (Honeywell 6000). Per applicazioni gestionali le competenze ri-





Fig. 1 - Veduta della sala calcolatore.

guardano l'applicazione del Sistema CICS (IBM 370) per la gestione di terminali conversazionali, la programmazione in COBOL e la gestione di archivi di dati.

#### *Terminali intelligenti*

La necessità di accedere a grandi calcolatori, pur mantenendo un'autonoma capacità di calcolo locale, ha portato a studiare, a realizzare ed a gestire terminali intelligenti per calcolatori quali l'IBM 370/155 e /168, l'Univac 1108, il CDC 6600, utilizzando dei minicalcolatori. Questi terminali, oltre alle normali funzioni svolte da terminali remoti passivi, rendono possibili le seguenti operazioni: utilizzazione

di memoria locale, tracciamento di grafici, connessione con elaboratore locale, lettura di dati provenienti da strumenti di misura, connessione con più calcolatori remoti.

#### **1.3. Automazione di sistemi di strumenti**

L'automazione delle attività di laboratorio, in particolare delle operazioni di misura e delle successive elaborazioni, ha avuto un grande sviluppo negli ultimi anni in molteplici direzioni, interessando, ad esempio, il controllo di qualità, lo sviluppo di nuove apparecchiature, il controllo di sistemi sperimentali per prove di termoidraulica e per la rilevazione

dei difetti nei componenti di sistemi meccanici, il controllo di analisi chimiche e biomediche, le prove sui materiali, etc..

Gli obiettivi e le possibilità che hanno promosso lo sviluppo dell'automazione della strumentazione di misura sono simili a quelli di altri settori applicativi dell'automazione. Tra essi si ricordano una maggiore produttività, una precisione più elevata con una migliore calibrazione e rivelazione delle derive, una raccolta più completa di dati con estrazione più elaborata dell'informazione in essa contenuta, una maggiore versatilità ed un allargamento del campo delle applicazioni, una maggiore rapidità nel fornire i risultati in una forma facilmente intelligibile all'utente.

In generale questa automazione si realizza con una o più unità di calcolo che controllano gli apparati di misura, raccolgono ed elaborano i dati sperimentali e forniscono informazioni a chi fa la misura, e permettono l'esecuzione dei comandi, in una struttura che funziona in tempo reale. Da ciò deriva la grande complessità dei sistemi di misura, composti da apparecchi con prestazioni e modalità di funzionamento e di utilizzazione piuttosto eterogenee, che producono grandi quantità di dati e rendono possibile l'intervento dell'utente in tempo reale. Un aspetto particolare di questo sistema consiste nel fatto che l'utente deve spesso sceglierne e realizzarne la configurazione in funzione della particolare misura da eseguire, anziché semplicemente utilizzare un sistema realizzato da altri. L'utente deve cioè poter cambiare la configurazione del sistema con facilità, aggiungendo e togliendo sia apparati di misura che di calcolo e modificandone le modalità di funzionamento.

Il fatto che, da un lato, l'utente possa modificare facilmente la configurazione e le prestazioni del sistema di misura e che, dall'altro, nei grandi laboratori si possa pensare ad una gestione centralizzata della strumentazione con manutenzione, ricambi, parco di apparecchia-

ture ed aggiornamento comuni a più utenti, richiede che le parti che compongono il sistema di misura siano tra loro compatibili e facilmente adattabili alle varie applicazioni. Non è facile trovare sul mercato sistemi di strumenti concepiti in questo modo, ma soprattutto non è facile adattare alla applicazione specifica sistemi di carattere generale.

Il CISE ha acquisito competenze in questo campo attraverso la realizzazione di uno strumento di rilevazione delle emissioni acustiche da parte di componenti meccanici sollecitati e difettosi, l'automazione della raccolta di dati in ambiente elettronicamente disturbato quale una centrale termoelettrica, e l'elaborazione di dati in sistemi dedicati alla misura e alla classificazione di radiazioni nucleari. Queste competenze consentono in particolare di risolvere i problemi sistemistici di assemblaggio di apparecchiature e di connessione di queste con uno o più elaboratori, nonché di sviluppare il software di base per adeguare il mezzo di calcolo alla applicazione specifica.

#### **1.4. Sviluppo di software di base e applicativo**

L'uso del minicalcolatore si è esteso in ogni campo, data la grande versatilità di questa macchina. Tale versatilità tuttavia richiede da parte dell'utente un oneroso sviluppo di programmi, per adattare i minicalcolatori alla funzione per cui devono essere impiegati. È noto che spesso il costo dello sviluppo e del collaudo dei programmi supera notevolmente il costo dello hardware, tanto più quanto meno valida è la esperienza dell'utente nel settore. Il CISE ha acquisito in questo settore una esperienza assai collaudata (terminali remoti intelligenti, sistemi operativi per minicalcolatori - sistema GOS -, interconnessione tra minicalcolatori e tra calcolatori e strumenti, specializzazione di

minicalcolatori per particolari sistemi di misura, etc.). Esso è quindi in grado di fornire le competenze necessarie per una grande quantità di applicazioni del minicalcolatore.

Nell'uso del calcolatore numerico, soprattutto per applicazioni particolari (simulazione di sistemi continui e discreti, analisi strutturale, applicazioni didattiche, progettazione assistita dal calcolatore, interrogazione e gestione di biblioteche, etc.), è importante un facile colloquio calcolatore-utente, sia pure attraverso strumenti non complessi, quali la telescrivente o semplici terminali alfanumerici e grafici. Questo colloquio da un lato permette l'accesso alla macchina a chi non è esperto programmatore e dall'altro rende realizzabili quelle applicazioni che sono strutturalmente interattive.

In questo campo il CISE ha svolto una considerevole attività: in particolare, sono stati realizzati sistemi grafici per la progettazione assistita dal calcolatore (PAC) sul Sistema IBM 1800, e il linguaggio GOSPEL per la simulazione conversazionale di sistemi continui sul sistema Honeywell 6660. Esso ha quindi competenze per sviluppare linguaggi interattivi orientati a particolari applicazioni e per completare sistemi esistenti per tutta la parte che serve a rendere facile il colloquio con l'utente.

### **1.5. Uso e programmazione di microelaboratori**

Con lo sviluppo della tecnologia dei circuiti integrati si è diffuso su larga scala l'uso dei microelaboratori (microprocessors). Questi componenti contengono qualche migliaio di funzioni logiche entro uno spazio molto ridotto ed esplicano, ad esempio, le funzioni dell'unità di calcolo e di controllo di un elaboratore. Associati a memorie a sola lettura o a memorie a lettura e scrittura, permettono la realizzazione di calcolatori economici e versatili e di minimo

ingombro e spesso dedicati ad una specifica applicazione. I settori applicativi di questi microelaboratori sono costituiti soprattutto dai sistemi automatizzati, sia per il controllo di impianti, sia per la raccolta ed elaborazione di dati sperimentali, sia infine per la trasmissione dell'informazione.

Un impedimento alle applicazioni di questi microelaboratori da parte dei non specialisti è la difficoltà con cui essi possono essere utilizzati e programmati. Il CISE può, in questo campo, fornire assistenza e produrre gli strumenti adatti per la programmazione dei microelaboratori; può inoltre fornire indicazioni sulle possibili applicazioni di questi.

Sono disponibili allo scopo competenze specifiche sui crossassemblatori, sui macroassemblatori e sugli altri strumenti software (emulatori), utili per programmare microelaboratori in modo semplice e poco costoso.

### **1.6. Progettazione assistita dal calcolatore (PAC)**

Nell'ultimo decennio l'introduzione dei mezzi di elaborazione elettronica nel settore della progettazione è divenuta via via più estesa. Ciò ha portato, oltre che ad un evidente alleggerimento dei calcoli, anche ad una nuova metodologia di progetto, che non in tutti i settori dell'ingegneria ha oggi raggiunto lo stesso grado di sviluppo. La caratteristica tipica di tale nuova metodologia è individuabile nella possibilità di ottimizzare il progetto, in modo immediato ed efficace, utilizzando i nuovi sistemi interattivi di elaborazione. Vale la pena di sottolineare che di fatto è reso oggi possibile un continuo « colloquio » tra progettista e sistema di elaborazione.

Le esperienze fatte hanno mostrato che la PAC (Progettazione Assistita dal Calcolatore) risulta economicamente vantaggiosa (in quanto ven-

gono compensati i notevoli costi di messa a punto dei programmi di elaborazione) nelle seguenti tre situazioni:

- progetto particolarmente complesso, anche nel caso di oggetti prodotti in un numero ridotto di esemplari;
- progetto ottimale di oggetti da produrre su larga scala;
- progetto che richieda continue e facili variazioni di precedenti progetti.

La disponibilità di mezzi di progettazione ottimizzata concorre ad aumentare fortemente il grado di competitività delle aziende industriali. In questo settore il CISE ha acquisito particolari competenze per le attività svolte sui sistemi per l'analisi di circuiti elettrici - lineari e non lineari -, per la progettazione delle maschere dei circuiti integrati, per il disegno di pezzi meccanici, utilizzando il calcolatore in modo sia interattivo che non interattivo. Il Centro ha inoltre esperienza nel campo dell'ottimizzazione dell'utilizzazione di superfici e volumi (disposizione di spazi, in urbanistica, e di locali, in architettura; taglio di lamiere; assemblaggio di macchine e apparecchiature) e del tracciamento di insiemi vincolati (cablaggio, fasci tubieri).

## **1.7. Strumenti di calcolo in dotazione al CISE**

Gli strumenti di calcolo in dotazione al CISE sono i seguenti:

- Calcolatore IBM 370/125 con 256K bytes di memoria centrale, 4 unità disco 3340 per un totale di 280M bytes, 1 nastro magnetico a 9 tracce, unità tradizionali di input/output, 4 unità video per l'aggiornamento, l'interrogazione, la correzione interattiva di archivi di dati; ad esso è collegato un minicomputer satellite Varian 620/I, che gestisce nastri magnetici, lettore e perforatore di banda, lettore e registratore di « minicassette », convertitore analogico digitale e tracciatore grafico Calcomp 936.
- Terminale remoto intelligente dei sistemi CYBER 76 e CDC 6600 del Centro Calcolo Interuniversitario di Bologna e dell'IBM 370/168 del CNEN di Bologna, realizzato da un minicomputer Varian 620/L con nastri magnetici e unità tradizionali di input/output.
- Terminale grafico e terminale tipo teletype collegati in time sharing con il calcolatore Honeywell 66/60 del Centro di Ricerca Automatica (CRA) dell'ENEL.
- Digimetro Coradi per la digitalizzazione automatica di grafici e disegni.

## 2. CALCOLO NUMERICO

### 2.1. Scopo del calcolo numerico

Le origini del moderno calcolo numerico sono strettamente legate alla nascita dei calcolatori elettronici, la cui utilizzazione ha consentito di allargare notevolmente la classe dei problemi risolvibili.

L'uso, da parte del matematico, dell'elaboratore elettronico come nuovo strumento di calcolo ha permesso lo sviluppo di una branca della matematica, l'analisi numerica, il cui scopo è lo studio di metodi e procedure numeriche per ottenere soluzioni approssimate di processi matematici. Pertanto il primo problema che si presenta all'analista numerico è quello di scegliere la regola di calcolo (algoritmo) che sia in qualche senso ottima per risolvere un determinato problema. Ciò sottintende che devono essere stati prefissati alcuni criteri per valutare differenti metodi.

Alcuni di questi fattori di valutazione sono di carattere generale, nel senso che possono essere stabiliti in modo del tutto indipendente dal particolare problema in esame. Essi riguardano:

- la stabilità, cioè la possibilità di mantenere limitato l'effetto di un errore nei dati o di un errore commesso durante il calcolo, dovuto quest'ultimo al fatto che i numeri vengono rappresentati nel calcolatore in maniera finita (errori di arrotondamento);
- l'errore di discretizzazione, cioè la valutazione dell'errore che si commette nell'eseguire una simulazione discreta di un processo continuo;
- il numero di operazioni che l'algoritmo comporta, cioè il suo costo in termini di tempo utilizzato dall'elaboratore per eseguire il calcolo.

La valutazione di questi parametri costituisce un buon punto di partenza per la scelta di un

metodo numerico soddisfacente, ma non esaurisce il problema, in quanto occorre che l'algoritmo da utilizzare sia « adatto » al problema allo studio. È noto infatti che molti algoritmi efficienti per risolvere alcune classi di problemi diventano praticamente inutilizzabili per descrivere fenomeni fisici di natura diversa o fenomeni il cui studio comporta il trattamento di un numero molto elevato di variabili. Questo tipo di problemi è stato oggetto di studi relativamente recenti ed ha introdotto come nuovo parametro di valutazione di metodi numerici la possibilità di una loro realizzazione efficiente sul calcolatore, tenendo conto della strumentazione del problema da risolvere (presenza o meno di zeri, ricorrenza periodica di alcuni termini, etc.). In tal modo è possibile ridurre il numero di operazioni e la memoria utilizzata nel calcolatore, mantenendo il costo del calcolo entro limiti accettabili.

Risulta quindi che il calcolo numerico non può essere una fase isolata del processo di studio di un fenomeno, ma deve essere intimamente legato sia all'origine del problema che ai mezzi di calcolo disponibili.

D'altra parte, le competenze e gli strumenti di calcolo acquisiti per risolvere un particolare problema ingegneristico sono in molti casi di tipo abbastanza generale da poter essere utilizzati per la soluzione di problemi fisici di tipo differente.

### 2.2. Competenze acquisite nell'ambito del calcolo numerico

Come supporto alle attività di ricerca del CISE sono state sviluppate competenze allo scopo di mettere a punto sia raccolte (« librerie ») di pro-

grammi di calcolo di impiego generale (« sottoprogrammi »), che programmi per la soluzione di problemi specifici.

Il primo tipo di attività ha consentito di disporre di strumenti di calcolo atti a risolvere vaste classi di problemi (soluzioni di sistemi lineari e non lineari, calcolo di autovalori, approssimazioni funzionali, etc.). In particolare il CISE, col supporto del CNR, ha collaborato con altri enti giungendo alla pubblicazione di una raccolta di sottoprogrammi per l'algebra lineare.

Un'altra realizzazione è nata dalla collaborazione tra il CISE e l'IAC (Istituto per l'Applicazione del Calcolo, del CNR) per la costituzione di una libreria di sottoprogrammi per la soluzione di problemi di minimizzazione « locale » non vincolata.

La messa a punto di tali librerie si è inoltre rivelata una base fondamentale per la soluzione di problemi specifici affrontati al CISE, riguardanti la meccanica dei continui (elasticità lineare e non lineare), la fluidodinamica, lo studio di problemi di campo, etc..

A tale scopo è stato necessario sviluppare competenze riguardanti la discretizzazione di equazioni differenziali di tipo ellittico, parabolico ed iperbolico, utilizzando sia il metodo delle differenze finite che quello degli elementi finiti. Queste tecniche comportano la suddivisione del sistema fisico allo studio (strutture, solidi o fluidi continui) in piccole sottoregioni, dette « elementi finiti » nel metodo degli elementi finiti e « maglie » nel metodo delle differenze finite. Ognuna di queste sottoregioni costituisce un'« unità semplice », il cui comportamento può essere facilmente analizzato sfruttando la legge descritta dall'equazione differenziale in esame. Ciò consente di definire delle equazioni discrete per alcuni punti prefissati della regione (detti « nodi »), la cui soluzione permette di descrivere il comportamento del fenomeno allo studio in ogni punto della regione stessa. Il metodo degli elementi finiti può

essere considerato come un'estensione del metodo delle differenze finite, poiché la principale differenza tra queste due tecniche consiste nel fatto che le « maglie » sono di tipo regolare (triangoli rettangoli, quadrati o rettangoli), mentre gli « elementi finiti » possono essere triangoli o quadrilateri con lati arbitrariamente curvi. Ciò rende il metodo degli elementi finiti particolarmente adatto a trattare regioni con geometrie complesse, facilmente approssimabili da un insieme di elementi curvilinei. Nel campo degli elementi finiti il CISE ha svolto una notevole attività, realizzando molti strumenti di calcolo per la soluzione di problemi di meccanica strutturale in campo lineare, e possiede perciò le competenze per trattare problemi diversi, quali ad esempio problemi di plasticità, di fluidodinamica, di magnetostatica, etc., in campo sia lineare che non lineare.

Anche nell'ambito dell'ottimizzazione sono state acquisite competenze, con il fine di creare un supporto ad un'attività di progettazione o gestione automatica di sistemi. I problemi che ne derivano sono caratterizzati dalla definizione di una funzione di merito (o funzionale di costo, cifra di merito, « performance index », etc.), quale ad esempio il rendimento (produzione oraria) di un insieme di macchine in funzione dei vari parametri di regolazione, oppure il rendimento di una macchina da progettare e costruire in funzione del tipo e della quantità di materiale da usare. Tali problemi possono essere agevolmente trattati con gli elaboratori elettronici, che permettono di sviluppare delle metodologie integrate, considerando contemporaneamente ed in maniera coordinata tutti i parametri, per ottenere sia dei rendimenti (o costi) migliori, sia una comprensione più profonda della natura del problema.

Dal punto di vista matematico si tratta di minimizzare la funzione di merito (se descrive un costo) o di massimizzarla (se descrive un rendimento) e ciò non è fattibile senza l'aiuto di un

elaboratore elettronico, qualora la funzione dipenda da un numero elevato di parametri o abbia un andamento piuttosto irregolare o, molto più semplicemente, quando non si possiedano su di essa che scarse informazioni.

Sono stati messi a punto e sono disponibili al CISE parecchi algoritmi numerici che permettono di risolvere tali problemi (almeno per la maggioranza dei casi), siano essi « locali » (funzione di merito con un solo minimo o massimo), o globali (funzione con parecchi minimi e massimi).

Come supporto all'attività sperimentale è stato necessario sviluppare competenze per l'approssimazione di dati sperimentali con curve continue. Tale problema viene affrontato di-

versamente, a seconda che sia nota o meno la forma della funzione approssimante in dipendenza da alcuni parametri. Nel primo caso lo si riconduce ad un problema di ottimizzazione (minimizzazione dell'errore), mentre nel secondo caso si ricorre alla costruzione di curve il più possibili regolari, dette di « best fitting ». Tali curve vengono costruite mediante funzioni speciali, dette « splines », che hanno trovato recente impiego in vasti campi dell'analisi numerica, come ad esempio nella soluzione di equazioni differenziali, nel calcolo di integrali, etc..

Sulla base di queste tecniche sono stati quindi messi a punto al CISE sia programmi di impiego generale che programmi orientati allo studio di specifici problemi sperimentali.

### 3. CALCOLO MECCANICO

Nella progettazione meccanica di componenti è fondamentale la verifica che lo stato di sollecitazione cui essi sono sottoposti nelle diverse condizioni operative sia accettabile. Nel caso di componenti di particolare importanza la determinazione di tale stato di sollecitazione deve essere effettuata con un notevole grado di dettaglio. A tal fine sono stati sviluppati negli ultimi anni metodi di calcolo molto raffinati - quale ad esempio quello degli elementi finiti - che traggono profitto dalla disponibilità di elaboratori elettronici sempre più potenti.

Dal 1969 il CISE svolge un'attività relativa all'applicazione di tale metodo per la risoluzione di problemi di meccanica strutturale. Tale attività, consistente nella messa a punto di programmi di calcolo e nelle loro utilizzazioni per lo studio di casi di interesse pratico, ha consentito di applicare e sperimentare, sempre nell'ambito del metodo degli elementi finiti, le procedure di calcolo più avanzate. Tutto ciò ha richiesto uno sforzo non indifferente, che è stato compiuto e si compie tuttora al CISE grazie alla stretta collaborazione di esperti nel campo della meccanica strutturale, dell'analisi numerica e della programmazione (v. anche par. 2.2).

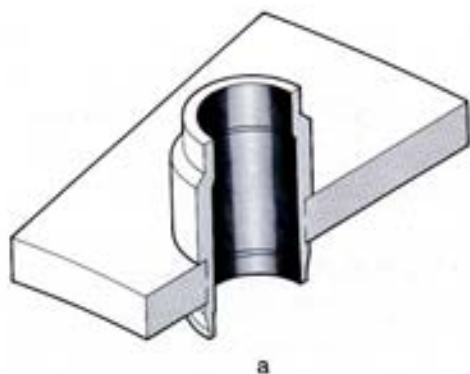
Nel corso di questa attività sono stati messi a punto parecchi programmi per la soluzione di problemi strutturali e di campo termico, statici e dinamici, in diversi tipi di geometria. Tutti questi programmi, assai maneggevoli per risolvere problemi di una stessa classe, sono stati assiemati in un unico sistema di calcolo, denominato PAS-1 (Programma Analisi Strutturale-1). Nell'attuale versione del PAS-1 l'analisi statica può essere eseguita su strutture piane, assialsimmetriche e tridimensionali con diffe-

renti tipi di elementi e condizioni di carico; l'analisi dinamica può essere eseguita su strutture piane, su sistemi reticolari e strutture tridimensionali. Ambedue i tipi di analisi sono effettuabili in campo elastico.

Per comprendere i vantaggi che un tale sistema di calcolo può offrire, è opportuno ricordare che la soluzione di problemi ingegneristici con il metodo degli elementi finiti viene realizzata attraverso diverse fasi che sono comuni a problemi differenti. Pertanto, se la risoluzione di ogni fase viene organizzata mediante gruppi di sottoprogrammi adatti a realizzare specifiche funzioni e facilmente comunicanti gli uni con gli altri, la combinazione di tali blocchi permetterà di costruire agevolmente mezzi di calcolo adatti a risolvere problemi fisicamente anche molto diversi tra loro. Un sistema, quindi, non offre in generale all'utente vantaggi maggiori di un insieme di programmi di calcolo particolari, ma consente a chi deve mettere a punto strumenti di calcolo di lavorare con un mezzo flessibile che può essere facilmente aggiornato ed ampliato.

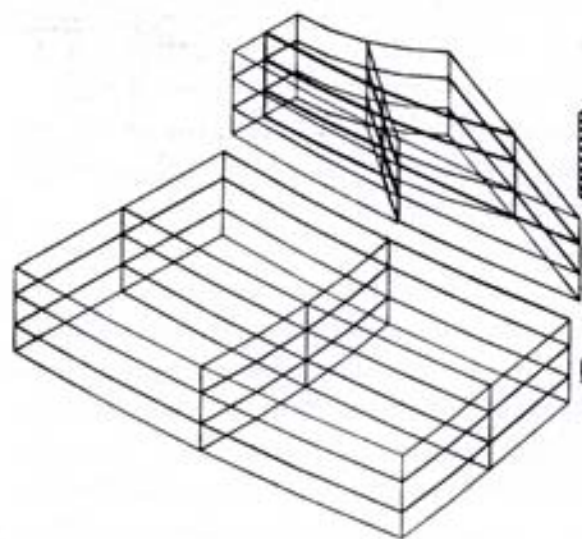
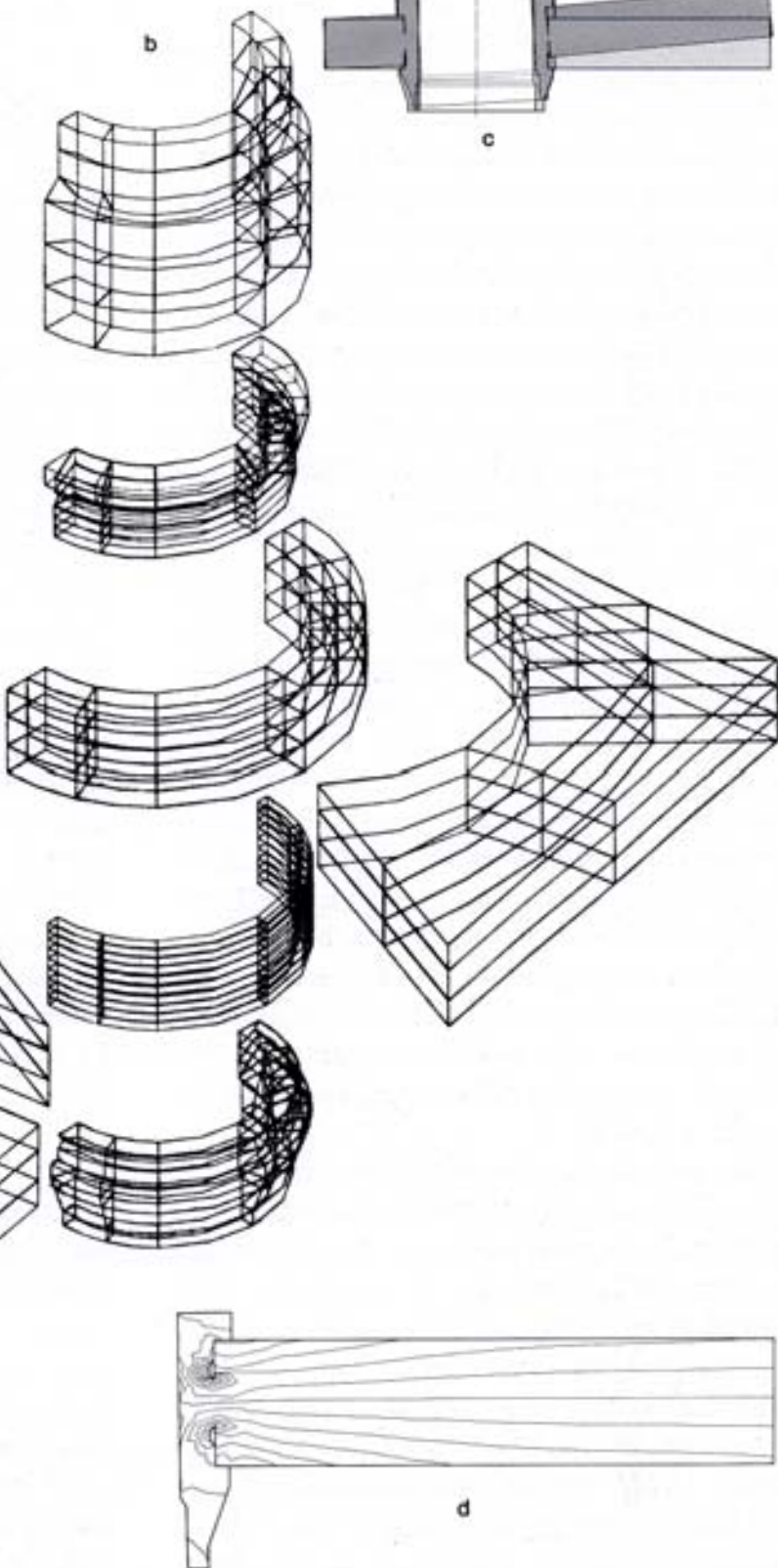
La parte più onerosa nella soluzione di problemi pratici è costituita dalla preparazione dei dati di ingresso e dall'esame dei risultati ottenuti. È noto infatti che i programmi ad elementi finiti richiedono tra i dati di ingresso le coordinate dei « nodi » utilizzati per discretizzare la struttura, che, per problemi anche non eccessivamente complessi, possono essere in numero molto elevato; inoltre, tali programmi forniscono in uscita (per ogni punto, spostamento, sforzo, temperatura, etc.) una quantità considerevole di dati, il cui esame può risultare gravoso. Se la preparazione dei dati di ingresso e l'esame dei risultati non vengono, per

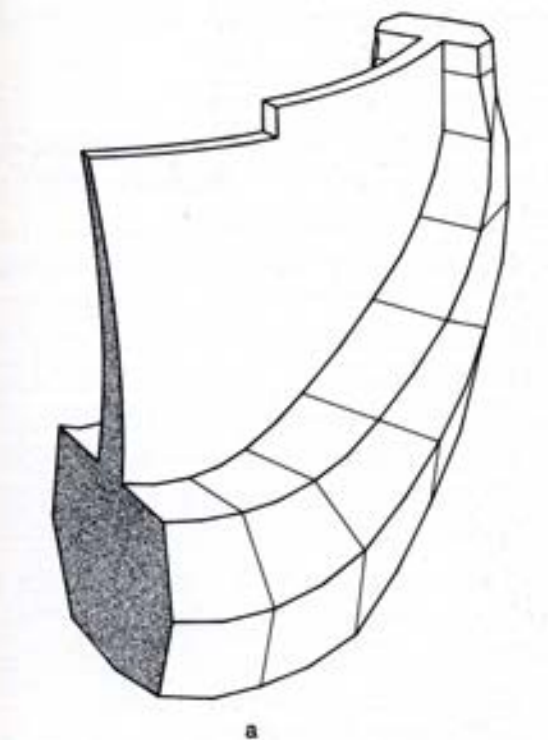




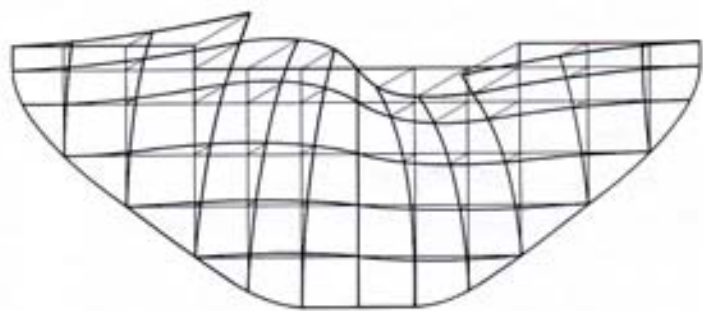
a

Fig. 2 - Esempio di applicazione dei programmi di calcolo strutturale col metodo degli elementi finiti al caso di un componente meccanico sollecitato staticamente (collegamento bussola-lastra del reattore CIRENE). a) Spaccato del collegamento bussola-lastra. b) Vista esplosa della suddivisione in elementi finiti della struttura esaminata. c) Risultati del calcolo: deformata del contorno della struttura sovrapposta al contorno indeformato, relativa ad una particolare condizione di carico. d) Risultati del calcolo: curve di livello dello stato di sollecitazione della struttura in corrispondenza della sezione radiale della lastra.





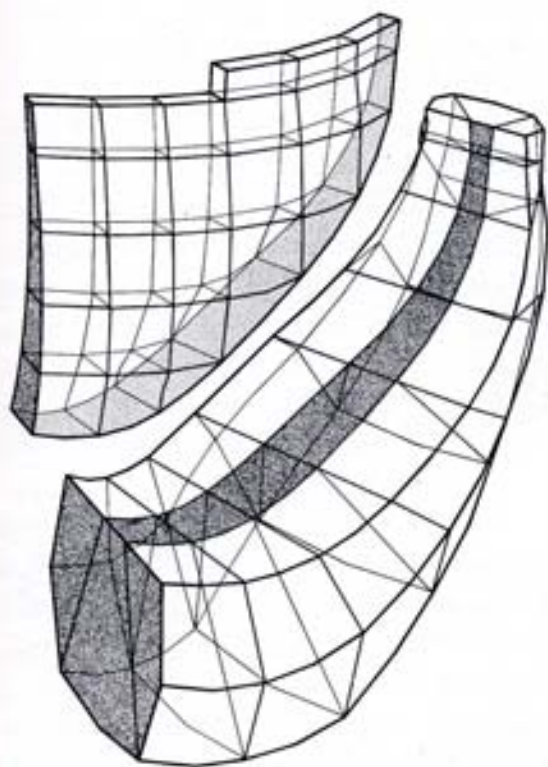
a



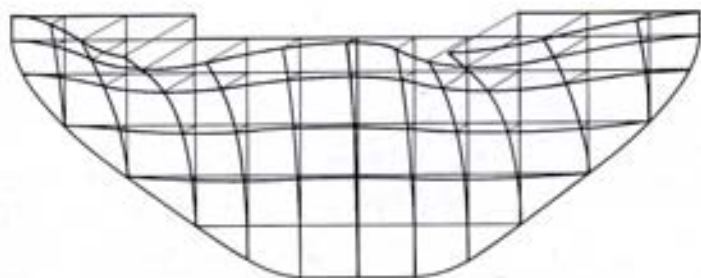
c



d



b



e

Fig. 3 - Esempio di applicazione dei programmi di calcolo strutturale col metodo degli elementi finiti al caso di una struttura civile sollecitata dinamicamente (diga ad arco a doppia curvatura di Talvacchia, dell'ENEL). a) Modello analitico della diga. b) Suddivisione in elementi finiti del sistema diga-fondazioni. c, d, e) Risultati del calcolo: modi di vibrare della diga relativi alle prime tre frequenze di risonanza (3,79 - 4,03 - 5,22 Hz).

quanto possibile, automatizzati, si aumenta notevolmente l'onerosità dell'utilizzazione dei programmi, anche per l'elevata probabilità di commettere errori. Si è quindi avvertita l'esigenza di corredare i programmi di calcolo di « sottoprogrammi » che forniscano automaticamente le informazioni topologiche necessarie e consentano, a scopo di verifica, la visualizzazione grafica della struttura discretizzata prima che si proceda al calcolo effettivo. Infine si sono dotati i programmi di calcolo di uscite grafiche dei risultati, allo scopo di procedere alla loro interpretazione in modo facile ed economico. I diversi programmi realizzati ed il sistema di calcolo PAS-1, pur essendo il prodotto più evidente dell'attività svolta in questi anni, non costituiscono il risultato più importante raggiunto, che consiste invece nella creazione di competenze indispensabili per un appropriato impiego di strumenti di calcolo basati sul metodo degli elementi finiti. È infatti noto, a chiunque abbia pratica di tecniche di calcolo, che per ri-

solvere problemi ingegneristici non è sufficiente possedere programmi anche sofisticati; il compito più difficile resta sempre quello di fornire al calcolatore una schematizzazione del problema che possa essere significativa per i risultati che si vogliono ottenere.

Tali programmi sono stati applicati per la verifica strutturale di componenti sottoposti a carichi statici o dinamici. Tra le molteplici applicazioni si possono citare: lo studio elastostatico, elastodinamico e termomeccanico di componenti significativi dell'insieme reattore prototipo CIRENE (v. figg. 2a,b,c,d); lo studio delle caratteristiche dinamiche di generatori di vapore di reattori nucleari; la verifica sismica di dighe in calcestruzzo (v. figg. 3a,b,c,d,e); l'analisi elastostatica di componenti importanti relativi ad impianti sperimentali in reattore.

Grazie all'elevata flessibilità e potenzialità dei programmi disponibili, questi possono trovare ulteriori numerose applicazioni in campo sia civile che industriale.

## 4. ANALISI E PROGETTO DEI NOCCIOLI DEI REATTORI NUCLEARI

### 4.1. I compiti dell'analista e del progettista nucleare

Un reattore nucleare è grosso modo una struttura caratterizzata da alcuni elementi base (un combustibile nucleare, una popolazione di neutroni, un refrigerante) e da un processo fondamentale (la fissione), responsabile della produzione di potenza e del mantenimento autonomo del processo stesso.

Nella fissione un neutrone scinde in due (« fissiona ») il nucleo di un atomo del materiale combustibile, normalmente uranio o plutonio, con liberazione pressoché immediata di una forte quantità di energia termica ( $\sim 200$  MeV/fissione), che viene asportata dal refrigerante; in seguito a fissione, il neutrone originario sparisce, ma la reazione può proseguire per il fatto che ogni fissione origina contemporaneamente 2 o 3 (in media  $\sim 2,5$  per l' $^{235}\text{U}$ ) neutroni nuovi, di energia iniziale dell'ordine dei 2 MeV (detti « neutroni veloci »), a cui spetta il compito di innescare nuove fissioni, cioè di perpetuare il processo. Il rapporto numerico tra due generazioni successive di neutroni, detto fattore di moltiplicazione (K), è però inferiore a 2,5. Infatti i neutroni possono sparire dal sistema anche o per fuga al contorno o perché catturati improduttivamente dai nuclei presenti. Un reattore nucleare comincia normalmente la sua vita con un fattore di moltiplicazione che, senza interventi esterni, è superiore all'unità. Perché la reazione sia stazionaria occorre che sia  $K = 1$  e a tale scopo si inseriscono materiali fortemente catturanti (« veleni »), quali boro, gadolinio, cadmio, normalmente sotto forma di barre « di controllo »; man mano che il reattore « brucia » il suo combustibile, siccome i due nuclei risultanti dalla fissione dell'atomo del

combustibile (« prodotti di fissione ») sono anch'essi dei potenti veleni, il valore di K tende spontaneamente a diminuire, in modo che, per mantenerlo al valore  $K = 1$ , le barre di controllo vengono progressivamente estratte. Quando  $K = 1$  a barre estratte, parte del combustibile « esaurito » va sostituito con del combustibile « fresco » per permettere un nuovo ciclo di funzionamento.

Accanto alla fissione dei nuclei detti appunto « fissili » (per es. degli isotopi uranio-235, plutonio-239, plutonio-241), la cattura neutronica in nuclei cosiddetti « fertili » può produrre dei nuovi nuclei fissili (per es.,  $^{238}\text{U} + n \rightarrow ^{239}\text{Pu}$ ;  $^{240}\text{Pu} + n \rightarrow ^{241}\text{Pu}$ ). Se (come può succedere) si produce più materiale fissile di quanto se ne distrugge, si ha un reattore « rigeneratore » (breeder).

Grosso modo, si possono distinguere due classi di reattori: termici e veloci. I reattori veloci – così detti perché i neutroni « veloci » vi prevalgono – richiedono combustibile contenente in partenza isotopi fissili in quantità elevata e comunque nettamente superiore al tenore naturale (combustibile altamente arricchito): tali reattori sono progettati per essere rigeneratori. I reattori termici, invece, contengono anche un materiale « moderatore », formato di nuclei leggeri che, per urto elastico (« a palla di biliardo »), rallentano i neutroni veloci (di massa comparabile) sino all'energia di agitazione termica, in corrispondenza della quale la fissione diventa più probabile degli altri eventi. I reattori in esercizio, in costruzione o in ordinazione attualmente in Italia sono quelli termici del tipo ad acqua leggera (\*) (in cui il moderatore è la

(\*) Con l'eccezione di quello di Latina, che è del tipo a gas-grafite.

stessa acqua di refrigerazione), che richiedono l'uso di combustibile lievemente arricchito: in questi reattori combustibile e refrigerante sono contenuti in un unico recipiente a pressione. Già da anni operanti in Canada ed allo studio in Italia sono i reattori termici ad acqua pesante, in cui il moderatore principale è appunto l'acqua pesante, che viene contenuta in una vasca a pressione ordinaria; il combustibile è raccolto in tubi, disposti a reticolo nel moderatore, fra loro notevolmente distanziati ed entro ognuno dei quali scorre il refrigerante ad alta pressione; normalmente, poiché l'acqua pesante cattura neutroni mille volte meno dell'acqua naturale, un reattore ad acqua pesante può utilizzare combustibile ad ossido di uranio naturale.

Il calcolo ed il progetto del nocciolo dei reattori (« Core analysis & design ») richiedono un tipo di competenze abbastanza variato. Dal punto di vista dell'analisi l'obiettivo è normalmente la messa a punto e la qualificazione di metodi di calcolo. Dalla descrizione data sopra risulta evidente che occorre innanzitutto seguire le vicissitudini dei neutroni nel reattore. In virtù dell'assenza di carica elettrica, i neutroni possiedono una notevole mobilità e capacità di diffondere, la cui descrizione fisico-matematica, mediante l'equazione del trasporto di Boltzmann, è tanto complessa quanto indispensabile per predire accuratamente parametri di grande rilevanza economica, quali il fattore di moltiplicazione e la velocità di « conversione » o rigenerazione del combustibile; è fondamentale conoscere bene persino la distribuzione dettagliata dei neutroni entro il reattore, poiché essa determina la distribuzione di densità di potenza, che non è affatto uniforme ed il cui fattore di picco (massimo/medio) va tenuto il più possibile prossimo all'unità, compatibilmente con altre esigenze.

È inoltre indispensabile munirsi di strumenti atti a studiare i transitori: anche qui, alla particolare struttura delle equazioni, che le rende

di difficile trattazione, si accompagna l'importanza della posta in palio, sia per quanto riguarda i transitori operativi « voluti » (salita in potenza, riduzione di potenza, etc.), sia per quanto riguarda i transitori non voluti, tipo incidente, in cui entra in gioco la sicurezza dell'impianto.

Occorre infine tener conto in modo completo del fatto che, in un reattore di potenza, la distribuzione dei neutroni condiziona l'assetto delle caratteristiche termoidrauliche del reattore (distribuzioni di potenza, portata del refrigerante, temperatura del combustibile, temperatura ed eventualmente titolo in vapore e densità del refrigerante, etc.), ma l'assetto termoidraulico a sua volta condiziona il calcolo dei parametri nucleari in base ai quali si calcola la distribuzione dei neutroni. Esiste cioè un accoppiamento neutronico-termoidraulico, detto anche retroazione termoidraulica, che: (a) è importantissimo, quindi richiede l'uso di modelli e correlazioni termoidrauliche molto accurate; (b) appesantisce fortemente i calcoli, quindi richiede una trattazione particolarmente efficiente dal punto di vista matematico.

Dal punto di vista del progetto di un nocciolo è ormai evidente che i compiti del progettista coprono un ampio spettro: innanzitutto viene l'impostazione dei problemi che i metodi di calcolo devono risolvere, problemi di cui il progettista deve fissare le priorità con il massimo di finalizzazione all'obiettivo generale del progetto in corso; il progettista deve poi gestire gli strumenti di calcolo per ricavare tutti i dati che lo interessano, e costruirsi, nel modo più flessibile, gli strumenti di valutazione che gli permettano di scegliere le soluzioni ottimali; il progettista deve, per tentativi, escogitare e valutare differenti configurazioni di reattore, o strategie di caricamento del combustibile, e cercare la combinazione ottimale.

L'analista ed il progettista debbono entrambi sapere elaborare in modo costruttivo tutti i confronti necessari fra la teoria e l'esperienza.

La collaborazione fra l'analista ed il progettista deve avvenire mediante contatti regolari, visto l'evidente carattere di retroazione dell'uno sull'altro: essa è favorita al CISE dall'esistenza di una struttura unitaria e finalizzata operante in questo campo.

## 4.2. Competenze acquisite nel campo dell'analisi e progetto dei noccioli

Il CISE ha sviluppato, a partire circa dal 1960, un insieme di competenze molto articolate nei campi sopra descritti, in particolare per due classi di reattori termici: i reattori ad acqua pesante e quelli ad acqua leggera.

*Reattori ad acqua pesante (HWR = Heavy Water Reactor)*

Particolare attenzione è stata rivolta all'analisi e progetto di un HWR refrigerato ad acqua leggera bollente ed alimentato ad uranio naturale, sistema noto in Italia come CIRENE (CISE REattore a NEbbia) ed in Canada come CANDU-BLW (CANadian Deuterium Uranium Uranium - Boiling Light Water) (\*). Il progetto CIRENE, originato all'inizio degli anni '60 al CISE, è ora giunto a livello realizzativo, con la costruzione, già iniziata a Latina, di un prototipo da 40 MW elettrici; nel campo dell'analisi e progetto di noccioli tipo CIRENE le competenze del CISE sono suscettibili di ampio impiego in Italia per la loro profondità e diversificazione, ed hanno interessato direttamente l'industria.

Lungo gli anni sono stati in pratica affrontati tutti i problemi, da quelli modellistici elementari a quelli di impostazione del progetto, a

(\*) Un sistema analogo sviluppato in Gran Bretagna e denominato SGHWR (Steam Generating Heavy Water Reactor), differisce da questi per l'impiego di uranio leggermente arricchito (2,3%).

quelli di messa a punto di complessi sistemi di calcolo (interamente originali), ormai in buona parte standardizzati e comunque completamente automatizzati.

Le competenze specifiche, intese come potenzialità concrete avvalorate dall'attività specifica già svolta o in corso di svolgimento, si possono sintetizzare come segue:

- Metodi di base (teoria del trasporto). Sistemi di calcolo avanzati, studio e messa a punto di metodi di calcolo semplificati ad alta accuratezza, atti a studi di progetto su strutture elementari reali («celle elementari»). Un programma di revisione e ridefinizione dei parametri nucleari viene sviluppato in vista del superamento di schemi di calcolo tradizionali che si mostrano talora inadeguati.

- Calcolo della distribuzione spaziale dei neutroni in condizioni stazionarie. Messa a punto di metodi ad alta accuratezza ed efficienza (semi-analitici), disponibilità di metodi di calcolo numerici. Messa a punto di un metodo tridimensionale (originale) di alta velocità e precisione.

- Metodi di calcolo per il progetto del nocciolo e il progetto di cicli di combustibile. Messa a punto di sistemi di calcolo completi, con accoppiamento neutronico-termoidraulico, per lo studio del ciclo di equilibrio o di una serie di cicli prescelti con assegnate strategie di caricamento, e per lo studio di transitori operativi (lenti) di impianto. I programmi possono essere fatti funzionare secondo due modalità alternative: (a) procedura di progetto, in cui sono prefissati i limiti tecnologici da non valicare e la potenza di impianto, e si calcolano di conseguenza le portate di refrigerante nei canali e le dimensioni del reattore; (b) procedura di verifica, in cui, prefissata la configurazione del reattore e la portata totale del refrigerante, si verifica se i limiti tecnologici vengono valicati o meno alla potenza nominale.

- Analisi dinamica, cioè studio del comportamento spazio-temporale dei neutroni in regime transitorio. Tuttora in fase di continuo ampliamento, le competenze del CISE hanno già permesso di mettere a punto codici bidimensionali a differenze finite molto efficienti.

- Qualificazione di metodi. Aggiornamento continuo dei dati sperimentali di confronto e delle procedure di confronto.

- Progetto reattori HWR (in particolare di tipo CIRENE). Impostazione dei calcoli di « survey » a livello di elemento di combustibile; studi di sensibilità alle varianti del progetto meccanico e termoidraulico; calcolo e valutazione dei cicli di combustibile sia con ricambio continuo, sia con ricambio discontinuo; analisi di fattibilità per il progetto della strumentazione in-core; progetto e calcolo dei transitori operativi, delle modalità di avviamento e delle modalità di funzionamento a carico ridotto.

#### *Reattori ad acqua leggera (LWR = Light Water Reactor)*

Particolarmente studiati sono i reattori ad acqua bollente (BWR - Boiling Water Reactor) del tipo General Electric. L'attività in questo campo è di origine più recente (1971) e si è finora estrinsecata, su commessa ENEL, per lo più avendo come obiettivo gli studi relativi all'esercizio delle centrali BWR. Lo sforzo in atto, che ha già portato allo sviluppo e all'acquisizione di tecniche moderne ed efficienti, è teso ad ampliare le competenze al campo della progettazione (come già fatto per gli HWR), con ovvio « fallout » di carattere industriale: è evidente infatti che lo sviluppo di tali competenze può essere di notevole aiuto all'industria italiana nel realizzare una « interiorizzazione » delle licenze americane.

Le competenze e le attrezzature del CISE pongono questo Centro in condizione di poter svolgere attività anche nel campo dei reattori

ad acqua pressurizzata (PWR - Pressurized Water Reactor).

Le competenze specifiche sviluppate in concreto al CISE, e - come si è detto - suscettibili di ulteriori ampliamenti, sono le seguenti:

- Metodi di calcolo per i cicli di combustibile BWR secondo il principio di Haling con retroazione termoidraulica. Messa a punto e prova di codici di ciclo con caricamento assegnato del combustibile fresco e rimescolamento (« shuffling ») pilotato del combustibile preesistente non esaurito, in modo da soddisfare tutte le limitazioni tecnologiche. Studio e messa a punto di codici di ciclo con dimensione e distribuzione ottimali del combustibile fresco.

- Messa a punto di sistemi di calcolo integrati, dai calcoli elementari sui singoli elementi di combustibile a calcoli di reattore bi- o tri-dimensionali.

- Messa a punto di un programma tridimensionale, con accoppiamento neutronico-termoidraulico, per lo studio dettagliato dell'esercizio di una centrale in condizioni di piena potenza e tenendo conto dell'evoluzione nucleare con l'irraggiamento: tale programma tridimensionale, ad alta velocità e precisione, è suscettibile di sviluppo per reattori ad acqua in pressione (PWR) o anche per reattori HWR.

- Messa a punto di correlazioni fra letture della strumentazione in-core e distribuzione dettagliata di potenza, per il monitoraggio in linea dell'esercizio del reattore.

- Studi di simulazione dinamica di impianti LWR comprensivi di tutto il circuito primario, della turbina, delle catene di regolazione; oltre ai normali transitori d'impianto, le competenze acquisite riguardano le logiche di intervento per spegnimento rapido del reattore.

- Studi di base per l'applicazione di metodi avanzati di teoria integrale del trasporto al calcolo accurato (quindi al progetto effettivo) dei singoli elementi di combustibile.

### 4.3. Programmi di calcolo

Tra i programmi di calcolo sviluppati, si possono citare i seguenti:

**PROCELLA** (PROgramma di CELLA), per il calcolo delle costanti nucleari a 4 gruppi di un reticolo moderato ad acqua pesante; tale programma, di esecuzione di almeno un ordine di grandezza più rapida rispetto ad altri analoghi, fornisce il valore del fattore di moltiplicazione con un'accuratezza migliore di  $\pm 1\%$ .

**PROZIONE** (PROgramma di Cella con evoluzione), in cui una serie di calcoli PROCELLA, intercalata con calcoli di evoluzione isotopica, segue l'intera vita di un reticolo moderato ad acqua pesante;

**MOICANO**, che esegue il calcolo bidimensionale ( $r, z$ ) a due gruppi energetici di neutroni in teoria di diffusione, su un reattore ad ac-

qua pesante di tipo CIRENE o ad inizio vita o per il ciclo di equilibrio;

**SIOUX**, analogo del MOICANO, progettato per seguire l'evoluzione del reattore dall'inizio della sua vita sino all'equilibrio (« follow-up »);

**ONDA** (ONE Dimensional Analysis) (in varie versioni), per lo studio del ciclo di combustibile nei reattori ad acqua leggera, in teoria di diffusione monodimensionale radiale;

**PANDA** (Programma ANALisi Dinamica ARPA), per l'analisi dinamica dell'impianto di un reattore BWR (comprendente cioè anche lo studio delle catene di regolazione, delle linee di vapore, etc.);

**COMETA** (COarse MESH Tridimensional Analysis), per il calcolo tridimensionale a maglia « ultra-larga » ( $\sim 20$  cm/mesh) in teoria di diffusione di un nocciolo ad acqua leggera: una tecnica particolare permette l'uso di maglie assai larghe, con accuratezza sui flussi dell'ordine del 2%.



## 5. STUDI DI TERMOIDRAULICA E DI SICUREZZA DEI REATTORI NUCLEARI

### 5.1. Problemi termoidraulici di un impianto nucleare

Il calore prodotto dalla fissione nucleare all'interno di un reattore nucleare viene trasportato al sistema utilizzatore mediante un fluido termovettore.

Il sistema utilizzatore è costituito da un generatore di vapore che assorbe calore dal fluido termovettore; il vapore prodotto viene inviato in un turboalternatore per produrre energia; se il fluido è costituito da acqua in cambiamento di fase, il vapore prodotto nel reattore viene inviato direttamente nel turboalternatore. Il fluido termovettore, oltre a questa funzione primaria, deve assicurare il raffreddamento del nocciolo in particolari condizioni d'emergenza, per evitare il danneggiamento del combustibile e il conseguente rilascio dei prodotti di fissione.

Come fluidi termovettori sono state sperimentate nel mondo numerose sostanze, sotto forma gassosa, liquida o in cambiamento di fase. La scelta del fluido è intimamente legata alla concezione stessa del reattore o comunque alle scelte fondamentali di progetto dell'impianto. Negli attuali impianti di potenza i fluidi termovettori impiegati sono: acqua leggera o acqua pesante (reattori ad acqua in pressione), acqua leggera in cambiamento di fase (reattori ad acqua bollente), anidride carbonica o elio (reattori a gas), sodio (reattori veloci).

Nel progetto di un impianto nucleare i problemi termoidraulici inerenti al fluido termovettore presentano una particolare importanza per una serie di motivi che possono essere così sintetizzati:

– necessità di spingere al massimo le sue pre-

stazioni, a causa sia del numero di processi di trasferimento di calore necessari – dalla generazione del calore nucleare alla sua trasformazione in energia meccanica – sia dei limiti imposti alle temperature massime del combustibile per ragioni tecnologiche;

– importanza, in genere, di conoscere l'influenza reciproca tra il comportamento neutronico e quello termoidraulico del nocciolo per determinare le condizioni di funzionamento, statiche e dinamiche, del reattore;

– necessità di prevedere il comportamento del termovettore in condizioni d'emergenza, derivanti soprattutto da rotture del circuito in cui circola il termovettore stesso.

Per questo, fin dall'inizio, una parte notevole della ricerca nel campo nucleare è stata indirizzata all'approfondimento di quei problemi di termoidraulica su cui le conoscenze erano del tutto inadeguate per le applicazioni nucleari. A titolo d'esempio, si può citare tutta la problematica relativa ai fluidi bollenti.

L'impiego dell'acqua in cambiamento di fase, in particolare, risulta assai attraente nel campo nucleare per i seguenti motivi:

– presenta elevati coefficienti di scambio termico;

– è un fluido praticamente isoterma;

– genera nel nocciolo del vapore che può essere direttamente utilizzato, una volta separato dall'acqua, come fluido motore;

– ha bassa densità (è un vantaggio solo per alcuni tipi di reattori).

Per contro stanno gli inconvenienti derivanti dai limiti termoidraulici propri dell'ebollizione (crisi della trasmissione del calore e instabilità termoidrauliche) e dalle controreazioni neutro-

niche connesse ai forti gradienti di densità che si realizzano nel cambiamento di fase.

Tuttavia, l'importanza della termoidraulica dei fluidi bifase non è limitata soltanto ai reattori di tipo bollente, in cui il cambiamento di fase è deliberatamente voluto, ma a tutti i reattori a termovettore liquido, per i quali, pur non essendo presente in condizioni di funzionamento normale un cambiamento di fase, a parte una possibile ebollizione locale sulla superficie del combustibile, vanno comunque rispettati i limiti termoidraulici succitati. Inoltre, in questi reattori i fenomeni di cambiamento di fase giocano un ruolo determinante anche in tutte le condizioni accidentali derivanti da una eventuale rottura del circuito primario.

Per questo, nonostante che il processo di cambiamento di fase fosse utilizzato da lungo tempo, solo con l'avvento dei reattori esso è stato studiato con il necessario rigore e con dovizia di mezzi. Si è così acquisito un gran numero di conoscenze in proposito, ma la fenomenologia del processo è tanto complessa, che molti suoi aspetti debbono essere ancora chiariti completamente.

## 5.2. Inquadramento delle ricerche

Gli studi sulle miscele bifase hanno una lunghissima tradizione al CISE. Iniziati negli anni '50 per la messa a punto di colonne di distillazione per la separazione isotopica, proseguirono verso la fine di quel decennio nell'ambito del programma di ricerca e sviluppo del già ricordato reattore CIRENE.

Questo è un reattore moderato ad acqua pesante, alimentato ad uranio naturale e raffreddato ad acqua leggera in cambiamento di fase. I canali di potenza sono costituiti da tubi a pressione contenenti il combustibile ed il fluido termovettore; i singoli canali sono inseriti a una vasca di acqua pesante e da questa sono termicamente isolati mediante un'intercedi-

ne gassosa ed un tubo d'isolamento. I canali di potenza sono alimentati ad acqua leggera leggermente sottoraffreddata; raggiunte ben presto le condizioni di saturazione, l'acqua inizia a bollire, producendo quantità crescenti di vapore, che raggiungono, all'uscita dal canale, titoli in peso del 20÷30%. La miscela così prodotta viene separata in un corpo cilindrico: il vapore passa direttamente in una turbina, mentre l'acqua, miscelata con quella proveniente dal condensatore, opportunamente preriscaldata, viene ricircolata all'ingresso dei canali di potenza. Dal punto di vista termoidraulico il canale di potenza CIRENE è quindi un vero e proprio canale bollente.

Negli ultimi anni importanti ricerche sono state condotte al CISE anche nel campo dei reattori bollenti di tipo americano (BWR), al fine di facilitare la progettazione termoidraulica dei relativi canali di potenza, che sono abbastanza diversi da quelli di un reattore CIRENE.

Tutte queste attività sono state effettuate quasi esclusivamente su commesse CNEN. Nel periodo considerato si è sviluppata con un ritmo progressivamente crescente tutta una serie di ricerche che possono così schematicamente suddividersi: studi dei meccanismi di base, termoidraulica stazionaria dei fluidi bifase, termoidraulica dei fluidi bollenti in condizioni dinamiche (grandi transitori di pressione, portata o potenza) relativamente ai problemi di sicurezza.

Attualmente i problemi di sicurezza sono quelli che maggiormente impegnano la ricerca nel campo nucleare, sia per la gravità dei rischi potenziali derivanti da un incidente ad un impianto nucleare di grande potenza, sia perché le conoscenze nel campo dei transitori di grande entità erano fino a qualche anno fa abbastanza limitate. Pertanto anche le ricerche termoidrauliche condotte al CISE negli ultimi anni si sono concentrate sugli aspetti di sicurezza.

Fin dall'inizio l'attività sperimentale ha assunto un ruolo fondamentale. Più recentemente, con il sistematizzarsi delle conoscenze, è stata impostata e progressivamente potenziata anche un'attività di modellistica teorica.

L'attività sperimentale nei suoi diversi aspetti – impostazione, esecuzione ed interpretazione – è stata sempre svolta in modo globale ed integrato. Ciò significa, in particolare, che l'insieme delle attrezzature sperimentali utilizzate – impianti, canali di potenza e strumentazione – è stato progettato e realizzato integralmente al CISE. A questo proposito va sottolineato che, pur non essendo stata sottovalutata l'utilità di piccoli impianti sperimentali per studi di base e ricerche di carattere preliminare, l'impegno maggiore è stato dedicato alla realizzazione di grandi impianti, perché solo con questi era possibile ottenere risultati sperimentali sufficientemente significativi ai fini del progetto.

Ciò comportava anche la realizzazione di sezioni di prova che, da un lato, simulassero il più possibile le condizioni del canale di potenza effettivo e, dall'altro, fossero dotate di strumentazione opportuna per rilevare le grandezze d'interesse. Anche in questa direzione è stato effettuato uno sforzo non indifferente, tenuto conto – tra l'altro – che la necessità di adottare il riscaldamento elettrico delle barre per simulare il calore nucleare determina non piccole difficoltà di progetto. Inoltre, un'attività di rilievo è stata quella relativa alla realizzazione ed allo sviluppo di nuove tecniche sperimentali, che hanno consentito, in alcuni casi, l'acquisizione di risultati del tutto originali.

Sono da menzionare, infine, altri tre tipi di ricerche, che per certi riguardi presentano una problematica non molto dissimile da quella prima delineata per le ricerche termoidrauliche. Si tratta di quelle relative rispettivamente allo sviluppo di un attuatore per la regolazione del reattore CIRENE, detto « barra bifase » (v. par. 5.7), allo studio sperimentale della dinamica dello scarico rapido del moderatore, previsto

come sistema di arresto rapido del reattore CIRENE (v. fig. 4), ed alla determinazione degli effetti idrodinamici della rottura esplosiva di un tubo a pressione all'interno della vasca di acqua pesante del CIRENE stesso (v. par. 5.8).

Una caratteristica saliente delle ricerche termoidrauliche è rappresentata dal fatto che il loro collegamento con le esigenze di progetto è stato più integrato di quanto solitamente avvenga in simili ricerche finalizzate, in quanto il personale del CISE impegnato nel progetto del reattore CIRENE proveniva in buona parte dai gruppi di ricerca termoidraulica. Assai marcata è anche l'interazione con i laboratori mondiali che svolgono ricerche simili. Lo scambio di informazioni e di risultati è da tempo istituzionalizzato da accordi ad hoc e da riunioni periodiche, che si svolgono in modo molto efficace ed informale.

I risultati ottenuti sono sintetizzabili da correlazioni di carattere generale, da criteri di progetto, dalla messa a punto e relative convalide di modelli di calcolo. A titolo d'esempio, si può ricordare come il vasto sforzo di ricerca sul fenomeno della crisi termica abbia consentito di ottenere una correlazione, valida sia in condizioni stazionarie che dinamiche, che ha avuto risonanza anche in campo internazionale.

Quantunque le ricerche di termoidraulica al CISE siano state essenzialmente focalizzate sulla problematica dei fluidi bollenti, non si esclude la possibilità, se richiesto, di effettuare analoghe ricerche anche nel campo dei sistemi ad acqua in pressione. In effetti, importanti esperienze in tal senso sono già state effettuate per reattori ad acqua pressurizzata di tipo canadese. In conclusione, si può affermare che l'insieme delle conoscenze acquisite, delle competenze esistenti e delle attrezzature disponibili nel campo della termoidraulica dei fluidi bollenti e bifase pongono il CISE in una posizione di ri-



Fig. 4 - Modello a scala ridotta (1:4) della vasca del reattore CIRENE, utilizzato per lo studio della dinamica dello scarico rapido del moderatore (previsto come sistema di arresto rapido del reattore).

lievo nel contesto internazionale e di chiara preminenza in quello nazionale.

### 5.3. Tipiche ricerche di termoidraulica

Un resoconto completo di tutte le attività sperimentali svolte dal CISE nel campo termoidraulico risulterebbe eccessivamente ampio; pertanto ci si limita qui alla descrizione di alcune diverse esperienze tipiche, che possano dare un'idea dei diversi problemi affrontati.

#### *Esperienze di distribuzione delle fasi e della velocità in miscele bifase*

Si vogliono determinare in un flusso bifase adiabatico i parametri caratteristici del moto, e

precisamente la distribuzione radiale della velocità delle due fasi e la loro frazione volumetrica puntuale. A tale scopo viene usata una sonda isocinetica, cioè un tubicino che, posto nella direzione del moto, preleva una piccola frazione di miscela, in modo tale da non disturbare il moto. Si ottengono le portate puntuali di liquido o gas che, unite alla misura di innalzamento di pressione quando la sonda viene fatta funzionare come tubo di Pitot, forniscono i parametri voluti. Si sono ottenuti questi dati sia a freddo con miscela acqua-argo, sia a caldo con miscela acqua-vapore. I risultati servono a dare un'idea delle modalità del moto bifase, in quanto la complessità dei fenomeni che lo caratterizza, rispetto al caso del moto monofase, non consente di ottenere leggi o correlazioni di carattere generale.

#### *Esperienze di potenza critica*

In sistemi bollenti esiste un valore critico della potenza trasmissibile dalla parete riscaldante al fluido, al di sopra del quale si verifica un brusco abbassamento dei coefficienti di trasmissione del calore. Nel caso di un elemento di combustibile nucleare ciò provocherebbe un intollerabile innalzamento della temperatura della parete. Per la misura di questa potenza in un canale CIRENE sono stati costruiti fasci di 18 barre del diametro di 2 cm, lunghi 4 m, riscaldati elettricamente con corrente continua e posti entro un tubo a pressione in cui fluisce l'acqua bollente.

Le barre sono suddivise su due corone, ciascuna caratterizzata da un diverso valore di potenza per barra. Nel caso reale si ha anche una distribuzione non uniforme di potenza in direzione assiale; questa caratteristica non viene però simulata nell'esperienza, perché da altre e più semplici esperienze è risultato come agli effetti della potenza critica ciò sia di scarsa importanza. I tubi sono strumentati con termocoppie poste a contatto della superficie interna. Fis-

sata una portata d'ingresso e la sua entalpia, solitamente corrispondente ad acqua sottoraffreddata, si aumenta progressivamente la potenza finché una termocoppia rivela un brusco innalzamento della temperatura di barra; a questo punto si interrompe automaticamente la potenza ed il valore corrispondente rappresenta la potenza critica. Per pressioni nell'intorno di 50 bar e per portate specifiche comprese tra 200 e 3000 kg/m<sup>2</sup>s si sono ottenute potenze critiche comprese tra 1 e 6 MW per l'intero fascio.

#### *Esperienze di svuotamento (« blow-down »)*

In ogni reattore l'incidente ipotetico più grave è costituito dalla rottura di una tubazione principale del circuito primario; si ha in questo caso una perdita di refrigerante, con conseguente riduzione dell'asportazione di calore dalle barre di combustibile. Per simulare questo incidente per il reattore CIRENE è stato realizzato un canale di potenza a piena scala con il relativo circuito di ricircolazione, e cioè corpo cilindrico, pompe e tubazioni di collegamento. Una tipica esperienza consiste nell'aprire improvvisamente, mentre il circuito è in funzione, una valvola rapida a clapet (v. par. 5.6), che collega il corpo cilindrico con l'atmosfera. Si ha un rapido transitorio termoidraulico, di cui vengono registrati, nei vari punti del circuito, gli andamenti di pressione, caduta di pressione, temperatura e portata (finché il fluido rimane liquido). Ad un certo istante, azionando delle valvole rapide a saracinesca (vedi ancora par. 5.6), si seziona in più parti il circuito e si misura, mediante spillamento, la quantità di fluido in esse contenuto: si ottiene così una misura di massa, che è il parametro fondamentale per la descrizione del fenomeno. Ripetendo ora il transitorio dall'inizio e variando l'istante in cui si opera il sezionamento del circuito, si ricava l'andamento delle masse nel tempo. Si tratta di un'esperienza assai complessa e laboriosa, i cui risultati vengono utiliz-

zati per confermare la validità di programmi di calcolo che descrivono l'intero sistema.

Come tecnica complementare all'impiego di valvole rapide, è previsto l'impiego di una sonda ad impedenza (v. par. 5.6) per la misura locale del grado di vuoto.

#### *Esperienze di raffreddamento d'emergenza*

In seguito ad un incidente di perdita di refrigerante, le barre di combustibile si riscalderebbero adiabaticamente fino a raggiungere temperature che sarebbero intollerabili per l'integrità meccanica delle barre stesse. Per evitare ciò, entra in funzione un sistema d'emergenza che inietta acqua fredda a bassa pressione all'ingresso dei canali di potenza; il contatto tra l'acqua fredda ed una superficie surriscaldata (tipicamente nell'intervallo tra 700 e 900 °C) determina l'instaurarsi di meccanismi che impediscono il rapido raffreddamento delle barre. Per studiare questi fenomeni è stato realizzato un canale di potenza a piena scala, geometricamente simile a quello utilizzato per le prove di potenza critica ma costruttivamente diverso, al fine di simulare anche la capacità termica delle barre di combustibile. Le barre vengono riscaldate adiabaticamente fino ad una temperatura prefissata, comunque non superiore ai 900 °C, dopodiché viene iniettata acqua fredda all'ingresso del canale, con una velocità di qualche centimetro al secondo. I valori di temperatura di barra mostrano tipicamente un andamento nel tempo abbastanza complesso, che dipende - tra l'altro - dal transitorio di temperatura delle superfici delle barre vicine e del tubo a pressione; comunque la temperatura discende lentamente, finché ad un certo valore si ha un brusco aumento del coefficiente di trasmissione del calore, che porta rapidamente la temperatura di parete ad un valore prossimo a quello dell'acqua (temperatura di bagnamento). Per « bagnare » l'intero fascio occorrono tempi che arrivano a 30 min (vedi fig. 5).

Fig. 5 - Tipico transitorio di temperatura di parete di una barra simulante la barra di combustibile del reattore CIRENE, rilevato in 8 punti della stessa durante un'esperienza di raffreddamento di emergenza (a), e corrispondente andamento del coefficiente di scambio termico (b). Elemento anulare: diametri, 2,0-2,75 cm; lunghezza, 400 cm. Parametri sperimentali: portata specifica, 5 g/cm<sup>2</sup>s; temperatura del refrigerante, 35 °C; pressione, 1 ata; potenza, 9 kW. Lo schema a fianco dei grafici mostra la disposizione delle termocoppie lungo la barra. Ciascuna curva è contraddistinta dal numero della termocoppia corrispondente.

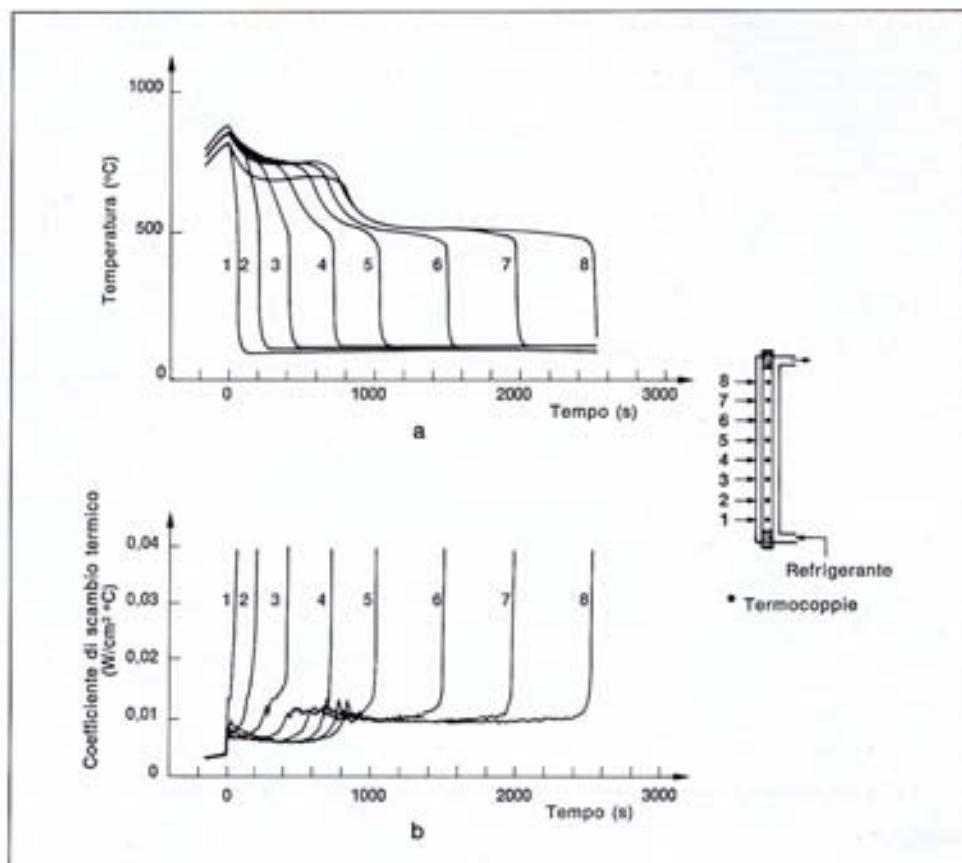
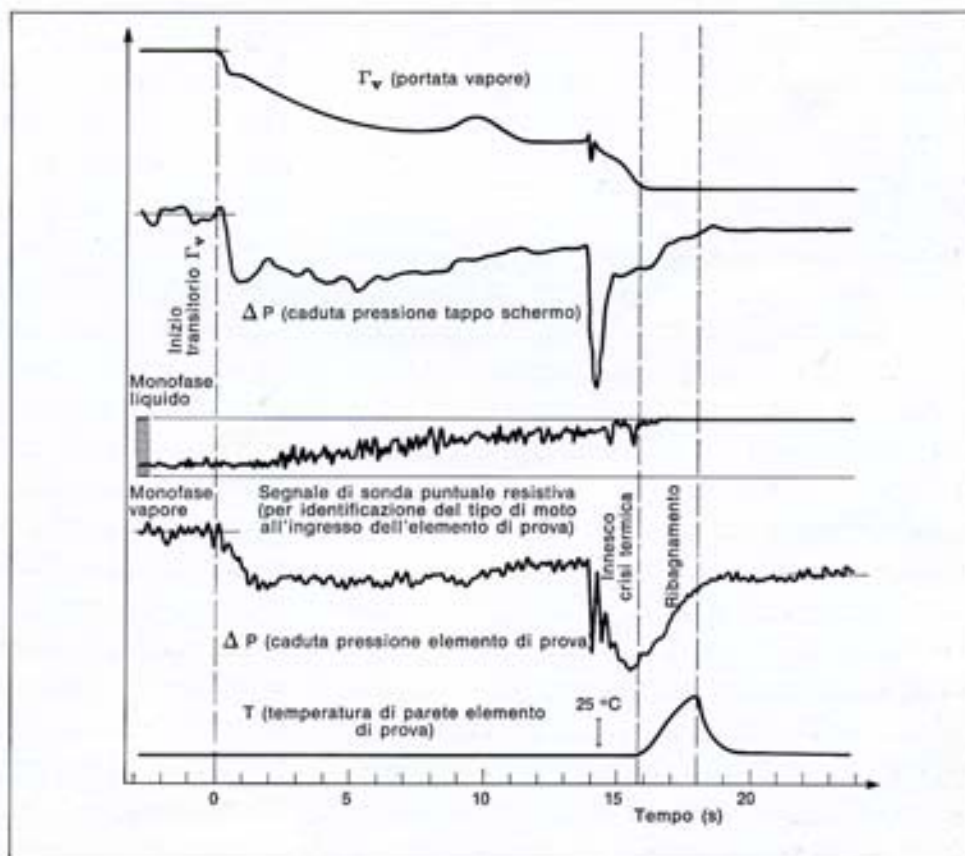


Fig. 6 - Studio sperimentale, effettuato sul circuito CIRCE (v. fig. 15), di un transitorio termoidraulico di un canale di potenza CIRENE: la figura fornisce un esempio di registrazione delle principali grandezze in funzione del tempo (portata di vapore, caduta di pressione sul tappo schermo, segnale della sonda puntuale resistiva, caduta di pressione sull'elemento di prova, temperatura di parete dell'elemento di prova).



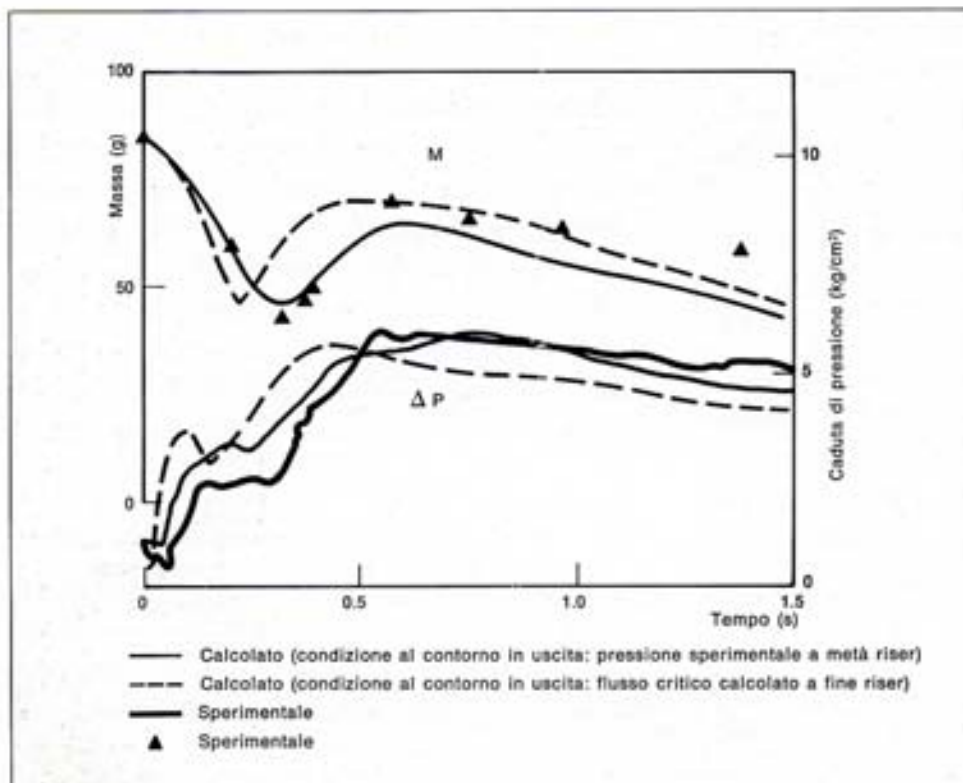


Fig. 7 - Tipico confronto tra i risultati sperimentali e quelli ricavati con il programma di calcolo RATT-1 (RAPidi Transitori Termoidraulici-1), relativi ad esperienze di svuotamento (blow-down) di canali di potenza in condizioni termoidrauliche simili a quelle di un canale CIRENE e che danno i transitori del contenuto in massa e della caduta di pressione relativi al tratto riscaldato del canale di potenza.

Un altro esempio di tipiche ricerche sperimentali sulle miscele bifase è dato dagli studi di stabilità del moto all'avviamento e ai carichi ridotti per il reattore CIRENE (vedi fig. 6).

#### 5.4. Programmi di calcolo

Per un'analisi critica dei dati sperimentali ottenuti da esperienze come quelle sopra descritte, e per una migliore comprensione fisica dei complessi fenomeni studiati, si rende necessario lo sviluppo di adeguati programmi di calcolo, l'utilizzazione dei quali si estende, peraltro, ben al di là di tale analisi. Infatti, una volta che di tali programmi sia stata provata l'affidabilità (mediante confronti sistematici tra risultati del calcolo e risultati delle esperienze), essi vengono a costituire, per il loro carattere di generalità, da un lato un ausilio prezioso per l'individuazione dei fenomeni che necessitano di un approfondimento di indagine e per l'impostazione delle esperienze, dall'altro un potente mezzo di previsione per il progettista di sistemi

nei quali hanno luogo i processi descritti dai programmi stessi.

Nell'ambito termoidraulico sono stati sviluppati al CISE alcuni programmi di calcolo, di cui ci si limita qui a citare i due più recenti, denominati RATT (RAPidi Transitori Termoidraulici) e TRAFEM (Transitorio RAFFreddamento EMergenza).

Obiettivo principale del RATT è la descrizione del comportamento termoidraulico, in sistemi in cui tale comportamento può essere significativamente descritto in termini monodimensionali, del fluido termovettore ad acqua leggera (nelle condizioni di liquido sottoraffreddato, miscela bollente e vapore surriscaldato), in regimi transitori, specie del tipo di quelli che si verificano in reattori a tubi a pressione a seguito di incidenti di perdita del refrigerante dal circuito primario (vedi le già citate esperienze di svuotamento e fig. 7).

L'impostazione data allo sviluppo del RATT ha mirato a produrre un programma di calcolo



Fig. 8 - Circuito IDRA (IDRodinamica Adiabatica) per esperienze di fluidodinamica (misure di perdite di carico e frazioni di vuoto, taratura di strumenti di misura, ecc.) con miscele a due componenti a temperatura ambiente in condizioni stazionarie. Il circuito è stato anche utilizzato per lo studio dell'elemento di combustibile CIRENE.





Fig. 9 - Circuito IETI-1 (Impianto Esperienze Termoidrauliche-1), per esperienze termoidrauliche su piccola scala con acqua bollente o in pressione, sia in condizioni stazionarie che in transitorio. È situato presso la Centrale termoelettrica Emilia dell'ENEL di Piacenza. Nella foto, è visibile il tratto del circuito in cui vengono inseriti gli elementi di prova (anuli o tubi) che simulano le barre di combustibile.

assai flessibile che consenta, tra l'altro, di includere, per ciascuno dei principali fenomeni coinvolti, più modelli opzionali, e che si presti alla modifica o sostituzione di modelli e/o correlazioni relative a fenomeni singoli con semplici e rapidi interventi.

Per questi suoi aspetti, il programma RATT, pur essendo sviluppato per il reattore CIRENE, può essere utilizzato anche per i reattori BWR e PWR. Nell'attuale versione, RATT-1, la parte più qualificante è costituita dal modello fluidodinamico e dal metodo di soluzione adottato per le equazioni in cui esso si traduce. Per il regime bollente tale modello è ad equilibrio termodinamico e a scorrimento tra le fasi. Il metodo di soluzione adottato è quello alle differenze finite (centrali nello spazio e all'indietro nel tempo), di tipo implicito, incondizionatamente stabile e pertanto con possibilità di scelta dei passi di integrazione, sia spaziale che temporale, condizionata solo dall'accuratezza del calcolo.

Il programma TRAFEM ha lo scopo di studiare i transitori termoidraulici connessi con la fase di iniezione di refrigerante dal basso nei canali di un reattore nucleare, in condizioni di alta temperatura sulle guaine e bassa pressione nel circuito primario.

Il modello di calcolo risolve i bilanci di massa e di energia delle fasi acqua e vapore in condizioni quasi stazionarie, tenendo conto del disequilibrio termodinamico tra le fasi. I bilanci sopra menzionati permettono di calcolare punto per punto nel canale e in funzione del tempo, mediante opportuni modelli fisici, i coefficienti di scambio termico tra refrigerante e guaina e l'avanzamento del fronte di bagnamento sulle guaine stesse.

Il TRAFEM viene impiegato per l'analisi dei risultati sperimentali ottenuti in condizioni simulate di raffreddamento di emergenza, e ciò allo scopo di mettere a punto i modelli fisici dei singoli fenomeni di trasmissione del calore e di ribagnamento presenti in queste condizioni.

## 5.5. Gli impianti termoidraulici sperimentali

Gli impianti sperimentali attualmente funzionanti al CISE per esperienze di termoidraulica sono cinque, e precisamente: IDRA, IETI-1, REM, IETI-4, CIRCE.

L'impianto IDRA è un impianto a freddo per miscele liquido-gas a due componenti; tutti gli altri sono impianti a caldo, ad acqua bollente o in pressione. Tali impianti a caldo sono localizzati all'interno della centrale termoelettrica Emilia dell'ENEL a Piacenza. Questa localizzazione permette di poter disporre agevolmente di vapore surriscaldato proveniente dalle caldaie della centrale, e di elevate potenze elettriche da utilizzare, tra l'altro, in modo discontinuo; inoltre, per l'impianto CIRCE l'edificio della centrale consente di sviluppare il circuito su un'altezza di 30 m, che è uguale a quella del circuito del reattore CIRENE che esso deve simulare.

Gli impianti a caldo non sono completamente indipendenti tra loro, soprattutto per quanto riguarda sia l'alimentazione elettrica che alcune parti idrauliche.

Questa interdipendenza è presente tra i circuiti IETI-1 e REM e tra lo IETI-4 ed il CIRCE: ciò significa che solo uno dei primi due e solo uno dei secondi possono funzionare contemporaneamente.

*Circuito IDRA (IDRodinamica Adiabatica) (v. fig. 8).*

Esso è destinato ad esperienze di fluidodinamica con miscele a due componenti a temperatura ambiente in condotti anche a piena scala.

L'impianto ha una pressione massima di funzionamento di 22 bar ed utilizza, come fase gassosa, l'argo (che ha un volume specifico a 22 bar all'incirca uguale a quello del vapore a 70 bar) o l'azoto e, come fase liquida, l'ac-

Fig. 10 - Schema di principio del circuito IETI-1 (v. fig. precedente).

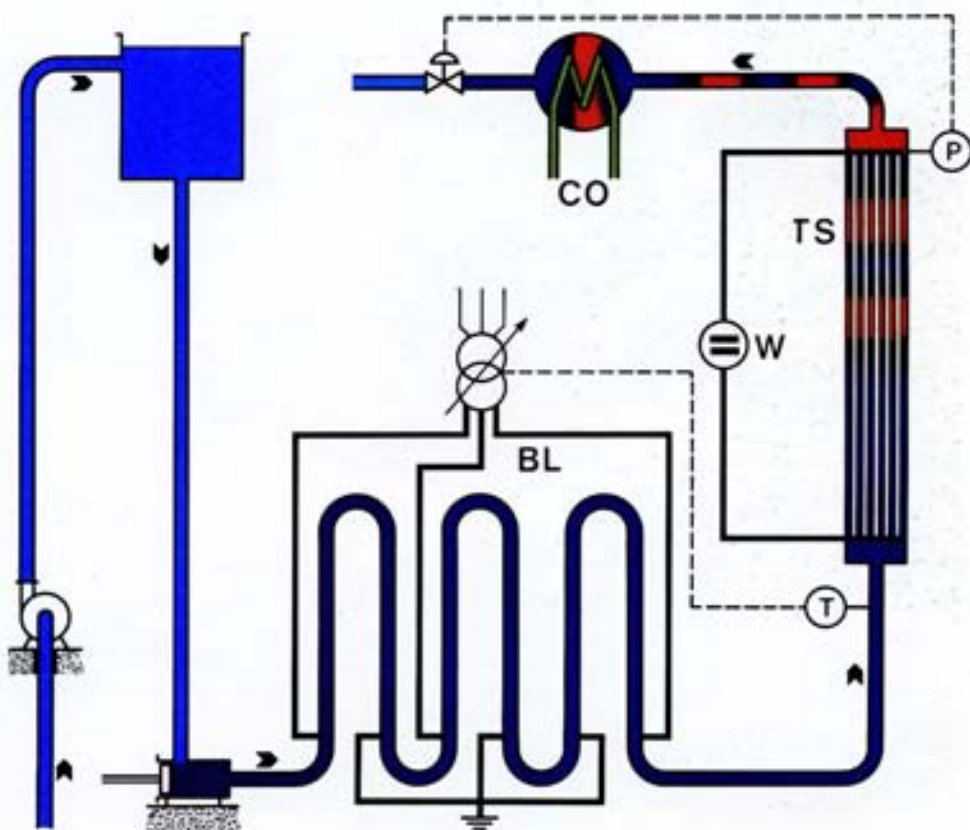
### PRESTAZIONI (AL CANALE DI PROVA)

Pressione: 245 bar  
Temperatura: 430 °C  
Portata acqua: 0,8 kg/s  
Potenza: 320 kW

### LEGGENDA

TS - sezione di prova  
W - alimentazione elettrica  
BL - caldaia elettrica  
CO - condensatore

■ Acqua A.P.  
■ Acqua B.P.  
■ Vapore A.P.  
■ Acqua servizi



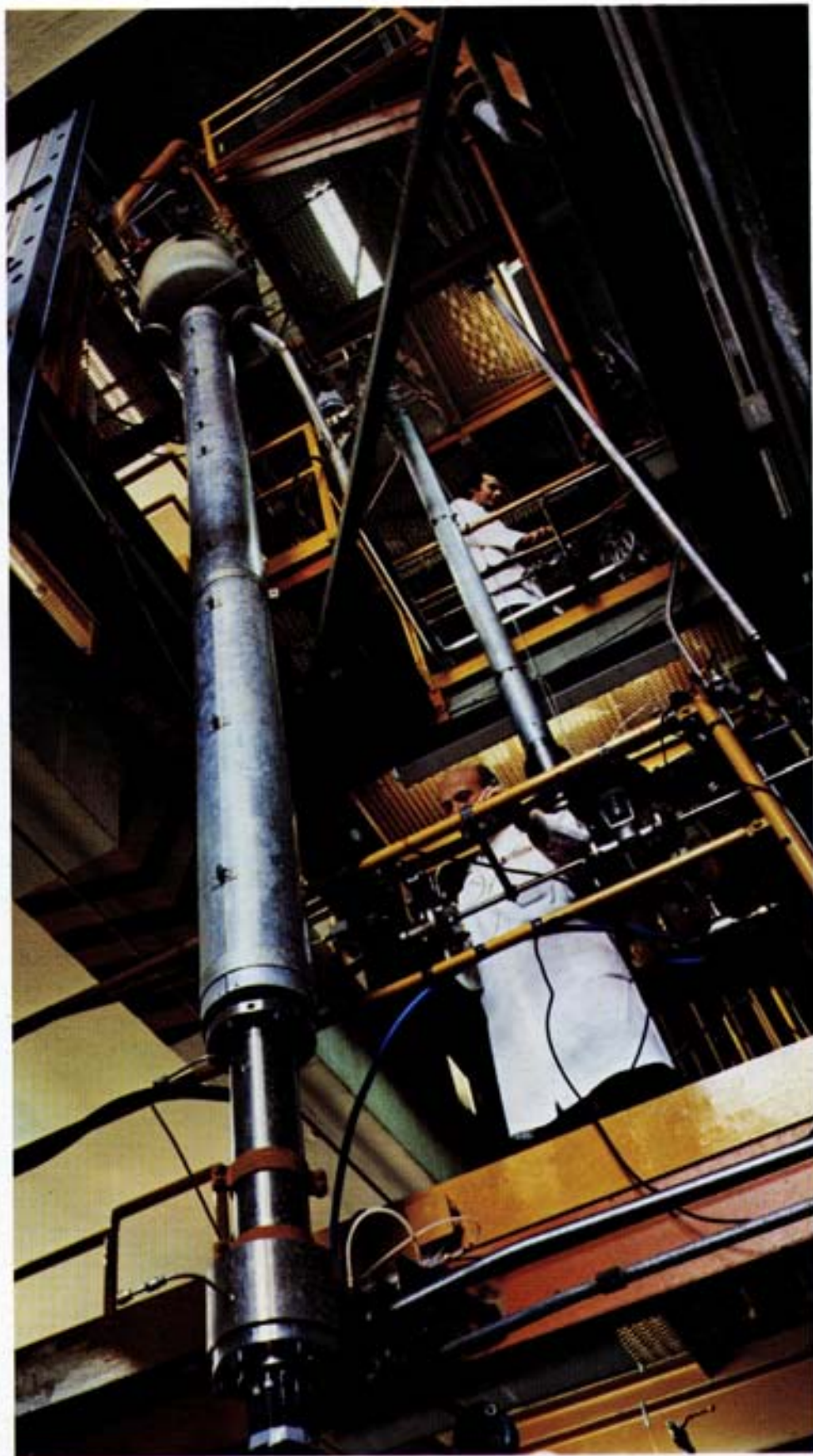


Fig. 11 - Circuito REM (Raffreddamento EMergenza), specificamente realizzato per esperienze, a piccola ed a piena scala, di raffreddamento di emergenza di canali di potenza del reattore CIRENE mediante allagamento dal basso. Esso è situato presso la Centrale termoelettrica Emilia dell'ENEL di Piacenza. Nella foto, si nota in primo piano l'elemento di prova, che simula a piena scala il canale di potenza del reattore CIRENE.

qua o l'acetone (per particolari scopi possono essere presi in considerazione altri fluidi).

Le ricerche effettuate su miscele bifase riguardano: misure di perdite di carico, di densità, di distribuzione di fase e velocità all'interno di condotti, di fluttuazioni di pressione, di vibrazioni di fasci di barre, etc., nonché lo sviluppo e taratura di apparecchi speciali di misura. Le esperienze vengono effettuate in condizioni stazionarie: è possibile utilizzare sezioni e complessi di prova trasparenti, il che risulta particolarmente utile per la osservazione delle configurazioni del moto e di particolari effetti di ombra (scie provocate, ad esempio, da distanziatori tra le barre).

*Circuito IETI-1 (Impianto Esperienze Termoidrauliche-1) (v. figg. 9 e 10)*

È un impianto a molti scopi, cioè per esperienze termoidrauliche a piccola scala con ac-

qua bollente o in pressione, sia in condizioni stazionarie che in transitorio. Questo impianto è in funzione dal 1959, ma ha subito nel tempo numerose modifiche e miglioramenti. Lo IETI-1 ha giocato un ruolo fondamentale per le ricerche condotte al CISE, in quanto, per le sue caratteristiche di flessibilità di funzionamento, di facilità di misura delle grandezze d'interesse e di contenutezza delle dimensioni, ha consentito e consente tuttora di svolgere una mole enorme di esperienze, che sono servite sia alla comprensione dei meccanismi di base, che alla messa a punto delle esperienze a piena scala da effettuare sugli impianti termoidraulici di grande potenza (IETI-4 e CIRCE).

Le misure effettuate in miscele bollenti riguardano: potenza critica, perdite di carico, densità, coefficiente di trasmissione del calore, instabilità termoidrauliche, etc.. Lo schema d'impianto dello IETI-1 è del tipo aperto: acqua

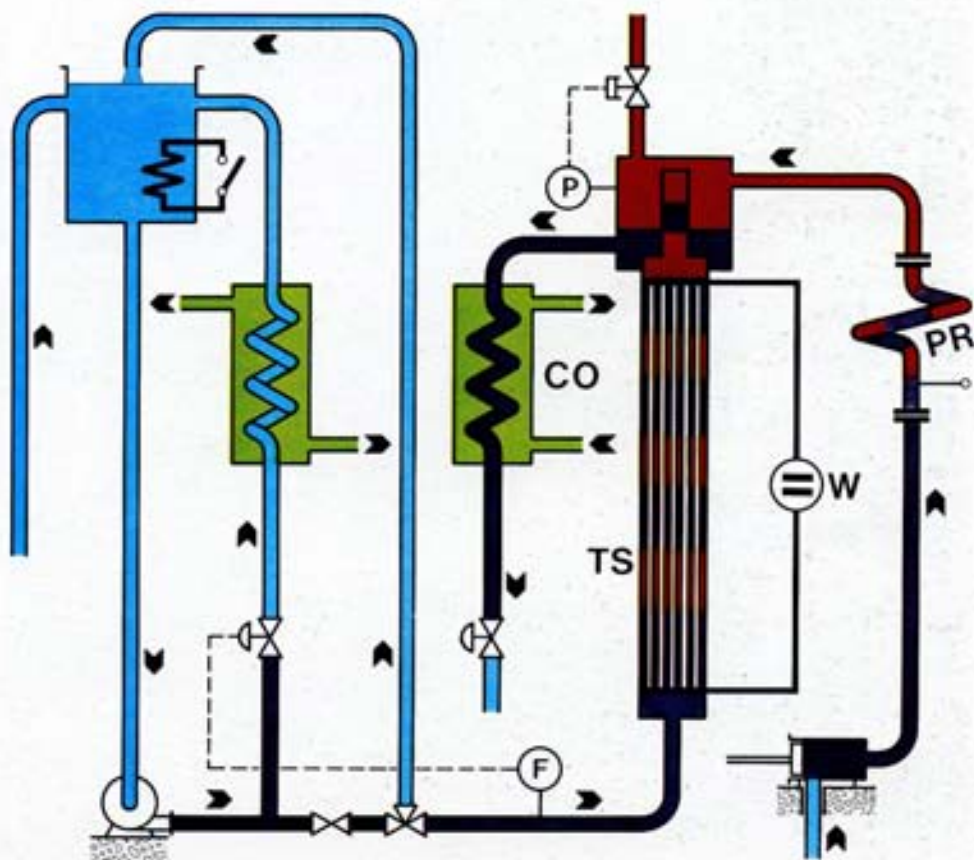
Fig. 12 - Schema di principio del circuito REM (v. fig. precedente).

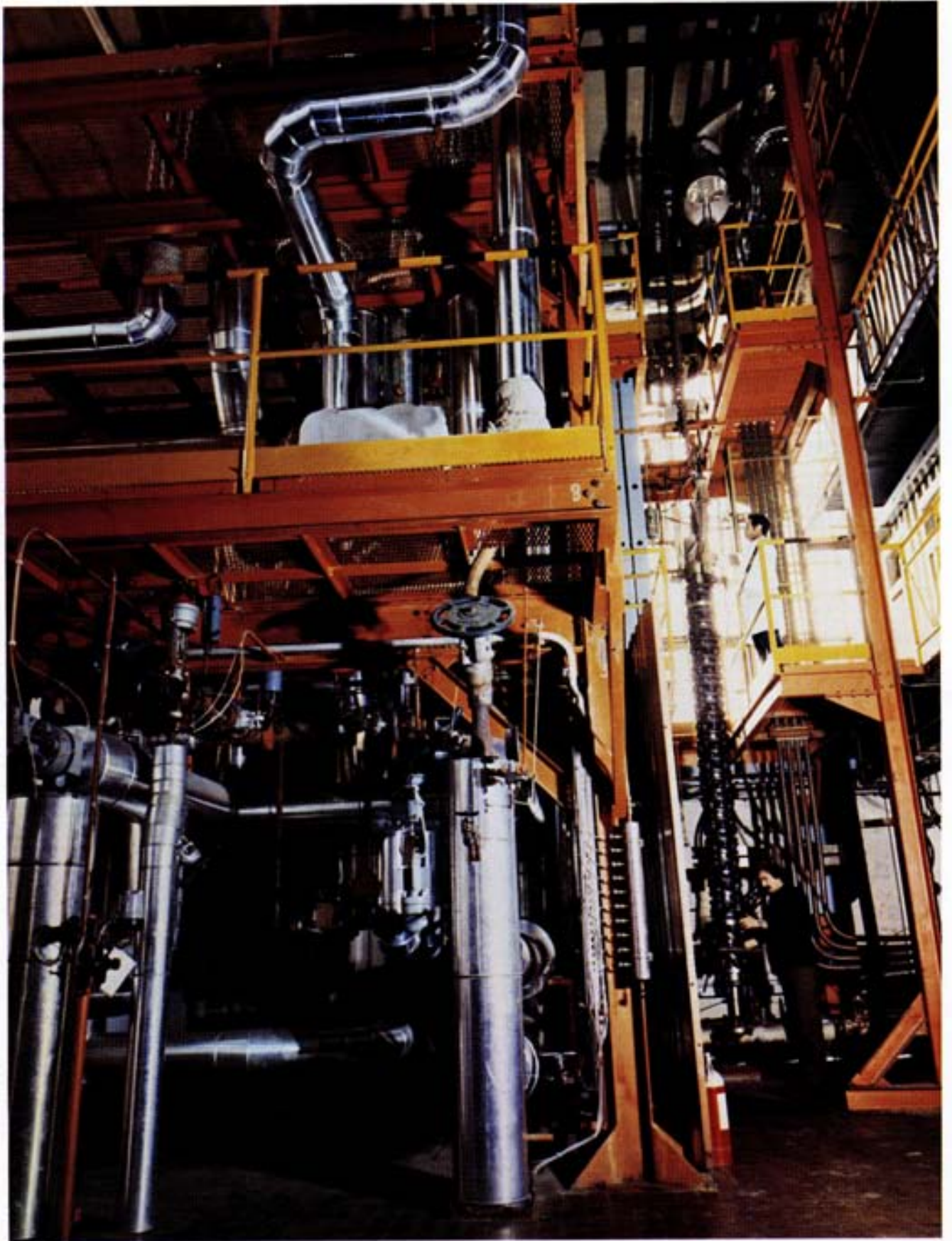
**PRESTAZIONI  
(AL CANALE DI PROVA)**  
Pressione: 20 bar  
Temperatura: 100 °C  
Portata acqua: 2,8 kg/s  
Potenza: 320 kW

**LEGGENDA**

TS - sezione di prova  
W - alimentazione elettrica  
CC - corpo cilindrico  
CO - condensatore  
PR - pressurizzatore

■ Acqua A.P.  
■ Acqua B.P.  
■ Vapore A.P.  
■ Acqua servizi





◀ Fig. 13 - Circuito IETI-4, per esperienze termoidrauliche, nel quale sono simulabili canali di potenza del tipo CIRENE a piena scala e del tipo BWR o PWR a scala significativa. Gli elementi di prova vengono riscaldati con due generatori elettrici in corrente continua, della potenza massima complessiva di 12 MW. Il circuito è situato presso la Centrale termoelettrica Emilia dell'ENEL di Piacenza. Nella foto, veduta parziale del circuito; sulla destra è visibile un elemento di prova simulante a piena scala il canale di potenza del reattore CIRENE, all'atto della sua installazione nel circuito.

fredda demineralizzata proveniente da un serbatoio viene dapprima compressa ad alta pressione (fino ad un massimo di 250 bar) con due pompe volumetriche, e poi passa in una caldaia elettrica monotubolare per essere portata all'entalpia voluta, corrispondente sia a condizioni sottoraffreddate che bollenti; l'acqua, o la miscela acqua-vapore, entra quindi nella sezione di prova, dopodiché viene condensata e raffreddata, poi depressurizzata mediante una valvola che controlla la pressione del circuito ed

infine scaricata nel sistema di trattamento e di recupero.

*Circuito REM (Raffreddamento EMergenza) (v. figg. 11 e 12)*

È stato specificamente costruito per effettuare esperienze a piccola e a piena scala di raffreddamento d'emergenza di canali di potenza del CIRENE mediante allagamento dal basso. Il suo schema di principio è il seguente: un serbatoio d'acqua, fornito di un riscaldatore elettrico per portare l'acqua fino ad un massimo di 100 °C, è collegato con una pompa centrifuga che inietta l'acqua direttamente sul fondo della sezione di prova; sono previste delle linee di bypass per effettuare le azioni di controllo necessarie; all'uscita della sezione di prova c'è un separatore di vapore, che è collegato con un pressurizzatore per ottenere pressioni di funzionamento fino a 10 bar.

Fig. 14 - Schema di principio del circuito IETI-4 (v. fig. precedente).

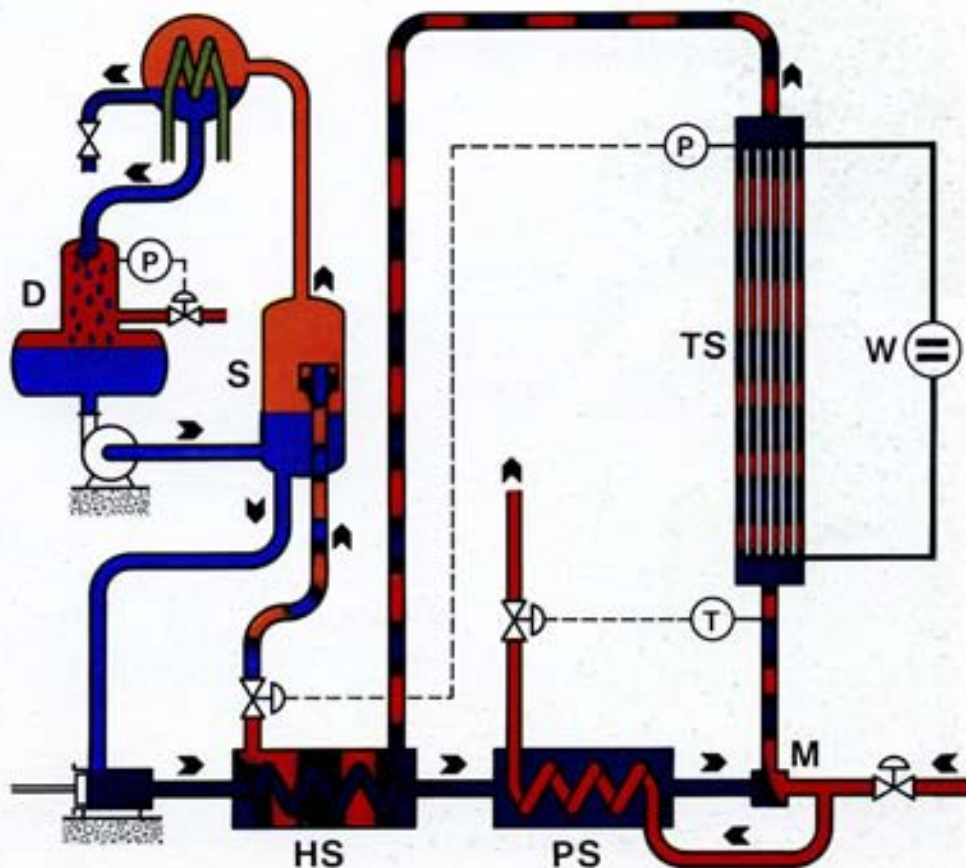
PRESTAZIONI  
(AL CANALE DI PROVA)

Pressione: 245 bar  
Temperatura: 420 °C  
Portata acqua: 13,4 kg/s  
Portata vapore: 3,3 kg/s  
Potenza: 11,2 MW

LEGGENDA

TS - sezione di prova  
W - alimentazione elettrica  
D - degasatore  
S - separatore  
HS - scambiatore  
PS - preriscaldatore  
M - miscelatore

■ Acqua A.P.  
■ Acqua B.P.  
■ Vapore A.P.  
■ Vapore B.P.  
■ Acqua servizi





◀ Fig. 15 - Circuito CIRCE (CIRENE Reactor Circuit Experiment), specificamente realizzato per investigare transitori di perdita di refrigerante del reattore CIRENE. Nel CIRCE si può simulare il transitorio sull'intero circuito di ricircolazione con due canali di potenza a piena scala del tipo CIRENE. Il CIRCE è situato presso la Centrale termoelettrica Emilia dell'ENEL di Piacenza, ed è servito dallo stesso impianto elettrogenatore da 12 MW utilizzato per lo IETI-4.

### Circuito IETI-4 (Impianto Esperienze Termo-Idrauliche-4) (v. figg. 13 e 14)

Questo impianto, come pure il già citato CIRCE, descritto più oltre, serve per effettuare esperienze a grande scala: sono simulabili su di esso canali di potenza tipo CIRENE a piena scala e tipo BWR o PWR a scala significativa. Con modifiche non sostanziali che sono già state programmate sarà possibile sperimentare anche un canale BWR a piena scala (64 barre). Lo IETI-4, recentemente entrato in funzione, sostituisce lo IETI-3, che qui non viene de-

scritto perché, quantunque tuttora in funzione, è destinato ad essere smantellato. Esso è stato realizzato completamente ex-novo e - rispetto allo IETI-3 - la sua principale differenza nelle specifiche di progetto riguarda la pressione di funzionamento, che passa da 80 a 245 bar; pertanto con lo IETI-4 sono possibili esperienze in condizioni ipercritiche. Su questo impianto sono effettuabili tutte le esperienze già effettuate sullo IETI-3; esse coincidono praticamente con quelle già indicate per lo IETI-1.

Lo schema d'impianto è aperto idraulicamente, ma chiuso dal punto di vista termico (c'è uno scambiatore-recuperatore di calore tra il ramo di uscita del canale di prova e quello d'entrata). L'acqua, prelevata da un degasatore, è pressurizzata ed inviata alla zona di preriscaldamento mediante due pompe volumetriche in parallelo. Essa subisce un primo preriscaldamento mediante il già citato scambiatore-recuperatore; un ulteriore preriscaldamento può essere otte-

Fig. 16 - Schema di principio del circuito CIRCE (v. fig. precedente).

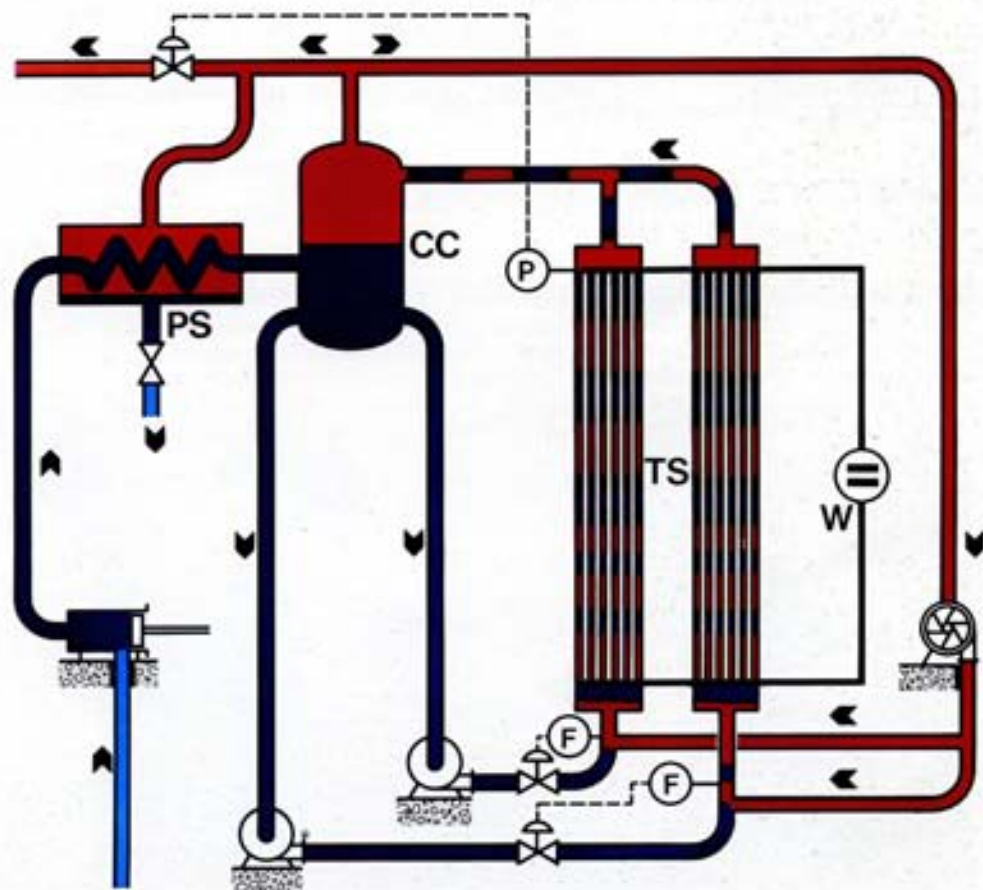
#### PRESTAZIONI (AL CANALE DI PROVA)

Pressione: 69 bar  
 Temperatura: 285 °C  
 Portata acqua: 22 kg/s  
 Portata vapore: 3,5 kg/s  
 Potenza: 11,2 MW

#### LEGGENDA

TS - sezione di prova  
 W - alimentazione elettrica  
 CC - corpo cilindrico  
 PS - preriscaldatore

■ Acqua A.P.  
 ■ Acqua B.P.  
 ■ Vapore A.P.  
 ■ Vapore B.P.





nuto in un altro scambiatore, alimentato da vapore surriscaldato proveniente dalle caldaie degli impianti termoelettrici. Se occorre una miscela acqua-vapore all'ingresso del canale, si può miscelare con l'acqua parte di questo vapore surriscaldato; in queste condizioni la massima pressione di funzionamento non può superare i 157 bar, in quanto la massima pressione delle caldaie è di 167 bar. Il fluido preriscaldato va poi all'ingresso del canale di prova e all'uscita di questo passa nello scambiatore-recuperatore; infine viene depressurizzato attraverso una valvola che controlla la pressione dell'impianto. Il fluido depressurizzato è inviato in un separatore: il vapore passa in un condensatore e, da qui, tramite un serbatoio di stoccaggio, al degasatore; l'acqua viene aspirata da una pompa ed inviata direttamente all'aspirazione delle pompe di alimento. Lo IETI-4 è costruito in acciaio legato e basso-legato.

Le sezioni di prova dello IETI-4, come pure quelle del CIRCE, vengono riscaldate da due generatori elettrici in corrente continua, della potenza massima complessiva di 12 MW.

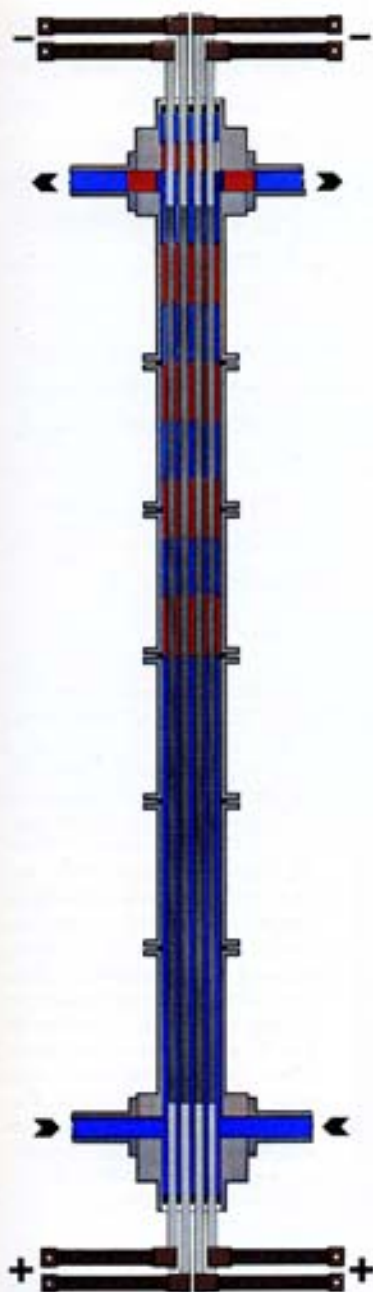
*Circuito CIRCE (CIRENE Reactor Circuit Experiment (v. figg. 15 e 16).*

È un impianto specificamente realizzato per

investigare transitori di perdita di refrigerante del reattore prototipo CIRENE. Mentre negli impianti IETI-1 e IETI-4 i transitori sperimentati riguardano il canale di prova e le tubazioni d'ingresso e d'uscita, nel CIRCE si può simulare il transitorio sull'intero circuito di ricircolazione con due canali di potenza a piena scala (il reattore prototipo CIRENE ha 60 canali di potenza). Lo schema di principio consiste in due circuiti chiusi, interconnessi mediante un unico corpo cilindrico, e ogni circuito comprende il tubo di discesa (downcomer) dal corpo cilindrico e la pompa centrifuga di ricircolazione, la linea di mandata delle pompe, la tubazione d'alimentazione del canale di potenza (feeder), il canale di potenza ed infine il tubo di collegamento al corpo cilindrico (riser). Anche se lo schema attuale è condizionato da quello del reattore CIRENE, è possibile con piccole modifiche adattare il CIRCE ad altre configurazioni circuitali. Il vapore, separato nel corpo cilindrico, viene mandato alla analoga linea dello IETI-4, dove viene depressurizzato e condensato. L'impianto CIRCE è equipaggiato anche con un compressore di vapore centrifugo, che è collegato ad ambedue le linee d'ingresso dei canali di potenza. Il circuito è interamente costruito in acciaio inossidabile AISI 304.



Fig. 17 - Elemento di prova a fascio di 16 barre (tubolari) che simula un canale di potenza BWR con relative testate (il tubo a pressione è stato tolto per rendere visibile il fascio). Elementi di questo tipo vengono impiegati per esperienze di potenza critica e di svuotamento. La generazione di potenza viene ottenuta per effetto Joule, alimentando ciascuna barra con corrente continua. Le barre sono strumentate internamente con termocopie.



◀ Fig. 18 - Disegno schematico dell'elemento di prova per esperienze termoidrauliche, visibile nella fig. precedente. Il refrigerante entra dal basso sotto forma di acqua ed esce dall'alto sotto forma di miscela acqua-vapore. Le barre vengono riscaldate elettricamente (con corrente continua) per simulare la produzione di calore di origine nucleare.

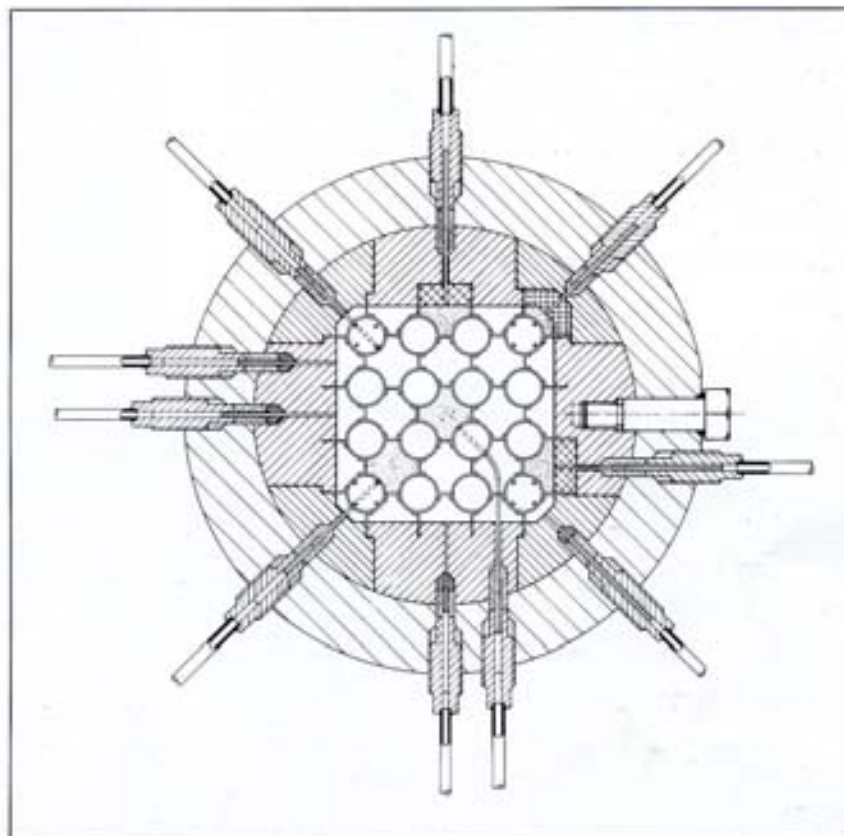


Fig. 19 - Sezione trasversale di un elemento di prova simile a quello rappresentato nella figura precedente, in corrispondenza del dispositivo per il prelievo, in condizioni isocinetiche, del refrigerante fluente nei diversi sottocanali. Detto dispositivo viene utilizzato per la determinazione delle portate ed entalpie dei singoli sottocanali. Si notano, in particolare, le prese di pressione per il controllo delle condizioni isocinetiche.

## 5.6. Sezioni di prova e dispositivi speciali

Tra i vari dispositivi sperimentali realizzati al CISE per le attività di termoidraulica si illustrano, a titolo di esempio, un elemento a fascio di barre, una valvola a chiusura (e/o apertura) rapida ed una sonda ad impedenza.

Un elemento a fascio di barre – sia che simuli a piena scala un canale di potenza CIRENE o

a scala ridotta un elemento di combustibile tipo BWR – può essere suddiviso nelle seguenti parti: tubo a pressione, fascio di barre, testate.

La generazione di potenza nel fascio di prova viene ottenuta per effetto Joule, alimentando ciascuna barra con corrente continua (che può arrivare fino ad un massimo di circa 2000 A). Ciò comporta la necessità di isolare elettricamente le barre dal tubo a pressione, di dotare

le barre di appositi terminali ad alta conducibilità elettrica per la loro connessione ai generatori di potenza, ed infine di permettere libere dilatazioni termiche alle singole barre.

Per quanto riguarda il primo punto, la soluzione adottata consiste nella suddivisione del tubo a pressione in parecchi spezzoni flangiati ed elettricamente isolati l'uno dall'altro mediante guarnizioni di Klingerit: viene così evitato ogni corto circuito fascio-tubo attraverso le griglie metalliche distanziatrici delle barre (vi è una sola griglia per spezzone), o attraverso contatti accidentali delle barre col tubo, provocati da un eventuale loro incurvamento durante le prove a potenza.

Ogni barra del fascio è costituita, nella sua parte attiva (riscaldata), da un tubo (ad alta resistività elettrica, in acciaio inossidabile o Inconel) di spessore costante o variabile (in relazione al profilo assiale di potenza desiderato) e, nelle sue parti inerti (le estensioni elettriche esterne), da tubi di rame di grosso spessore, inguainati in tubi a parete sottile dello stesso materiale della parte attiva, alla quale essi sono saldati. Questi terminali fuoriescono dalla sezione di prova attraversando le testate (ingresso/uscita), entro cui possono scorrere longitudinalmente a tenuta su O-ring di etilene-propilene. Le dimensioni geometriche dei fasci di prova finora realizzati sono di massima le seguenti:

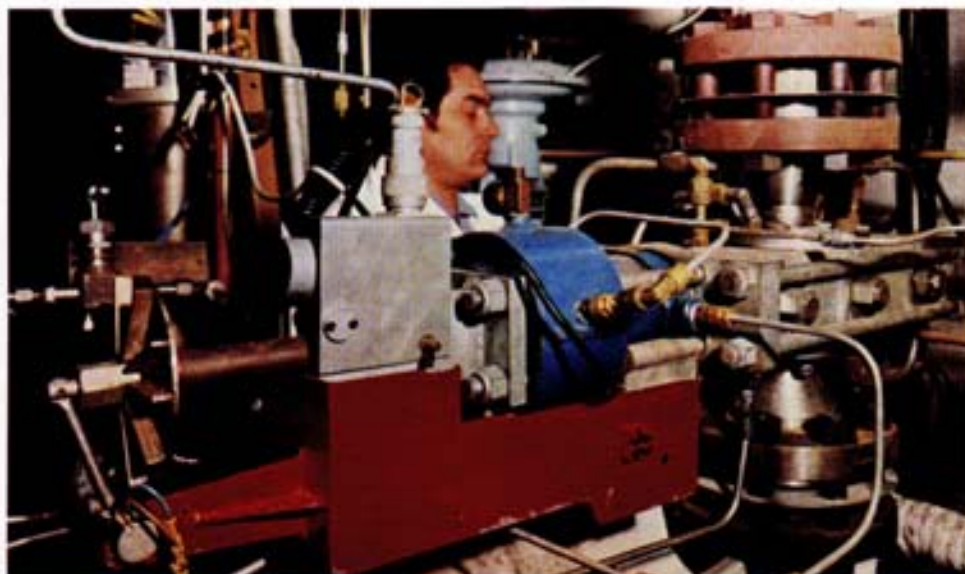


Fig. 20 - Un esemplare della valvola rapida a saracinesca, appositamente progettata e costruita per le esperienze di svuotamento (blow-down) dei canali di potenza del tipo CIRENE e per misure di densità della miscela acqua-vapore fluente nei canali stessi. L'otturatore è azionato da un attuatore pneumatico ad alta pressione. Questa valvola è caratterizzata da un tempo di apertura di pochi ms. Vari altri esemplari di tali valvole sono stati forniti all'Atomic Energy of Canada Ltd. per esperienze analoghe inerenti al reattore CANDU-BLW (affine al CIRENE).

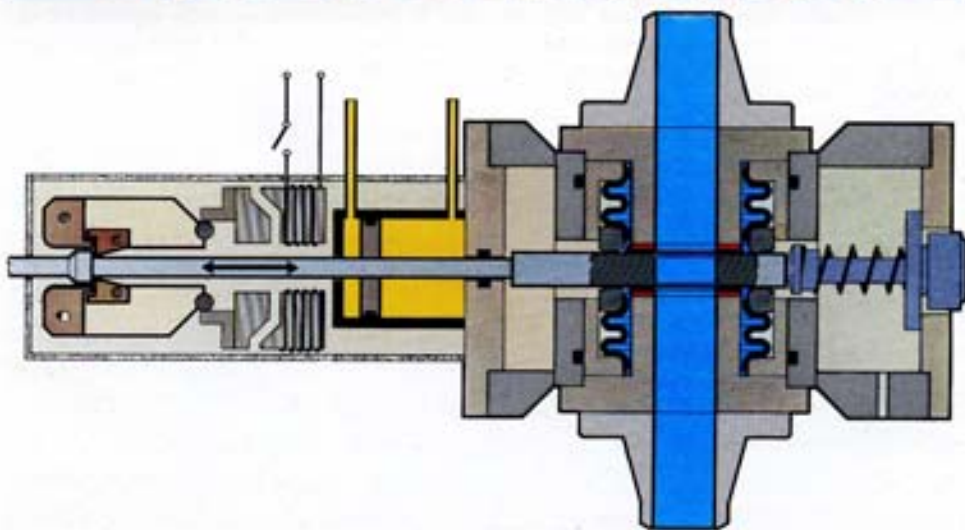


Fig. 21 - Disegno schematico di una valvola rapida a saracinesca analoga a quella mostrata nella figura precedente.

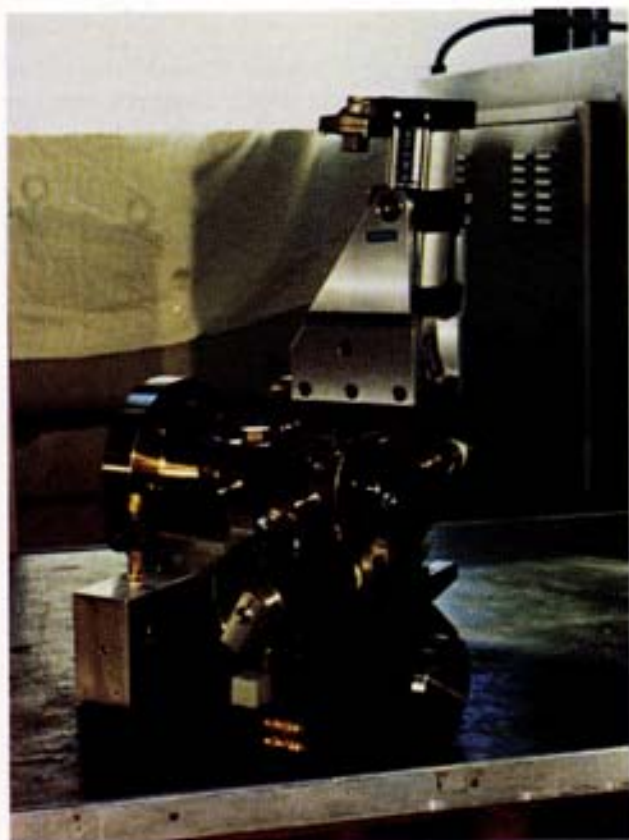


Fig. 22 - Un esemplare della valvola rapida a clapet, impiegata congiuntamente alla valvola rapida a saracinesca (v. fig. 20) per esperienze e misure dello stesso tipo. Alcuni esemplari di tali valvole sono stati forniti al Centro Euratom di Ispra per esperienze analoghe inerenti ai reattori PWR.

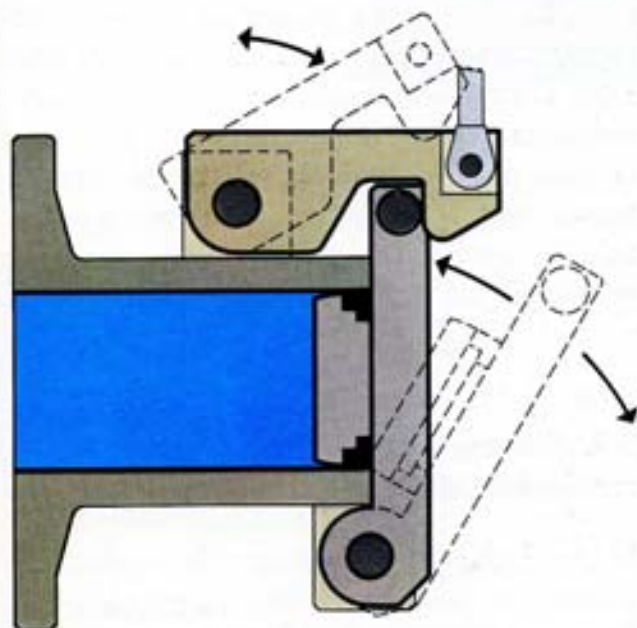


Fig. 23 - Disegno schematico della valvola rapida a clapet mostrata nella figura precedente.

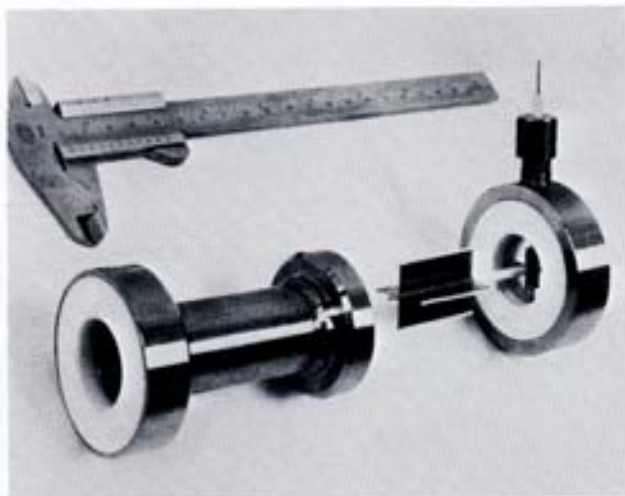


Fig. 24 - Una delle diverse geometrie previste per la sonda ad impedenza usata per la misura della frazione volumetrica locale (o grado di vuoto) di una miscela bifase fluente in un canale di potenza come fluido termovettore. Tale sonda è destinata ad essere impiegata nell'ambito delle prove di svuotamento (blow-down) con il suddetto scopo.

diametro delle barre	$10 \div 20$ mm
diametro o lato dell'involucro del fascio	$80 \div 106$ mm
lunghezza riscaldata delle barre	$1600 \div 6000$ mm
intercapedine barra-barra e barra-tubo a pressione	$1 \div 4$ mm
numero delle barre	$7 \div 36$

Tutte le barre sono strumentate con termocoppie installate internamente al tubo in corrispondenza di diverse sezioni. Particolarmente onerosa e complessa è la realizzazione della strumentazione per rilevare la temperatura delle barre durante l'esperienza. In fig. 17 è visibile un elemento a fascio di barre; la fig. 18 ne dà il disegno schematico e la fig. 19 il disegno della sezione trasversale.

La valvola ad azione rapida (chiusura e/o apertura), progettata e realizzata dal CISE (v. figg. 20 e 21) funziona sul principio della valvola a saracinesca, con attuatore pneumatico ad alta pressione. Il corpo della valvola consiste di una camera pneumatica entro la quale la saracinesca

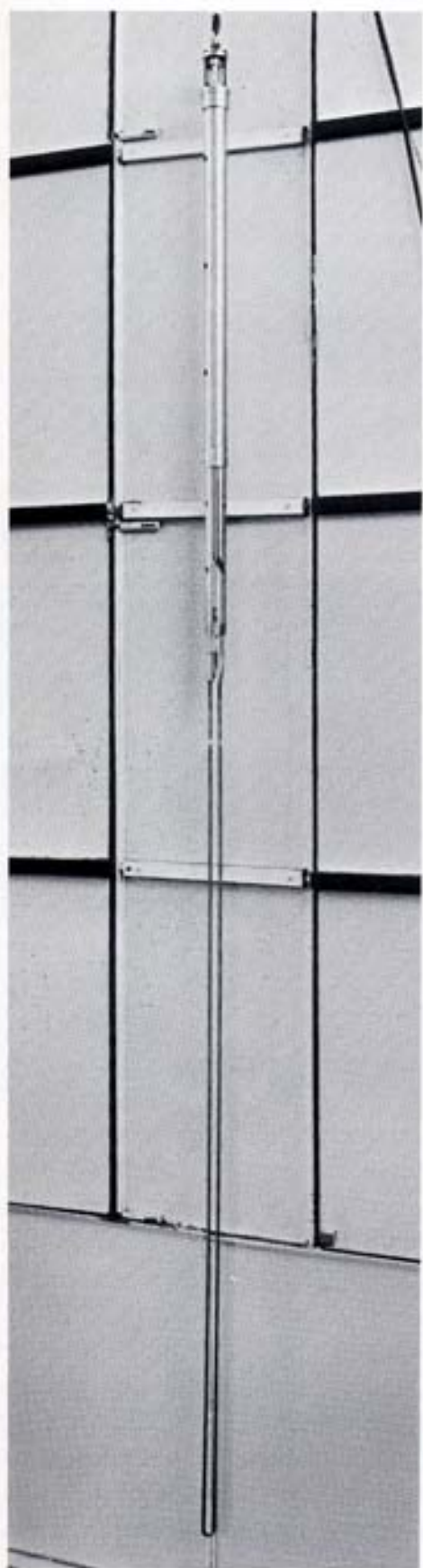


Fig. 25 - Prototipo in scala reale di una barra bifase per la regolazione del reattore CIRENE, costruito per acquisire un'esperienza nella soluzione dei notevoli problemi tecnologici presentati dalla realizzazione di tale dispositivo.

sca, guidata lateralmente, si muove. La tenuta è assicurata su entrambi i lati della saracinesca, in modo simmetrico, da anelli di teflon-grafite (contenuti perifericamente da anelli di bronzo), tenuti premuti sulla saracinesca da O-ring di gomma. Apposite camere sono ricavate nel corpo della valvola per permettere una circolazione d'acqua fredda atta a limitare la temperatura di esercizio del sistema di tenuta.

Valvole di questo tipo sono state realizzate ed estesamente impiegate con luci di passaggio fino a 50 mm di diametro e per le seguenti condizioni di esercizio: pressione, fino a 70 bar; temperatura, 300 °C; tempi di chiusura, 10 ÷ 20 ms.

Un altro tipo di valvola rapida, pure progettata e realizzata al CISE, consiste nella valvola a clapet (v. figg. 22 e 23). L'impiego delle suddette valvole è descritto nel par. 5.3.

La sonda ad impedenza (v. fig. 24) viene usata per misurare la frazione volumetrica locale di vapore (grado di vuoto) di una miscela bifase fluente in un canale di potenza come fluido termovettore. Il metodo ad impedenza, sviluppato come resistivo, sfrutta la differenza di conducibilità elettrica delle due fasi della miscela. La sonda viene alimentata con corrente alternata a bassa frequenza e la caduta di tensione ai capi della sonda è proporzionale alla resistenza elettrica della stessa, che a sua volta dipende dalla quantità e distribuzione (tipo di moto) con cui le due fasi partecipano a costituire la miscela. Tale sonda è destinata ad essere impiegata nell'ambito delle esperienze di svuotamento (blow-down) (v. par. 5.3).

### 5.7. Sistema Barre Bifase per la regolazione del reattore CIRENE

In molti reattori è richiesta una regolazione automatica continua del flusso neutronico. Per il reattore prototipo CIRENE è stato progettato e sviluppato al CISE un organo attuatore

Fig. 26 - Impianto prototipo Barre Bifase per la regolazione fine della potenza neutronica di un reattore tipo CIRENE, realizzato per esperienze di controllo sul reattore RB-3 del CNEN di Montecuccolino (Bologna). La regolazione avviene attraverso la variazione di densità di una miscela bifase (acqua borata-gas), che scorre entro una tubazione inserita nel nocciolo (barra di controllo). Nella foto sono visibili il serbatoio a bassa pressione, le valvole di comando delle portate di liquido alle barre ed i sistemi di regolazione dell'impianto.



della regolazione in reattore, detto « Barra Bifase » (v. fig. 25). Con tale sistema, che costituisce un'originale applicazione delle conoscenze sviluppate al CISE nel campo delle miscele bifase, la regolazione rapida della potenza neutronica è ottenuta mediante variazione di densità di una miscela bifase assorbente, costituita da acqua borata ed ossigeno, fluente in un tubo ad U disposto verticalmente nel nocciolo. Per la messa a punto del sistema è stato necessario eseguire un lungo programma di ri-

cerca teorico-sperimentale, mentre la verifica della sua funzionalità ha richiesto la costruzione di un impianto prototipo presso il reattore a potenza zero RB3 del CNEN di Bologna-Montecuccolino (v. fig. 26). Su tale impianto sono state eseguite molte prove, volte soprattutto alla determinazione delle caratteristiche di funzionamento in condizioni dinamiche (funzioni di trasferimento) sia dei componenti singoli, sia del sistema di regolazione nel suo complesso.



Fig. 27 - L'impianto BETULLA, situato presso il Centro Euratom di Ispra, è utilizzato per esperienze di scoppio del tubo a pressione del reattore CIRENE (esperienze miranti a determinare gli effetti di un incidente di quel tipo sulla struttura del nocciolo del reattore stesso). Tale incidente, quantunque ritenuto pressoché impossibile, viene ugualmente preso in considerazione nelle analisi di sicurezza del reattore. La foto mostra la piastra superiore del recipiente a pressione che simula la vasca del moderatore del CIRENE; sono visibili le estremità degli elementi passivi del reticolo e, al centro, la parte superiore dell'elemento di scoppio e quella dell'elemento strumentato.

### 5.8. Esperienze per lo studio degli effetti dello scoppio del tubo a pressione nel reattore CIRENE

Tra le attività svolte nell'ambito della sicurezza dei reattori nucleari - come si è detto - vanno annoverati anche gli studi a carattere prevalentemente sperimentale effettuati a partire dal 1970 per la determinazione degli effetti della rottura esplosiva di un tubo a pressione nel reattore CIRENE. Questo incidente, anche se ritenuto pressoché impossibile, deve nondimeno essere accuratamente considerato in tutte le sue conseguenze nelle analisi di sicurezza.

Le esperienze di scoppio sono state e vengono effettuate, presso il Centro Euratom di Ispra, sull'impianto BETULLA, appositamente attrezzato per questo tipo di prove (v. figg. 27 e 28).

Per ridurre al massimo le difficoltà d'extrapolazione dei risultati sperimentali al reattore CIRENE, è stata adottata fin dove possibile una rappresentazione in scala 1:1. In particolare, sono state riprodotte a piena scala le caratteristiche geometriche dei canali di potenza (diametri dei tubi, spessori e lunghezze). Non è stato invece possibile riprodurre esattamente

le dimensioni diametrali del reattore CIRENE, perché per le esperienze è stato utilizzato un recipiente a pressione a suo tempo costruito per altri studi, di diametro inferiore a quello della vasca del CIRENE. Si sono pertanto potuti inserire all'interno di questo recipiente, secondo la esatta disposizione reticolare, solo 32 simulacri di canali di potenza (contro i 60 canali di potenza del reattore CIRENE). La rappresentatività parziale così ottenuta è tuttavia ritenuta ugualmente significativa.

La strumentazione per il rilievo dei transitori di scoppio consiste di oltre 60 canali indipendenti di misura (pressioni, sforzi, deformazioni, temperature), i cui segnali sono memorizzati mediante registratori a nastro magnetico.

I transitori di pressione sono misurati mediante trasduttori di tipo piezoelettrico e piezoresistivo, opportunamente alloggiati nei componenti sottoposti allo scoppio. Sforzi e deformazioni vengono rilevati mediante estensimetri applicati nei punti di interesse. Per i segnali di temperatura sono utilizzate termocoppie appositamente approntate. Una particolare cura richiede la sistemazione dei cavi della strumentazione all'interno del recipiente entro cui avviene lo scoppio, soprattutto per evitare rotture o strappi ad opera delle onde di pressione. Per la memorizzazione dei segnali sono utilizzati vari registratori a nastro magnetico a modulazione di frequenza multitracce, di cui uno a 32 tracce. Per la successiva lettura di queste tracce si impiega una memoria digitale di transitorio, i cui dati possono essere direttamente inviati al tracciatore o ad un calcolatore numerico per ulteriori elaborazioni.

Nell'impianto Betulla sono state effettuate diverse decine di complesse prove di scoppio, di cui alcune con componenti praticamente identici ai canali di potenza del reattore CIRENE. L'esperienza accumulata riguardo a questo tipo di incidente, che è caratteristico, oltre che del CIRENE, di tutti gli altri tipi di reattori a tubi a pressione, moderati ad acqua pesante (come



Fig. 28 - Interno del recipiente a pressione dell'impianto BETULLA (v. fig. precedente) dopo una prova di scoppio: sono visibili la piastra inferiore del recipiente, gli elementi passivi del reticolo e - al centro - l'elemento di scoppio (nei suoi due componenti: tubo interno strumentato e tubo esterno, apertosi in conseguenza dello scoppio) con immediatamente affacciato un canale di potenza CIRENE completo di tubo di calandria e tubo a pressione. Si può notare come, in conseguenza dello scoppio, il tubo di calandria risulti collassato sul tubo a pressione ad esso interno, che peraltro è rimasto integro.

i già ricordati reattori canadesi CANDU e l'inglese SGHWR, nonché quello giapponese ATR - Advanced Thermal Reactor -) può dirsi sotto molti aspetti unica anche su scala mondiale. Le specifiche conoscenze acquisite nello svolgimento di questa particolare ricerca, e la notevole dotazione di apparecchiature per il rilievo e l'analisi di fenomeni transitori, costituiscono nel loro complesso una rilevante potenzialità per lo studio anche dei più complessi problemi di dinamica strutturale.



## 6. STUDI SUL COMBUSTIBILE NUCLEARE

### 6.1. Generalità

Fin dall'inizio degli anni '60 il CISE è impegnato in studi sul comportamento tecnologico di combustibili nucleari. Questi studi riguardarono originariamente la caratterizzazione di una prima versione del combustibile per il reattore CIRENE, che prevedeva l'impiego di uranio metallico, e permisero l'acquisizione di un notevole patrimonio di conoscenze sul suo comportamento sia in esercizio che in caso di difetto della incamiciatura e conseguente contatto uranio-acqua.

In seguito all'abbandono della versione ad uranio metallico, l'attività in questo campo venne concentrata sullo studio e messa a punto di

combustibile ceramico, costituito da pastiglie di ossido d'uranio, incamiciate da guaine in leghe di zirconio.

Dopo aver collaborato con il CNEN alla progettazione di massima degli elementi di combustibile CIRENE (vedi fig. 29), le cui caratteristiche principali sono riportate nella tab. 1, il CISE si è orientato in questo settore verso un'attività sperimentale di valutazione e caratterizzazione di questi elementi, anche attraverso prove globali, sia in reattore che fuori reattore.

### 6.2. Prove in reattore

Questa attività viene svolta al CISE su tutto

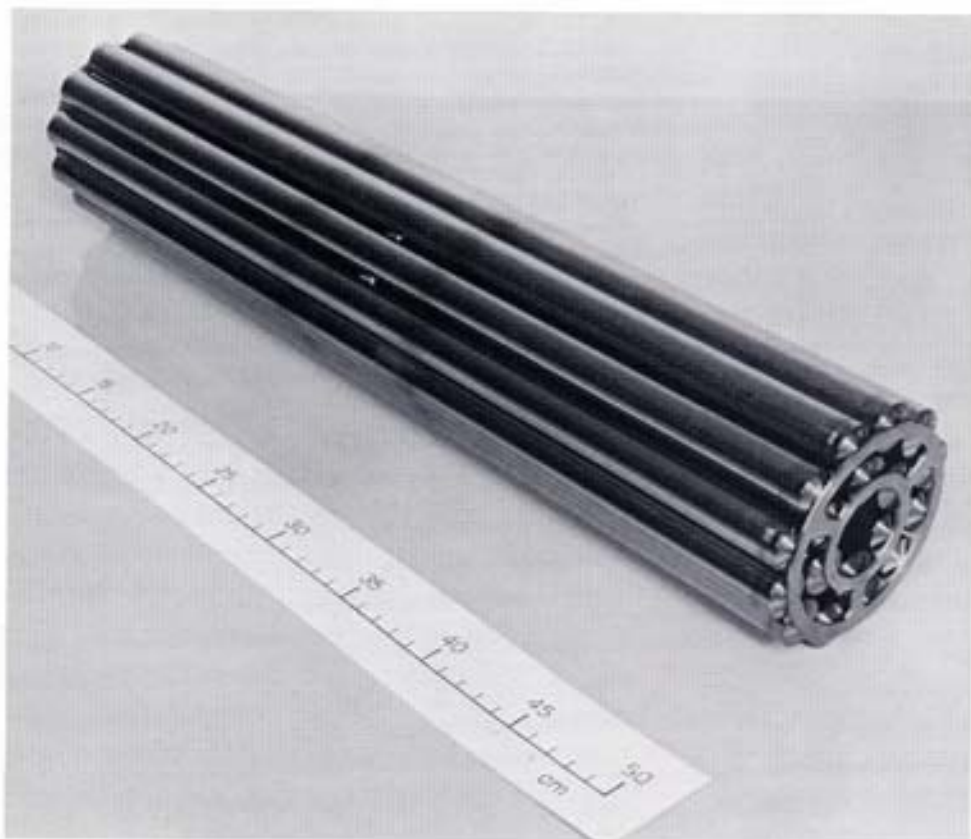


Fig. 29 - Il fascio di elementi di combustibile CIRENE, sviluppato dal Centro di Saggi del CNEN.

l'arco delle azioni necessarie: dall'impostazione dell'esperienza alla realizzazione delle attrezzature necessarie, dalla supervisione o dalla gestione diretta dell'esperienza stessa agli esami post-irraggiamento ed alla valutazione dei risultati.

Poiché il CISE non dispone di un reattore nucleare, le esperienze in reattore sono state svolte presso numerosi altri Centri, in Italia ed all'estero, fra cui quello della SORIN (Società Ricerche Impianti Nucleari) di Saluggia (con il reattore Avogadro), l'Institut For Atomenergi (IFA) di Halden (Norvegia) (con il reattore BHWB), ed il Centro Euratom di Ispra (con il reattore ESSOR).

Nell'ambito di questa attività sono stati pure realizzati gli impianti indispensabili per provare il combustibile nelle condizioni operative previste: in queste particolari realizzazioni, che possono in un certo senso essere considerate come un « sottoprodotto » degli studi sul combustibile, è stata acquisita al CISE una rilevante competenza (vedi par. 7.2).

Vanno inoltre citati lo sviluppo di strumentazione speciale per impiego in ambiente nucleare (vedi par. 6.4), e la realizzazione di apparecchiature speciali per esami post-irraggiamento, per la manipolazione del combustibile (par. 7.3) e per programmi di sorveglianza di componenti in nocciolo (par. 7.4).

A tutt'oggi il CISE ha svolto e svolge sperimentazioni in reattore su un notevole numero di elementi di combustibile, sia sotto forma di singole barrette, sia assiemati in fasci a piena scala. Nell'impianto CART (descritto nel par. 7.2) sono stati irraggiati finora 9 fasci CI-RENE a piena scala, distribuiti su tre diverse sezioni di prova. Le principali condizioni operative dei tre irraggiamenti sono riportate nella tab. 2.

È prevista la prosecuzione degli irraggiamenti su nuove sezioni di prova di tipo C-3 (CART-3) (v. figg. 30, 31, 32, 33, 34).

Queste esperienze hanno permesso l'acquisi-

TABELLA 1

CARATTERISTICHE PRINCIPALI  
DEL COMBUSTIBILE CI-RENE

A) CARATTERISTICHE GEOMETRICHE

*Pastiglie di UO<sub>2</sub>*

Diametro	18,7 mm
Altezza	18,5 mm
Densità	95 % T.D.

*Guaina (collassabile)*

Materiale	Zircaloy-2
Spessore minimo	0,51 mm

*Barra*

Diametro	20,0 mm
Gioco diametrale guaina- -pastiglia	0,14 ÷ 0,23 mm
Gioco assiale	3 mm
Volume gas plenum	2,75/0,85 cm <sup>3</sup> (*)
Lunghezza attiva	472,5/478 mm (*)

*Fascio*

Numero barre	18
Lunghezza	500 mm
Diametro massimo	104,5 mm
Spaziatura fra barrette	1,38 mm
Peso di combustibile	24,1 kg U

B) CARATTERISTICHE D'ESERCIZIO

Refrigerante	H <sub>2</sub> O in cambiamento di fase
Pressione ingresso canale	48 kg/cm <sup>2</sup>
N. fasci per canale	8
Massima temperatura esterna di guaina	280 °C
Integrale di conducibilità massima	46 W/cm
Potenza lineare massima per barra	586 W/cm
Flusso termico superficiale massimo	93 W/cm <sup>2</sup>
Burn-up medio	8000 MWd/tU

(\*) Valori relativi a barre esterne ed interne.

TABELLA 2  
IRRAGGIAMENTI SVOLTI SULL'IMPIANTO CART

Sezione di prova	Livello di irraggiamento medio raggiunto (MWd/tU)	Integrale di conducibilità massima	Rampe di potenza	Effetti rilevati
C1	1000	46	no	-
C2A	2500	49	no	Cedimento di una saldatura tappo-guaina
C2B	1800	35,5	si	Fessurazione di barre dopo rampe



Fig. 30 - Per la sperimentazione in reattore dell'elemento di combustibile CIRENE (v. fig. precedente), mediante l'impianto CART-TC (v. fig. 42), sono state sviluppate numerose sezioni di prova, delle quali la più sofisticata è quella tipo C-3 (CART-3), mostrata in figura. Caratteristiche peculiari di queste sezioni sono date dalla possibilità di rilevare la temperatura di guaina dei fasci di combustibile durante l'irraggiamento e di consentire la permutazione dei fasci per avere un tasso di bruciamento (burn-up) uniforme.

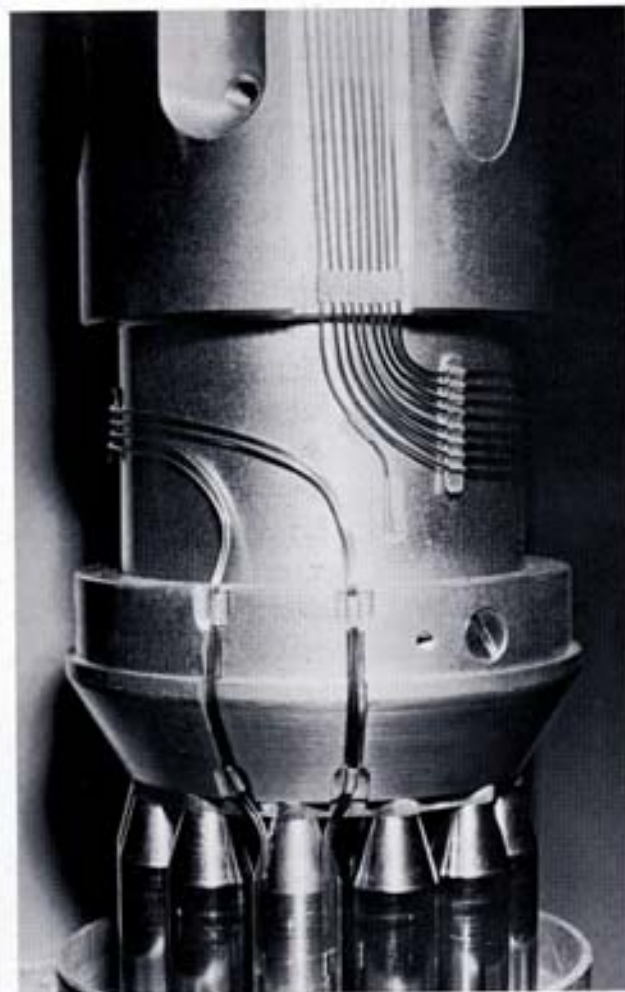


Fig. 31 - Particolare della sezione di prova C-3 mostrata nella fig. precedente, in corrispondenza della zona di transizione tra la parte attiva e la parte schermante: si notano i conduttori dei segnali della strumentazione applicata alle barre per il rilievo delle temperature.

Fig. 32 - La sezione di prova C-3 mostrata in fig. 30 viene alloggiata nel tubo a pressione visibile in questa figura, che simula a piena scala, per tutta la lunghezza corrispondente alla parte attiva del reattore ESSOR, il tubo a pressione del CIRENE: in particolare, esso presenta giunzioni mandrinare di transizione Zircaloy-2/acciaio, tipiche del CIRENE.

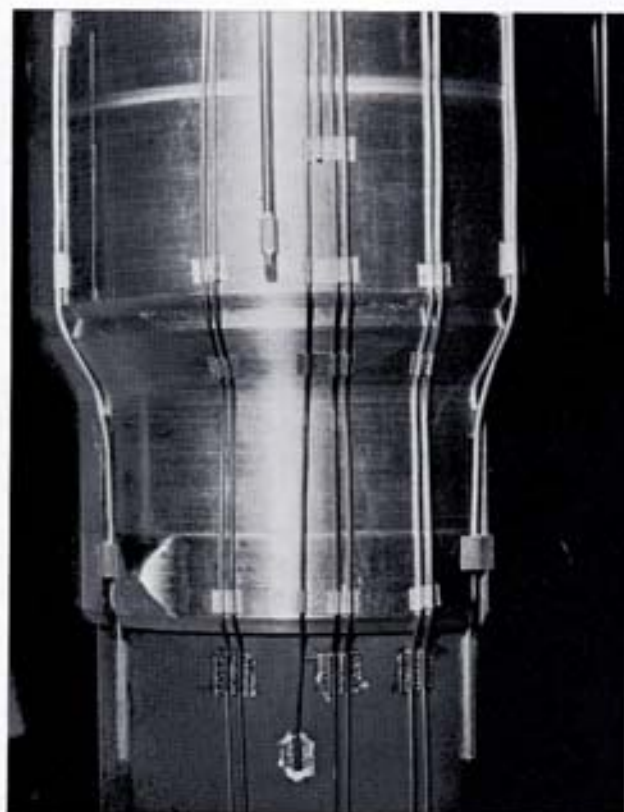
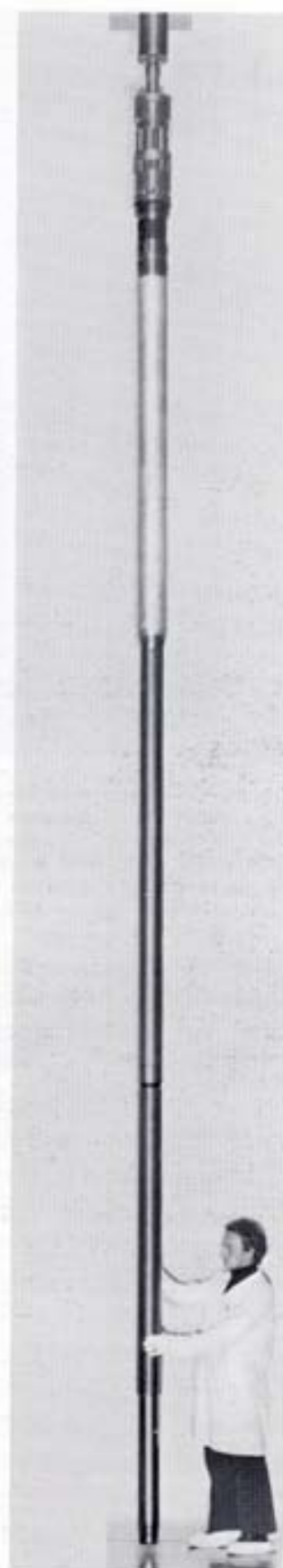


Fig. 33 - Particolare del tubo a pressione mostrato nella fig. precedente, in corrispondenza della giunzione mandrinata superiore: si nota la strumentazione applicata alla giunzione per il rilievo delle temperature e delle deformazioni.



Fig. 34 - Il tubo a pressione visibile in fig. 32 è alloggiato nel tubo di sicurezza mostrato in questa figura, la cui funzione è quella di contenere le conseguenze dell'eventuale massimo incidente credibile che coinvolgesse la sezione di prova ed il tubo a pressione stesso.



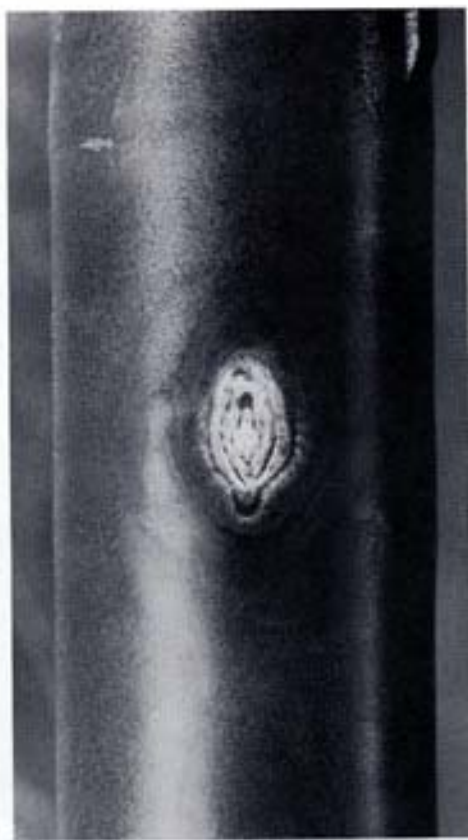


Fig. 35 - Le esperienze di irraggiamento sul combustibile del reattore CIRENE hanno permesso l'acquisizione di una notevole quantità di informazioni sul comportamento dello stesso nelle reali condizioni operative. La foto mostra un esempio di difetto verificatosi in una barra di combustibile in seguito all'irraggiamento.

zione di una notevole quantità di informazioni sul comportamento del combustibile CIRENE nelle reali condizioni operative: in particolare è stato possibile porre in evidenza l'influenza di rampe di potenza dopo un periodo di irraggiamento a potenza ridotta (v. fig. 35). Oltre a queste informazioni, di natura globale, le campagne di irraggiamento finora svolte hanno consentito l'acquisizione di altre numerose informazioni sulle variazioni geometriche delle barre e dei fasci, e sulle alterazioni morfologiche del combustibile (v. fig. 36).

Sempre sull'impianto CART sono state condotte estese indagini sul comportamento chimico dell'impianto, che hanno consentito di approfondire importanti aspetti, quali la produzione, il trasporto e la deposizione di pro-



Fig. 36 - Esperienze di irraggiamento sul combustibile CIRENE: macrografia della sezione trasversale di una paglia di combustibile irraggiata.

dotti di corrosione disciolti o sospesi nel refrigerante primario, nonché la produzione e la composizione di gas radiolitici in varie situazioni di condizionamento (neutro o basico) del refrigerante primario.

Non è fuori luogo sottolineare il ruolo primario che il CISE, grazie all'insieme delle competenze acquisite nel settore del combustibile nucleare, può svolgere per facilitare l'affrancamento dalla licenze straniere in tale settore, o almeno l'acquisizione di una capacità di gestione attiva delle stesse, da parte dell'industria nazionale: infatti, a tutt'oggi, le attrezzature ed i programmi sperimentali in reattore realizzati dal CISE costituiscono in pratica un esempio unico di attività autonoma di questo tipo svolta integralmente in Italia.

### 6.3. Prove fuori reattore

In parallelo alla sperimentazione in reattore, il CISE ha una lunga tradizione nella sperimentazione fuori reattore di fenomeni legati al comportamento del combustibile, per il cui studio non si richiede la presenza dell'ambiente nucleare: interazione meccanica fra guaine e pastiglie di ossido di uranio; interazione chimica fra le guaine ed il refrigerante; effetti dell'elevato gradiente termico presente sulle guaine sul comportamento chimico-fisico delle guaine stesse; regime vibrazionale dell'elemento di combustibile.

Più recentemente si è innestato, sul filone delle prove fuori reattore, lo studio del comportamento di elementi di combustibile sia per reattori ad acqua pesante, quali il CIRENE, sia per reattori ad acqua leggera (in particolare del tipo bollente), in condizioni anomale, tipiche di situazioni d'incidente.

#### *Interazione meccanica tra guaine di Zircaloy-2 e pastiglie di ossido di uranio*

Queste prove sono state svolte per indagare il comportamento delle incamicature di Zircaloy-2 sottoposte a pressione esterna. Le guaine del combustibile CIRENE sono infatti del tipo collassabile, cioè si deformano sotto l'effetto della pressione del refrigerante, appoggiandosi sulle pastiglie di combustibile. È importante per la corretta progettazione del combustibile conoscere esattamente il comportamento delle guaine in funzione della pressione differenziale, della temperatura e dei giuochi diametrali esistenti fra esse e le pastiglie di combustibile. Nel corso delle prove sono stati indagati gli effetti di collasso istantaneo, in condizioni di funzionamento e di massima pressione prevedibili, nonché l'effetto tempo (scorrimento viscoso), ricavando, mediante opportune attrezzature (v. par. 7.3), la deformazione delle guaine in funzione dei parametri di interesse (tempo, pressione, temperatura, gioco pastiglia-guaina).

#### *Deposizione di prodotti di corrosione sulle guaine*

La deposizione di prodotti di corrosione presenti nel refrigerante sulla guaina di combustibile potrebbe in certe condizioni influenzare negativamente lo scambio termico fra gli elementi di combustibile ed il refrigerante. Per indagare questi effetti sono state svolte apposite prove, mettendo a punto, fra l'altro, una sezione di prova in grado di riprodurre correttamente la generazione di potenza che si ha sulla barra di combustibile. Con questo tipo di esperienze fuori reattore, oltre ad evitare tutti i problemi che comporterebbe la presenza di materiale radioattivo, si ha il vantaggio di poter effettuare prove accelerate di breve durata, iniettando nella sezione di prova concentrazioni variabili di ossidi metallici (principalmente ossido di ferro).

Le prove finora eseguite simulando le condizioni operative del reattore CIRENE hanno mostrato che il deposito sulla barra riscaldata è di tipo pulverulento e non aderente e che, pertanto, non influenza apprezzabilmente lo scambio termico.

#### *Influenza del gradiente termico sul comportamento chimico-fisico della guaina*

In seguito all'ossidazione cui è sottoposta la guaina del combustibile a contatto con il refrigerante, si ha un assorbimento d'idrogeno nella guaina stessa. Questo fenomeno, che influenza la duttilità di questa, è peraltro ben conosciuto, essendo stato oggetto, anche al CISE, di estesa sperimentazione. Il forte gradiente termico cui è soggetta la guaina nelle condizioni di funzionamento provoca una particolare distribuzione dell'idrogeno assorbito, aumentandone la concentrazione nelle zone più fredde, cioè verso l'esterno della guaina stessa. Lo studio di questo fenomeno, che potrebbe influenzare apprezzabilmente le variazioni di duttilità della guaina, è oggetto di apposite esperienze.

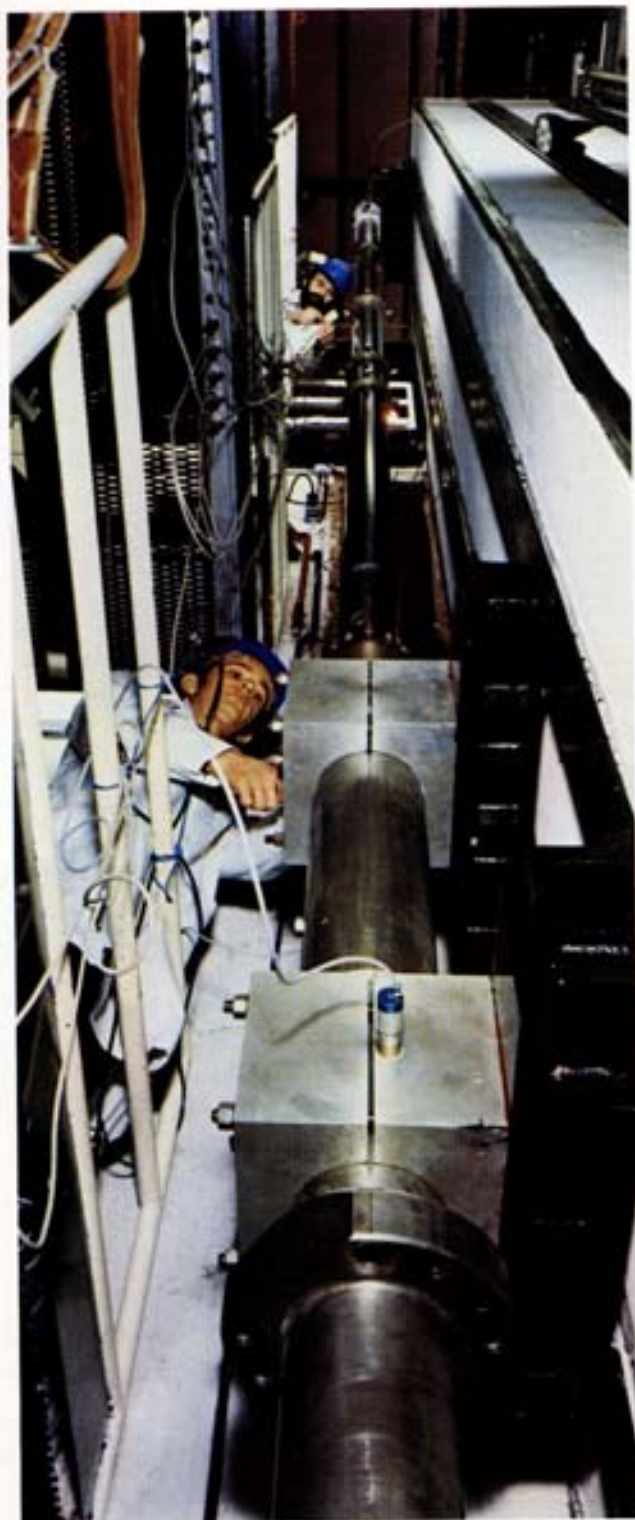


Fig. 37 - Elemento di prova simulante a piena scala un canale di potenza del CIRENE per esperienze sul regime vibrazionale causato dal flusso bifase acqua-vapore. La foto mostra la sezione di prova montata sul circuito IDRA (v. fig. 8): le caratteristiche vibrazionali vengono misurate mediante trasduttori di spostamento ed accelerometri applicati sul canale (un accelerometro è visibile in primo piano).

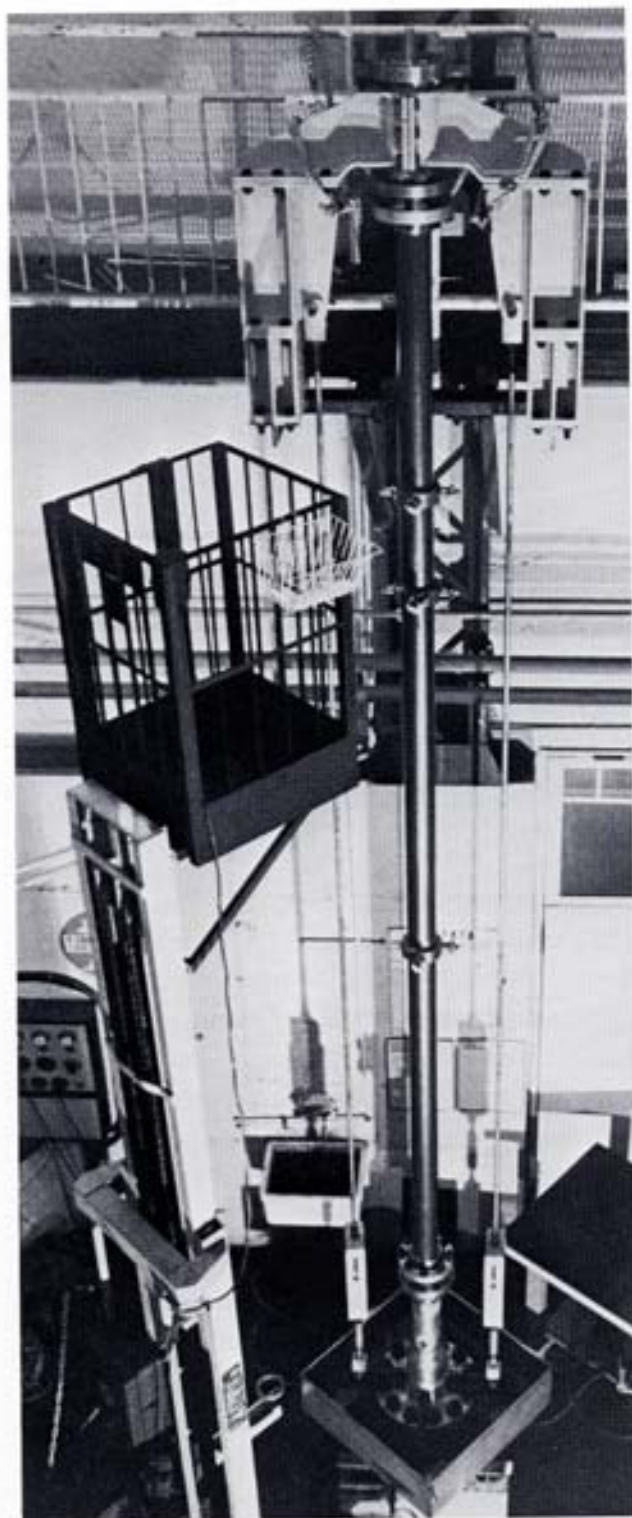


Fig. 38 - Elemento di prova simulante a piena scala un canale di potenza del CIRENE per esperienze sul regime vibrazionale causato dal flusso bifase acqua-vapore. Le esperienze con questo elemento sono state effettuate sul circuito SWEL (Steam Water Endurance Loop) del Centro UKAEA di Springfields (Gran Bretagna).

### *Regime vibrazionale dell'elemento di combustibile*

L'elevata turbolenza del fluido refrigerante origina inevitabilmente nella struttura dell'elemento di combustibile un regime vibrazionale: vibrano le singole barrette di ciascun fascio e vibra anche come un tutt'uno elastico la colonna degli 8 fasci. A causa di queste vibrazioni si hanno continui contatti (urti e strisciamenti) tra elemento di combustibile e tubo di contenimento, con conseguenti fenomeni di usura e corrosione.

Su questo argomento sono stati svolti sia studi a carattere di base in condizioni opportunamente semplificate, per comprendere meglio il meccanismo con cui vengono indotte le vibrazioni ad opera del fluido bifase acqua-vapore e per determinare il danneggiamento dei materiali sottoposti ad interazione vibrazionale, sia esperienze globali a piena scala, per verificare l'effettiva entità dei fenomeni di usura e corrosione sopra citati.

Gli studi fluidodinamici di base sono stati effettuati sul circuito sperimentale IDRA (v. par. 5.5). La sezione di prova consisteva in un elemento cilindrico d'acciaio, disposto all'interno di un condotto anch'esso cilindrico e sostenuto da opportuni supporti strumentati. Di questo elemento sono state rilevate le vibrazioni prodotte dal fluire di acqua o di miscela bifase azoto-acqua in una grande varietà di condizioni sperimentali. È stato così possibile verificare, anche se in una situazione molto semplice, i modelli teorici disponibili per la predizione delle vibrazioni eccitate dal moto dei fluidi.

Gli studi di base sulla resistenza dei materiali alla « fretting corrosion » sono effettuati mediante dispositivi di laboratorio, che, per la necessità di simulare fenomeni notevolmente complessi, risultano spesso abbastanza sofisticati. Mediante queste attrezzature si è studiata l'influenza dei singoli parametri vibrazionali (carico, frequenza, ampiezza) sulla resistenza a cor-

rosione dei materiali in una situazione chimica e fisica del fluido acqua-vapore analoga a quella reale.

Le esperienze globali sono state effettuate sia sull'impianto IDRA (v. fig. 37), sia - in collaborazione con il CNEN - sul circuito ADI (ADiabatico) del Centro della Casaccia, sia infine sul circuito SWEL (Steam Water Endurance Loop) del Centro UKAEA di Springfield (Gran Bretagna). Per queste prove globali, che hanno avuto il carattere di prove di pre-serie, sono state appositamente realizzate sezioni di prova (v. fig. 38), simulanti a piena scala un canale di potenza del reattore CIRENE. Sono stati misurati i livelli vibrazionali dei fasci di combustibile dovuti alla portata di flusso bifase (acqua-azoto nell'IDRA, acqua-vapore nell'ADI e nello SWEL) in condizioni adiabatiche ed è stata rilevata l'entità dei fenomeni di usura del tubo a pressione in corrispondenza dei punti di contatto con i pattini delle barre di combustibile.

### *Studio del comportamento di elementi di combustibile in condizioni di incidente*

Quest'attività comporta l'analisi e la riproduzione in laboratorio delle condizioni termomeccaniche cui viene sottoposto l'elemento di combustibile qualora l'impianto nucleare nel cui nocciolo è inserito subisca un grave incidente, con conseguente arresto di portata e depressurizzazione più o meno veloce del circuito refrigerante (incidente LOCA, Loss of Coolant Accident).

Questa complessa fenomenologia riveste una importanza primaria per la valutazione della sicurezza degli impianti nucleari: pertanto le conoscenze in questo settore vanno a completare il rilevante patrimonio d'esperienza che il CISE già possiede nel campo degli studi di termoidraulica in transitorio, studi che riguardano, nelle stesse ipotesi di incidente, il comportamento del sistema termovettore primario, e





Fig. 39 - Apparecchiatura BOA I (Ballooning Onset Assembly I), impiegata per studi sul comportamento termomeccanico (creep ad alta temperatura) delle guaine delle barre di combustibile in condizioni di incidente LOCA (a temperatura fino a 1200 °C). Lo spezzone di guaina in prova, visibile nella foto all'interno della camera di prova attraverso lo sportello appositamente aperto, è riscaldato per effetto Joule.

cioè le condizioni al contorno dell'elemento di combustibile.

Alle estreme condizioni termiche dell'incidente LOCA (durante il quale le temperature previste possono superare anche largamente i 1000 °C), si accompagnano notevoli sollecitazioni meccaniche sulle guaine. Infatti la pressione interna alle guaine, dovuta ai gas prodotti nel processo di fissione nucleare, non è più contrastata dalla pressione del refrigerante.

In tali condizioni, il combustibile potrebbe subire deformazioni anche vistose o rotture delle guaine stesse, tali da compromettere eventualmente, in ultima analisi, l'efficacia dei sistemi di raffreddamento d'emergenza predisposti per garantire in ogni caso la sicurezza dell'impianto.

Gli studi, che prendono appunto in considerazione particolarmente le guaine del combustibile, comportano indagini sulle caratteristiche

meccaniche ad alta temperatura del materiale costituente, in primo luogo lo scorrimento viscoso e l'influenza che su di esso esercitano il grado di ossidazione della guaina ed i fenomeni concomitanti (assorbimento d'ossigeno nel materiale non ossidato, etc.). Sulla base di questi dati vengono quindi elaborati modelli analitici che, partendo dalle condizioni di carico, prevedono il comportamento delle guaine per quanto riguarda il loro stato di deformazione.

Per queste indagini sono state realizzate al CISE alcune attrezzature sperimentali in grado di riprodurre, su guaine di elementi di combustibile per reattori sia ad acqua pesante che ad acqua leggera, le situazioni ambientali, termica e di sollecitazione meccanica, previste negli incidenti considerati. È possibile in tal modo eseguire prove di natura parametrica e fondamentale (indagini sulle caratteristiche meccaniche e chimico-fisiche del manufatto guaina), nonché prove più rappresentative, riproducendo, con opportuni programmatori della pressione e della temperatura, i transitori voluti (v. figg. 39 e 40). Inoltre vengono studiate particolari tecniche sperimentali per rilevare, ad esempio, le deformazioni della guaina nel corso delle prove.

In questo quadro un'importanza primaria hanno ovviamente i suddetti modelli analitici, che vengono continuamente aggiornati e sviluppati in stretta correlazione e sulla base dei dati sperimentali ottenuti.

#### 6.4. Strumentazione speciale per misure in reattore

Dalla necessità di risolvere problemi di strumentazione non risolti in campo commerciale, è nata al CISE un'attività di sviluppo di strumentazione speciale per impiego in reattore. Per questo scopo sono stati realizzati trasduttori di spostamento, di inflessione, di accelerazione e di pressione, progettati per temperature di funzionamento attorno ai 280 °C e per

fluenze neutroniche dell'ordine dei  $10^{19}$  n/cm<sup>2</sup>. Sono stati inoltre risolti tutti i problemi di tenuta tra trasduttori e cavi di collegamento ed i problemi di deriva elettrica del sensore sotto irraggiamento.

La costruzione di questi trasduttori ha richiesto la messa a punto di tecniche quali:

- saldatura in atmosfera inerte di componenti aventi piccole dimensioni e geometrie complesse (v. fig. 41);
- microbrasatura su cavi ad alta temperatura;
- avvolgimento e trattamento termico di conduttori isolati con smalti ceramici.

I problemi relativi al collegamento elettrico dei trasduttori alle apparecchiature di alimentazione e registrazione dei dati sono stati risolti utilizzando cavi composti da conduttori in nichel, isolati in alluminio rispetto ad una guaina protettiva in Inconel-600.

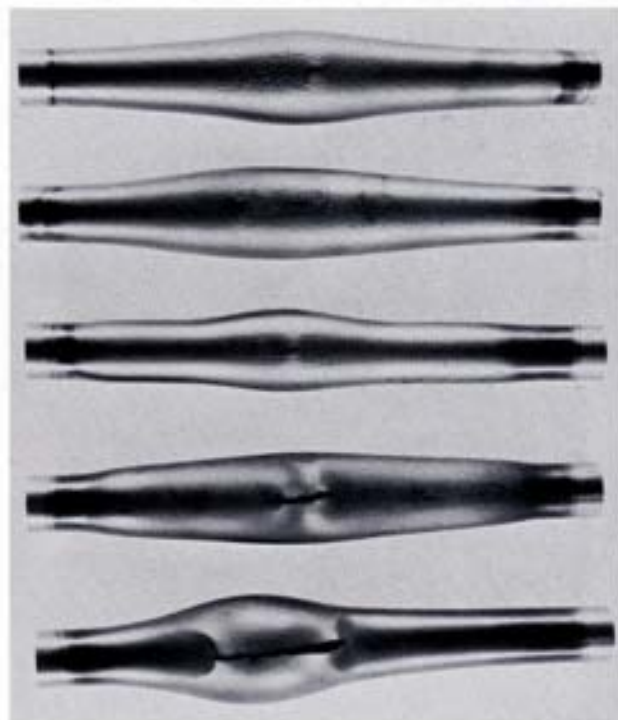


Fig. 40 - Spezzoni di guaine delle barre di combustibile CIRENE dopo prove di « ballooning » (rigonfiamento) sull'apparecchiatura BOA I (v. fig. precedente), spinte fino a rottura degli stessi.

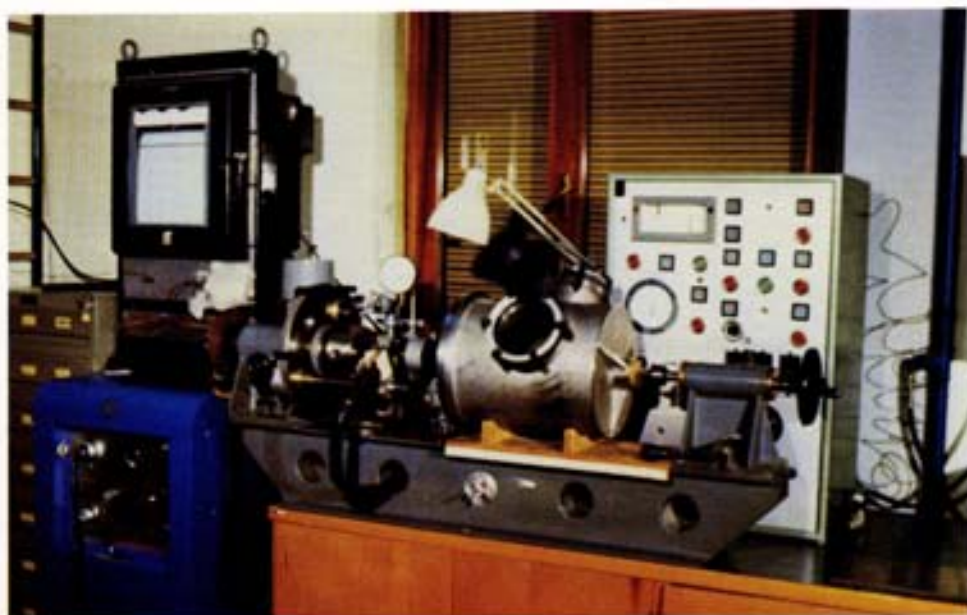


Fig. 41 - Attrezzatura per saldatura in atmosfera controllata (argo, miscela argo/elio). La saldatura avviene all'interno di una camera, con comandi esterni dei pezzi e dell'elettrodo. Si possono controllare tutti i parametri di saldatura, quali ad esempio la velocità di aumento e di riduzione della corrente di saldatura, l'intensità della corrente stessa, la velocità di avanzamento della saldatura, etc..

L'ermeticità tra cavo (del diametro esterno di 1 mm) e corpo dei trasduttori è stata ottenuta, senza saldature, mediante organi di tenuta metallici che, su prototipi sottoposti a ciclaggi di temperatura e pressione, hanno dimostrato una tenuta alle perdite migliore della soglia di rivelazione dei più sensibili strumenti di controllo.

Questa attività, che, come si è visto, ha comportato la formazione di un notevole bagaglio

tecnologico nel campo delle misure in condizioni particolarmente difficili, si sta attualmente estendendo a campi diversi da quello delle misure in reattore: in particolare, nel campo delle misure geotermiche è in fase di sviluppo, come primo obiettivo, lo studio di una sonda che dovrà operare anche a profondità intorno a 2 km e fornire, fino a 240 °C e 200 kg/cm<sup>2</sup>, il profilo assiale di temperatura e pressione di pozzi geotermici.

## 7. IMPIANTI E ATTREZZATURE IN REATTORE

### 7.1. Generalità

I programmi di ricerca svolti dal CISE nel settore delle tecnologie nucleari, programmi che prevedono in larga misura esperienze da svolgersi in reattori nucleari, coprono l'intero arco delle attività connesse con tale sperimentazione. In particolare, essi hanno comportato in svariati casi la progettazione e la realizzazione di attrezzature di irraggiamento, anche di dimensioni rilevanti, nonché di una gamma assai vasta di apparecchiature speciali per la manipolazione, lo smantellamento e gli esami dei manufatti (in massima parte elementi di combustibile) irraggiati.

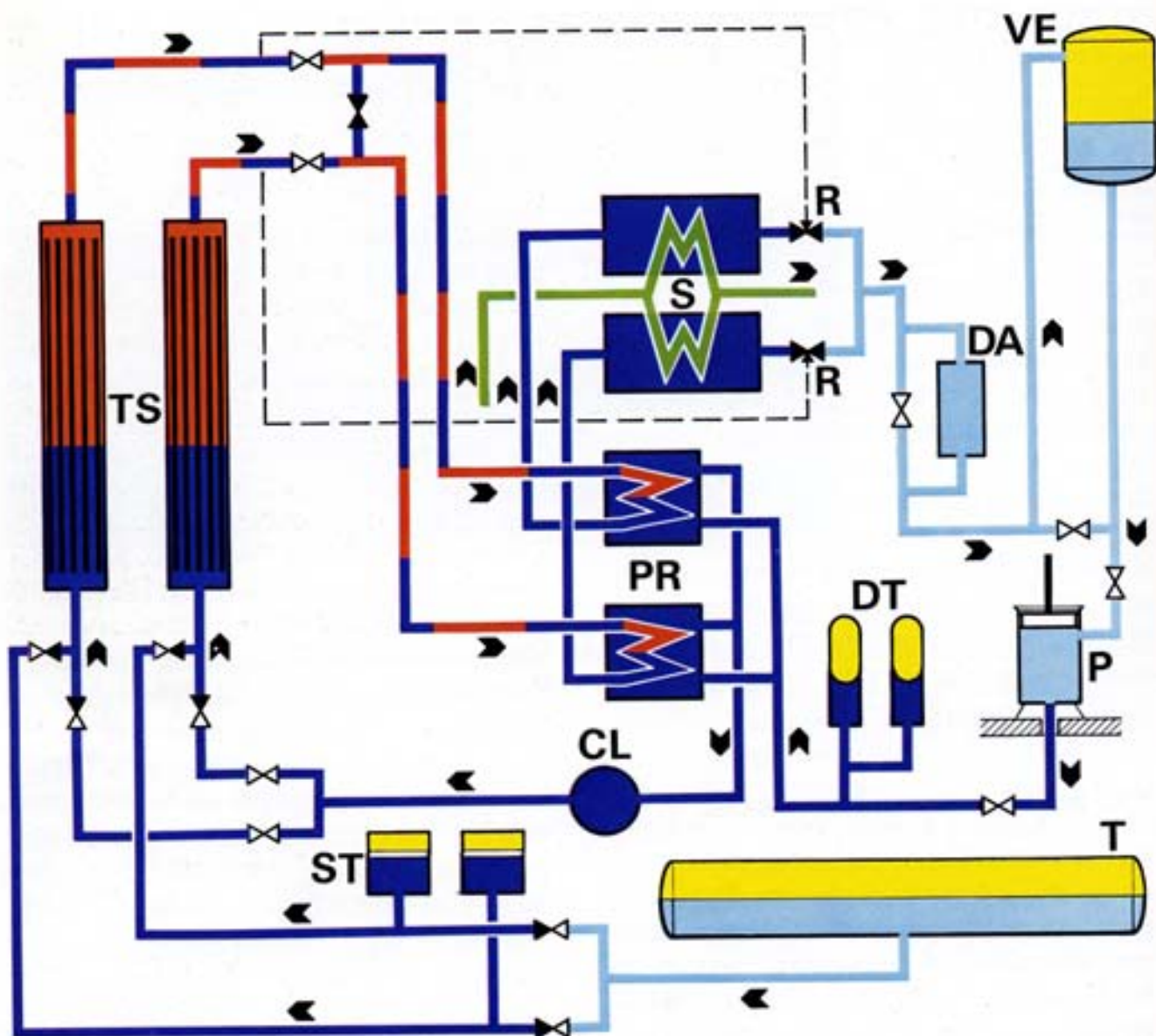
### 7.2. Impianti di grandi dimensioni

Ovviamente la disponibilità di un reattore nucleare, atto a fornire un adeguato flusso neutronico, non è di per sé sufficiente per la corretta effettuazione di esperienze d'irraggiamento. Si richiede, infatti, anche la possibilità di riprodurre, intorno all'elemento di prova, l'ambiente chimico-fisico e termodinamico in cui esso dovrà operare; inoltre è necessario asportare il calore generato nell'elemento stesso. Questo insieme di condizioni, che concorrono a garantire la rappresentatività dell'esperienza, impone quasi sempre la realizzazione di appositi impianti da installare nel reattore di prova prescelto.

In questo settore il CISE vanta un'esperienza assai rilevante e forse unica in Italia per estensione e profondità. Le relative attività ebbero inizio nel 1961, con la realizzazione di un piccolo impianto installato nel reattore a piscina Avogadro, del centro SORIN di Saluggia, per

studi di corrosione di leghe di zirconio e di chimica dell'acqua in presenza di flusso neutronico. Successivamente venne realizzato l'impianto REBO (REattore Barrette Ossido), anche esso installato nel reattore Avogadro, per irraggiamenti di barre di combustibile per il programma CIRENE. Due attrezzature d'irraggiamento (IFA 31 e 32) furono progettate e realizzate, in collaborazione con i tecnici del Centro IFA di Halden (Norvegia), per l'irraggiamento di elementi di combustibile metallici nel reattore di quel Centro. Più recentemente venne realizzato ed installato nel reattore ESSOR del Centro Euratom di Ispra il già citato impianto CART (CIRENE Assembly Reactor Test), in grado di provare in un canale di potenza a piena scala 3 fasci di combustibile completi del tipo CIRENE, per una potenza massima complessiva di 1500 kW. Dopo oltre 14000 h di funzionamento pienamente soddisfacente il CART è stato potenziato con l'installazione di un secondo canale in parallelo e denominato CART-TC (Twin Channel).

L'impianto, la cui realizzazione è stata finanziata in una prima fase dall'Associazione CNEN-Euratom, e successivamente dal solo CNEN, è schematizzato nella fig. 42. Il fluido primario (acqua demineralizzata) viene inviato dalle pompe (v. fig. 43) (3 unità in parallelo, di cui una di ripresa) agli scambiatori-recuperatori, dove l'acqua viene preriscaldata fino a circa 250 °C a spese dell'entalpia del refrigerante proveniente dai canali in reattore. Da qui, dopo aver attraversato una caldaia ad alimentazione elettrica che provvede al raggiungimento delle condizioni entalpiche volute, il refrigerante (prossimo alla saturazione) viene inviato nei



- Circuito primario B.P.
- Circuito primario A.P.
- Circuito secondario
- Miscela acqua-vapore
- Gas
- Valvole di non ritorno
- Valvole manuali
- Valvole pneumatiche

#### PRESTAZIONI DELL'IMPIANTO

Portata max. refrigerante: 36 t/h  
 Portata nom. refrigerante: 24 t/h  
 Pressione max. (uscita canale):  
 71 kg/cm<sup>2</sup> ass.  
 Pressione nom. (uscita canale):  
 52 kg/cm<sup>2</sup> ass.  
 Potenza max. asportabile: 3000 kW

#### LEGGENDA

- P Pompe
- R Regolatori di pressione
- TS Sezioni di prova
- PR Preriscaldatori
- S Scambiatori di calore
- DA Zona depurazione e analisi
- VE Vaso espansione
- ST Serbatoio raffreddamento emergenza A.P.
- T Serbatoio raffreddamento emergenza B.P.
- CL Caldaia elettrica
- DT Smorzatori di portata

Fig. 42 - Schema di principio dell'impianto CART-TC (CIRENE Assembly Reactor Test - Twin Channel), installato presso il reattore ESSOR del Centro Euratom di Ispra. Esso permette di provare in due canali di potenza disposti in parallelo  $2 \times 3$  fasci di combustibile a piena scala del tipo CIRENE, per una potenza massima complessiva di circa 3000 kW nucleari.

Fig. 43 - Impianto CART-TC (v. fig. precedente): gruppo delle pompe del circuito primario.

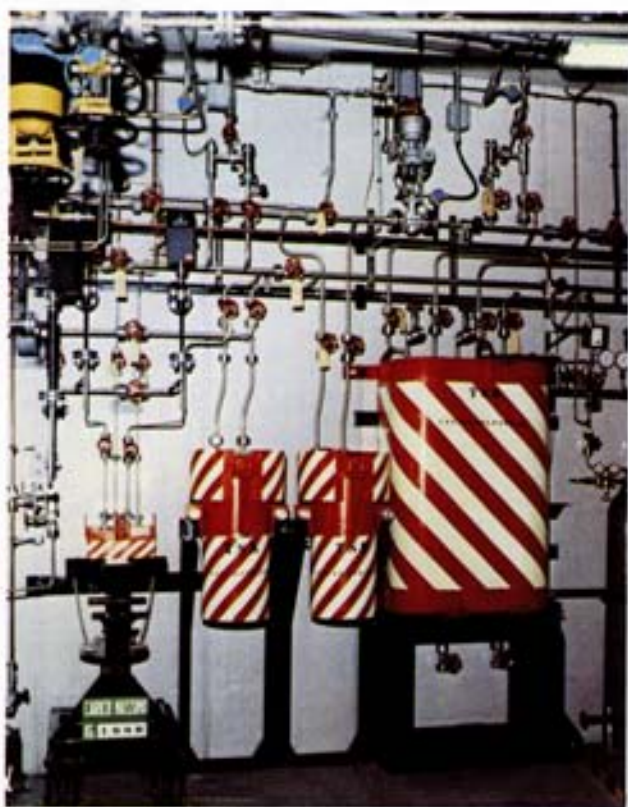
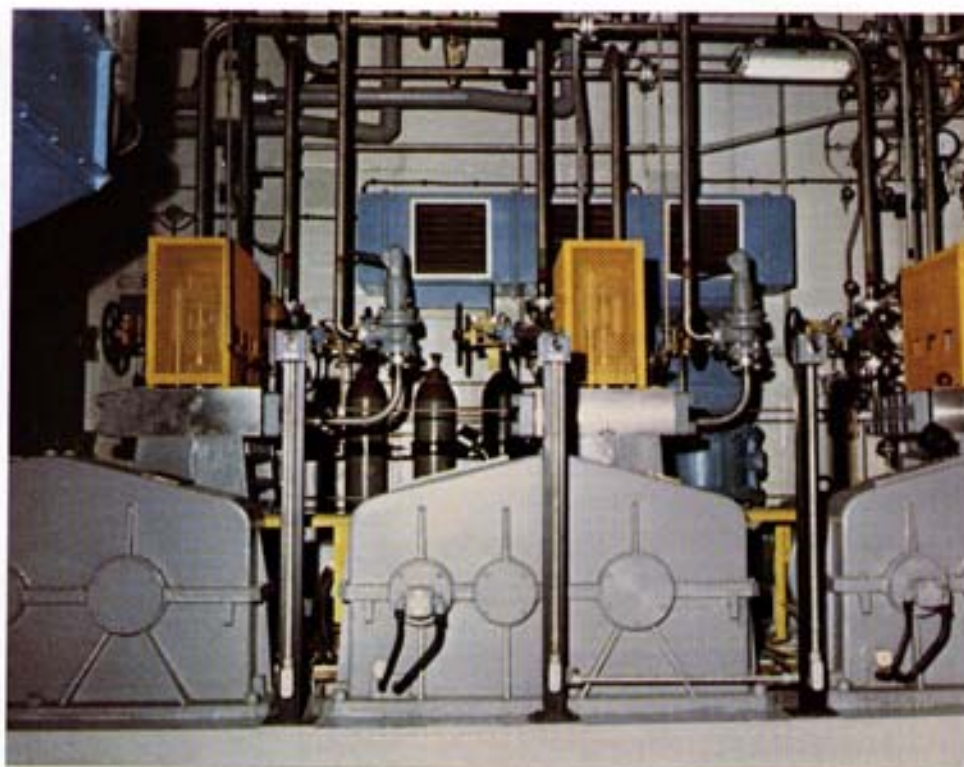


Fig. 44 - Impianto CART-TC (v. fig. 42): zona di depurazione ed analisi del refrigerante.

due canali, dove provvede alla asportazione della potenza generata dai fasci di combustibile delle sezioni di prova (fino ad un valore massimo di 1500 kW per canale). Il fluido primario, che in parte vaporizza lungo il canale, viene poi inviato agli scambiatori-recuperatori, e di lì agli scambiatori primari, dove viene raffreddato a 60 °C. Quindi, dopo depressurizzazione, una parte del fluido primario viene inviata ad una zona di depurazione (v. fig. 44), costituita essenzialmente da colonne di resine a scambio ionico e da unità di filtraggio. Infine, dopo aver attraversato il degasatore-polmone (v. fig. 45), il refrigerante ritorna alle pompe di circolazione.

La pressurizzazione dell'impianto è di tipo dinamico: il refrigerante viene mantenuto alla pressione desiderata nel canale di prova mediante due valvole (una per ciascun canale), comandate da un segnale di pressione prelevato all'uscita di ogni canale.

Lo schema di circuito include pure il sistema

di raffreddamento d'emergenza, che è composto da uno stadio d'iniezione ad alta pressione, in grado di iniettare acqua a pressione analoga a quella del circuito primario, e da uno stadio a bassa pressione, di grande capacità, che assicura il raffreddamento successivo dell'elemento di prova.

L'impianto viene pilotato da un settore della sala di controllo del reattore ESSOR. Esiste inoltre una sala di controllo ausiliaria del CART (v. fig. 46), utilizzata soprattutto dagli sperimentatori, in cui si ritrovano tutte le indicazioni relative al funzionamento del circuito ed è inoltre possibile la raccolta e registrazione dei dati sperimentali provenienti dagli elementi di combustibile in prova.

Attualmente il CISE, nel quadro di un contratto tra il Governo italiano e l'Euratom per il potenziamento del reattore ESSOR di Ispra, è stato interessato alla realizzazione dell'impianto IRA (Irraggiamento Reattori Avanzati), destinato ad esperienze su singole barrette di combustibile o piccoli fasci per reat-



Fig. 45 - Impianto CART-TC (v. fig. 42): serbatoio di espansione (a sinistra), serbatoio tampone dell'elio (a destra).

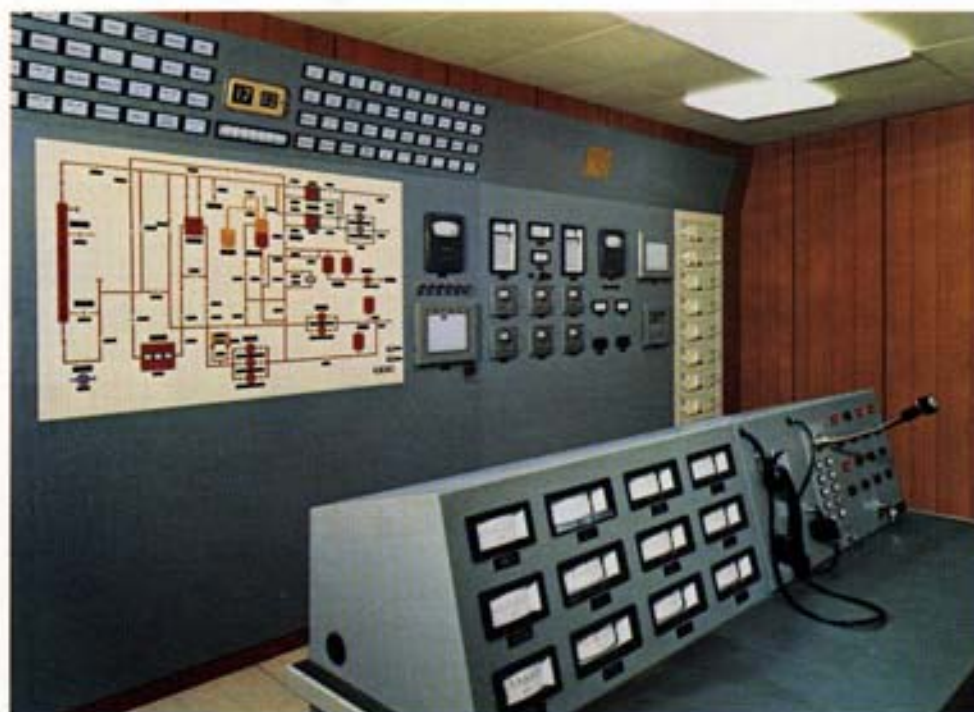


Fig. 46 - Impianto CART-TC (v. fig. 42): sala di controllo ausiliaria.

TABELLA 3

## PRINCIPALI CARATTERISTICHE DEGLI IMPIANTI CART, CART-TC ED IRA

Impianto	Potenza max nucleare (kW)	Pressione (sulla sezione di prova) (kg/cm <sup>2</sup> )	Portata (t/h)	Refrigerante	Note
CART	1500	50	16	H <sub>2</sub> O in cambiamento di fase	-
CART-TC	3000	50	24	H <sub>2</sub> O in cambiamento di fase	Potenziamento del CART
IRA	350	70 ÷ 180	5,4	H <sub>2</sub> O pressurizzata o, in alternativa, H <sub>2</sub> O bollente	In fase di realizzazione

tori ad acqua. Nella tab. 3 sono sintetizzate le principali caratteristiche degli impianti CART, CART-TC ed IRA.

Particolarmente impegnativa è la progettazione e realizzazione del « cuore » di questi impianti, cioè del complesso delle parti più propriamente in reattore: i canali e le sezioni di prova. Per questi sofisticati sotto-assiemi sono state mobilitate e opportunamente coordinate le più avanzate competenze di cui il CISE dispone in meccanica, tecnologia, metallurgia, termo-fluidodinamica e neutronica.

Gli impianti di cui sopra costituiscono solamente le più salienti realizzazioni del CISE in questo settore. È stata infatti anche allestita, per esperienze di irraggiamento di materiali, una vasta serie di particolari attrezzature (Commode - v. fig. 47 -, IRTF - IRraggiamento Tubi di Forza, IRP - IRraggiamento Provini, LESSY - Liquid Experimental Shut-down System, etc.), su cui non ci soffermiamo, data la loro relativa semplicità almeno in confronto con gli impianti già citati.

### 7.3. Attrezzature speciali

Per la corretta esecuzione di programmi sperimentali in reattore non sempre è sufficiente

disporre di adeguati ed affidabili impianti in reattore, ma si richiedono spesso attrezzature ausiliarie particolari. Queste possono riguardare operazioni preliminari, intermedie o finali rispetto all'irraggiamento: basti citare la caratterizzazione degli elementi da irraggiare, la sostituzione parziale di alcune barre di combustibile nel corso degli irraggiamenti, la modulazione della potenza generata dalla sezione di prova nel corso dell'esperienza (senza agire sul livello di potenza del reattore), ed infine i rilievi da eseguire sugli elementi dopo irraggiamento.

Citiamo qui di seguito alcune fra le più significative realizzazioni di questo tipo.

#### *Attrezzature per caratterizzazioni metrologiche di elementi di combustibile*

Per rilevare le deformazioni cui è soggetto un elemento nel corso dell'irraggiamento, sono state realizzate alcune apparecchiature simili tra loro, con cui si possono misurare diametri e rilevare profili di barre e di fasci di combustibile sia prima che dopo l'irraggiamento (in cella calda) (v. fig. 48); si possono inoltre misurare le deformazioni puntuali (espresse in  $\mu$ strain) di guaine di barre provocate dalle interazioni con





Fig. 47 - Dispositivo Commode-3 per l'irraggiamento in reattore di provini o spezzoni di materiali strutturali da sottoporre a caratterizzazione. In particolare, la foto riguarda la preparazione di un'esperienza su spezzoni del tubo di isolamento, contenenti nel loro interno spezzoni di tubo a pressione del CIRENE. Tali spezzoni sono impilati sull'anima interna del dispositivo e tenuti insieme dalle due estremità dello stesso. Dopo irraggiamento essi sono destinati ad essere sottoposti a prove di scoppio. Gli irraggiamenti vengono effettuati nel reattore ESSOR del Centro Euratom di Ispra.



Fig. 48 - Per la misura dei diametri e la rilevazione dei profili della sezione normale di barre di combustibile CIRENE sottoposte a condizioni di prova fuori o in reattore, sono state realizzate due versioni di un'apparecchiatura analogica, denominata PROBA (PROfilo BARre). La foto rappresenta la versione che opera su materiale non irraggiato; l'altra, che opera su materiale irraggiato, è installata in cella calda presso il Centro Euratom di Ispra.

le pastiglie di combustibile e dalla pressione del refrigerante. Alcune di queste apparecchiature sono installate nelle celle calde del reattore ESSOR del Centro Euratom di Ispra e vengono utilizzate nel quadro del programma CIRENE.

#### *Dispositivi per la modulazione di potenza degli elementi di combustibile*

Un dispositivo di questo tipo, realizzato ed utilizzato nel già citato impianto REBO, consisteva in un cinematismo in grado di variare la distanza della sezione di prova dal nocciolo del reattore, e quindi la potenza da essa generata, secondo cicli opportunamente programmati, indipendentemente dal livello di potenza del reattore. Un analogo dispositivo, basato

sulla modulazione della concentrazione di un isotopo ad alta sezione di cattura neutronica in soluzione acquosa, contenuta in opportune intercapedini concentriche all'elemento in prova, è allo studio per gli impianti in ESSOR (CART-TC ed eventualmente IRA).

*Attrezzatura per la permutazione e/o la sostituzione parziale di elementi di combustibile*

Quest'attrezzatura, in corso di realizzazione, è destinata ad aumentare la potenzialità dell'im-

pianto CART-TC, permettendo altresì di riprodurre in esso la storia d'irraggiamento prevista per il combustibile nel reattore CIRENE (dove i fasci vengono ad occupare, durante il ciclo operativo, posizioni a flusso neutronico variabile e, conseguentemente, a potenza variabile).

L'attrezzatura permette, dopo lo scarico della sezione di prova dal canale sperimentale, un complesso ciclo di operazioni, che prevede lo scollamento dei fasci dall'estensione superiore e la loro separazione, il monitoraggio dei



Fig. 49 - L'apparecchiatura UMOR (Unità di Misura ORenda), per l'ispezione in reattore della superficie interna di tubi a pressione: essa assicura il posizionamento di una testa di misura dotata di trasduttori di spostamento in grado di rilevare con estrema accuratezza eventuali deformazioni diametrali e difetti superficiali. A sinistra nella foto è visibile il sistema automatico per l'acquisizione dei dati, che vengono successivamente elaborati mediante calcolatore. La testa di misura è situata all'interno del tratto inferiore dell'apparecchiatura.



Fig. 50 - L'apparecchiatura DIC (Difettoscopia Integrale Canali), utilizzata per effettuare repliche mediante elastomeri al silicone dello stato superficiale interno di tratti anche estesi di tubi a pressione.

singoli fasci per rivelare eventuali fessurazioni, e la sostituzione, se desiderato, di uno o più fasci irraggiati con altrettanti fasci non irraggiati, oltre che il riassiemaggio della sezione di prova in vista di un nuovo ciclo di irraggiamento. Ovviamente, a causa dell'elevatissima attività presentata dai fasci irraggiati, l'intera sequenza di operazioni deve essere effettuata a distanza, sotto schermo d'acqua o in celle calde.

#### 7.4. Attrezzature per controlli non distruttivi in reattore

I programmi di ricerca che prevedono esperienze di irraggiamento in reattori nucleari comportano, fra l'altro, l'esigenza di garantire nel tempo la sicurezza delle attrezzature utilizzate, ed in primo luogo l'integrità delle strutture interne al reattore, interessate al con-

tenimento del refrigerante ad alta pressione e temperatura.

Per far fronte a questa esigenza sono state sviluppate al CISE due apparecchiature per il controllo e la sorveglianza di componenti in un reattore (in particolare i tubi a pressione): l'UMOR (Unità di Misura OREnda (\*)), che impiega trasduttori di spostamento, e la DIC (Difettoscopia Integrale Canali), che utilizza la tecnica delle repliche. Le soluzioni adottate in tali apparecchiature offrono anche, in qualche caso, interessanti prospettive per il controllo in esercizio di reattori a tubi a pressione.

L'apparecchiatura UMOR (v. fig. 49) permette il rilievo delle deformazioni diametrali, dovute a fenomeni di scorrimento viscoso (che vengono esaltate in presenza di flusso neutronico), nonché di difetti eventualmente presenti sulla superficie interna dei tubi a pressione. L'UMOR consiste in una testa di misura dotata di trasduttori di diametro estremamente sensibili, in grado di rivelare variazioni di pochi  $\mu\text{m}$ , e di sensori di discontinuità superficiali. La testa di misura è collegata ad un complesso sistema di posizionamento, in grado di esplorare con continuità e con un programma di movimento prefissato dall'operatore l'intera superficie del canale da ispezionare. I segnali relativi, trasmessi dai vari trasduttori, vengono registrati su nastro magnetico e bande perforate e successivamente trattati da un elaboratore elettronico con un programma in grado di ricostruire l'intero profilo del canale ispezionato, per quanto riguarda sia le variazioni diametrali che la geometria e la localizzazione di eventuali difetti.

L'apparecchiatura DIC (v. fig. 50) permette una riproduzione integrale dello stato superficiale interno di tratti anche estesi di canale e rende possibile l'esecuzione di repliche anche a distanza notevole (5 ÷ 6 m).

(\*) La Società canadese Orenda ha fornito la testa di misura.

## 8. REALIZZAZIONI MECCANICHE

L'esposizione dei molteplici programmi di ricerca e sviluppo nei quali è impegnato il CISE, quali fin qui delineati, evidenzia con chiarezza quanto grande sia l'esigenza di disporre di impianti, dispositivi sperimentali e componenti vari con i quali poter sviluppare, con ampiezza di mezzi e con rigorosa accuratezza, le esperienze programmate.

Per poter soddisfare tutte queste esigenze è stato necessario far sorgere e sviluppare all'interno del CISE un'attività centralizzata di realizzazioni meccaniche (v. figg. 51 e 52), che opera in appoggio alla ricerca e agisce in stretta collaborazione con essa.

Questa attività realizzatrice abbraccia sia la progettazione meccanica, sia la costruzione e il montaggio di tutte quelle apparecchiature (e sono la parte preponderante dell'insieme di quelle necessarie) che per le loro caratteristiche ad hoc non sono commercialmente disponibili. Come esempio di realizzazioni effettuate all'interno del CISE si possono citare, oltre a quelle parti dei circuiti termoidraulici sperimentali (v. par. 5.5) non reperibili in commercio, le sezioni di prova a fasci di barre e le valvole ad azione rapida (v. par. 5.6) inserite nei circuiti termoidraulici stessi, le attrezzature e le sezioni di prova per le esperienze sull'impianto

Fig. 51 - Veduta dell'officina generale.



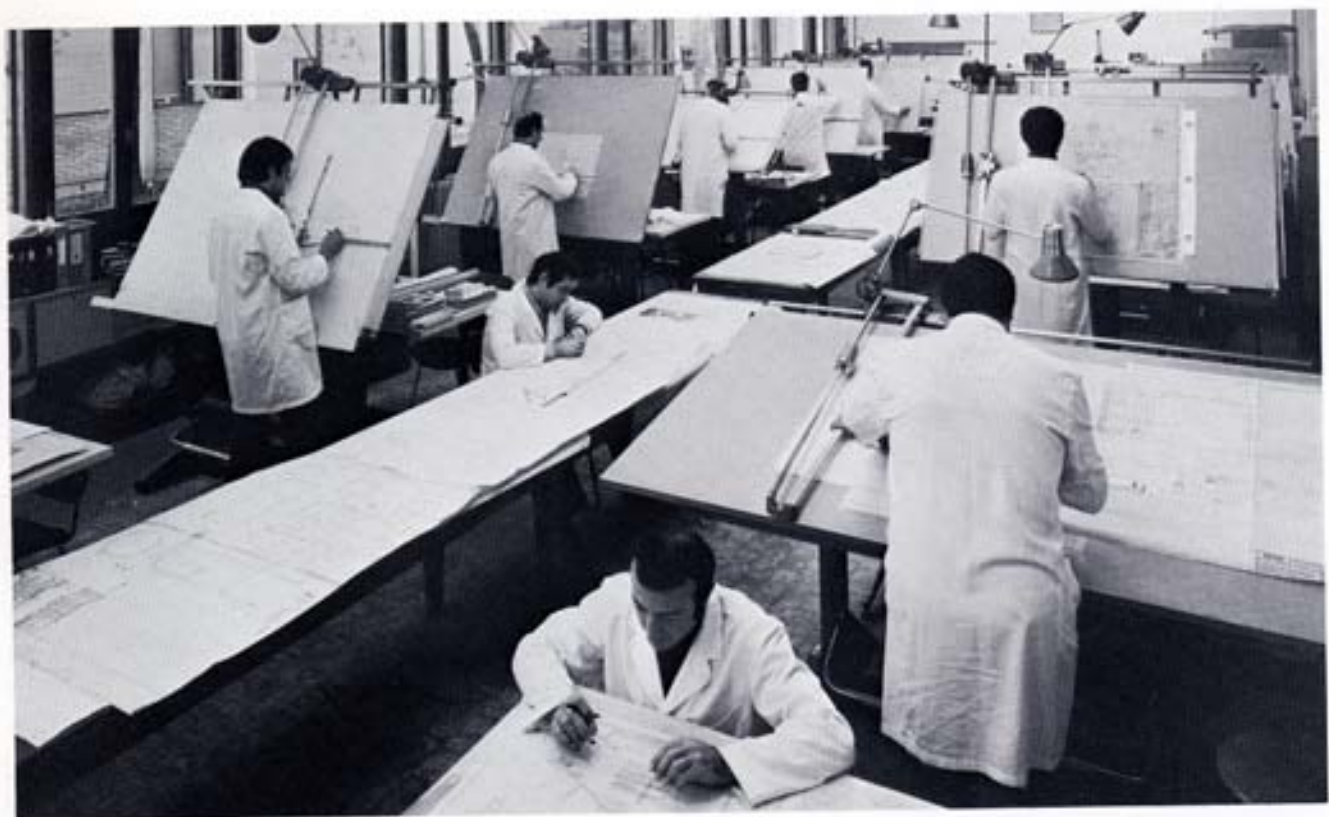


Fig. 52 - Veduta della sala disegnatori.

BETULLA (v. par. 5.8), i vari componenti degli impianti in reattore REBO e CART (v. par. 7.2), etc..

Per poter garantire la perfetta esecuzione di tutte queste apparecchiature, che il più delle volte risultano notevolmente complesse, l'officina generale del Centro è stata attrezzata con macchine utensili di elevata precisione, operate da personale di notevole specializzazione ed esperienza.

La dotazione di macchine comprende una decina di torni che coprono una ampia gamma di

dimensioni, fresatrici e tracciatrici, rettificatrici, limatrici, trapani e altre macchine speciali, nonché le macchine occorrenti per la lavorazione della lamiera.

L'officina dispone poi di impianti per tutti i tipi di saldatura tradizionale, compreso il procedimento a TIG (Tungsten Inert Gas) e al microplasma, ed è anche attrezzata con un impianto per radiografie industriali da 200 kV, utilizzato per il controllo radiografico delle saldature.

## 9. SISTEMI DI SORVEGLIANZA DI COMPONENTI DI IMPIANTI

### 9.1. Generalità

Le esigenze di sempre più elevate affidabilità e disponibilità degli impianti industriali, dovute sia al continuo aumento delle dimensioni unitarie, e perciò della penalizzazione per fuoriuscimento, sia ai più pressanti requisiti di sicurezza, di protezione e di rispetto dell'ambiente, hanno portato ad un notevole sviluppo del controllo della qualità dei componenti degli impianti e ad un grande ampliamento della domanda di efficaci sistemi di sorveglianza in esercizio dei componenti più delicati.

In questo vasto settore dell'ideazione e della messa a punto di nuove e più adeguate tecniche di controllo della qualità e di sorveglianza il CISE opera a partire dalla fine degli anni '60, in particolare per rispondere a specifiche esigenze dell'ENEL relative ad impianti per la produzione di energia elettrica, di tipo sia convenzionale (termoelettrico) che nucleare.

Le tecniche studiate presentano la comune caratteristica di essere basate su una analisi « dinamica » dei processi da sorvegliare, che consente l'individuazione dei malfunzionamenti negli stadi iniziali, prima cioè che si rendano evidenti su scala macroscopica. I fenomeni di base utilizzati per la rivelazione di anomalie di funzionamento sono i seguenti:

- vibrazioni meccaniche di strutture, indotte da moto dei fluidi o da urti;
- vibrazioni meccaniche del macchinario rotante (in particolare di turboalternatori);
- emissione acustica prodotta nei materiali al momento dell'avanzamento di difetti strutturali;
- fuoriuscita turbolenta di fluido a pressione da piccole rotture.

### 9.2. Identificazione di processi dinamici

In molti processi e sistemi industriali la conoscenza delle sole relazioni funzionali in condizioni stazionarie tra le grandezze significative non è sufficiente né dal punto di vista della progettazione, né dal punto di vista dell'esercizio e della sorveglianza del funzionamento: occorre quindi provvedere ad una determinazione almeno approssimata delle interrelazioni presenti in condizioni dinamiche.

Questa esigenza diviene poi ovviamente imprescindibile nel caso di processi intrinsecamente dinamici, quali appunto le vibrazioni meccaniche e i fenomeni acustici. Per l'identificazione dei processi dinamici sono state ideate apposite metodologie, basate sia sull'osservazione dei transitori e delle fluttuazioni presenti nel corso del normale funzionamento, sia sull'applicazione di opportune « perturbazioni » delle variabili indipendenti (ad impulso, a gradino, di forma sinusoidale, etc.).

Al riguardo il CISE possiede vaste competenze nell'intero arco delle possibili esigenze industriali, dalle conoscenze teoriche di statistica e di dinamica dei sistemi, alle apparecchiature elettroniche speciali per il condizionamento dei segnali e per la loro memorizzazione, ai calcolatori numerici predisposti specificatamente per le analisi dinamiche e statistiche, all'esperienza di oltre una decina d'anni di attività sperimentali.

In particolare, le apparecchiature disponibili consentono la determinazione in un esteso intervallo di frequenza (dai mHz ai MHz) delle seguenti funzioni dinamiche speciali: le funzioni di trasferimento e le funzioni descrittive

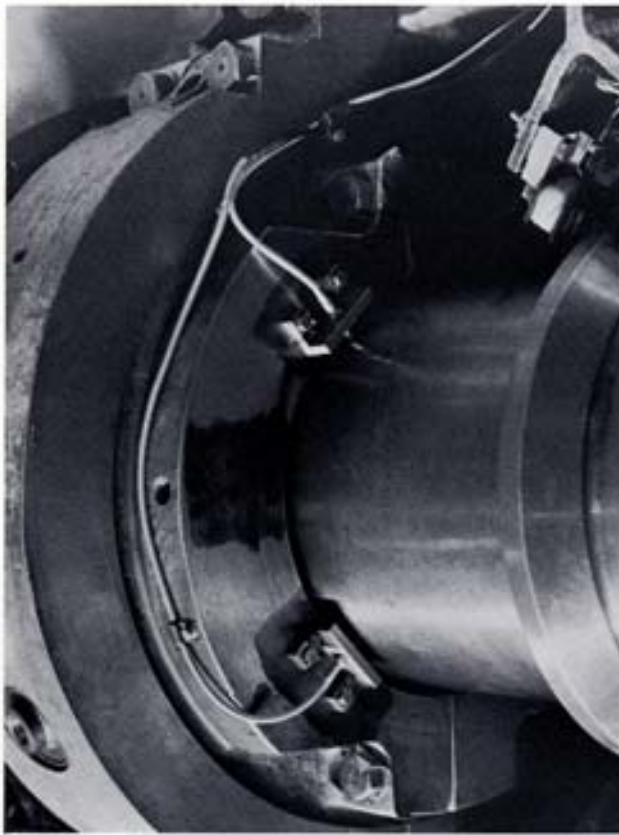


Fig. 53 - Disposizione di una coppia di sensori non a contatto per il rilievo delle vibrazioni dell'albero rotante di un turboalternatore della centrale termoelettrica dell'ENEL di Turbigo Levante.

per l'individuazione della dinamica di sistemi lineari e non lineari; le trasformate di Laplace e di Fourier per la caratterizzazione di segnali dinamici impulsivi; le funzioni caratteristiche di un « rumore » (fluttuazione casuale), quali gli spettri della densità di potenza del rumore e le funzioni di correlazione per i processi stocastici stazionari.

### 9.3. Vibrazioni meccaniche

Il funzionamento del macchinario comporta inevitabilmente l'insorgenza di vibrazioni meccaniche indotte da urti, dal moto dei fluidi, da onde acustiche, etc.. Queste vibrazioni sono dovute alla presenza di forze dinamiche, che in generale non devono superare opportuni livelli di guardia ed a cui è spesso da addebitare

l'insorgenza di processi di rottura. La sorveglianza del regime vibrazionale di importanti strutture è quindi frequentemente di notevole diretto interesse. Inspiegabili alterazioni di questo regime segnalano in generale una situazione anormale, dovuta o a modifica del regime di forze dinamiche di eccitazione o a deterioramento della resistenza meccanica della struttura vibrante.

In questo campo la prima importante attività è stata quella effettuata in collaborazione con la Westinghouse e l'ENEL per lo sviluppo e l'applicazione di tecniche di sorveglianza delle vibrazioni delle strutture interne al recipiente a pressione del reattore PWR di Trino Vercellese. Come è noto, queste strutture, dopo il primo ciclo di funzionamento del reattore (nel 1967), furono trovate inaspettatamente danneggiate in modo grave a causa di vibrazioni eccessive indotte dal moto dell'acqua di raffreddamento. Venne allora deciso di procedere allo sviluppo di opportuni sistemi di sorveglianza, che furono applicati nell'esercizio della centrale dopo le riparazioni.

Per la sorveglianza delle vibrazioni complessive del nocciolo si è fatto ricorso all'analisi spettrale del rumore del flusso neutronico misurato dalle camere di ionizzazione d'impianto. In particolare, l'estesa serie di misure effettuate dopo il riavviamento dell'impianto riparato ha dimostrato che queste analisi spettrali consentono di individuare le vibrazioni « pendolari » del nocciolo. Queste stesse vibrazioni hanno potuto essere rivelate anche mediante l'analisi spettrale del rumore di pressione dell'acqua del circuito primario.

Sul reattore di Trino Vercellese è stata anche sperimentata una tecnica di monitoraggio « acustico » del circuito primario, mediante accelerometri applicati esternamente in opportune posizioni. Lo scopo principale di questo sistema di auscultazione era quello di rivelare l'eventuale insorgenza di disaccoppiamenti mecca-

Fig. 54 - Apparecchiatura per l'analisi spettrale di vibrazioni di strutture, impiegante un minicalcolatore da 32 K parole di memoria, predisposto come analizzatore di Fourier.



nici nei vari giunti delle strutture interne, o addirittura la presenza di piccoli pezzi meccanici liberi (che certamente si produrrebbero nel caso di gravi rotture nelle strutture interne), utilizzando per la rivelazione il rumore acustico provocato dagli urti metallo-metallo (tra le due parti del giunto che si sta rompendo o tra pezzo metallico trascinato dall'acqua e parete del circuito primario). Il sistema non ha avuto

finora occasione di entrare in funzione, ma perturbazioni artificiali ne hanno dimostrato la grande sensibilità.

Sistemi di sorveglianza di questi tipi sono stati adottati sui moderni reattori PWR.

Degli studi sulle vibrazioni dell'elemento di combustibile CIRENE si è già detto nel par. 6.3.

Un altro importante tipo di vibrazioni è quel-

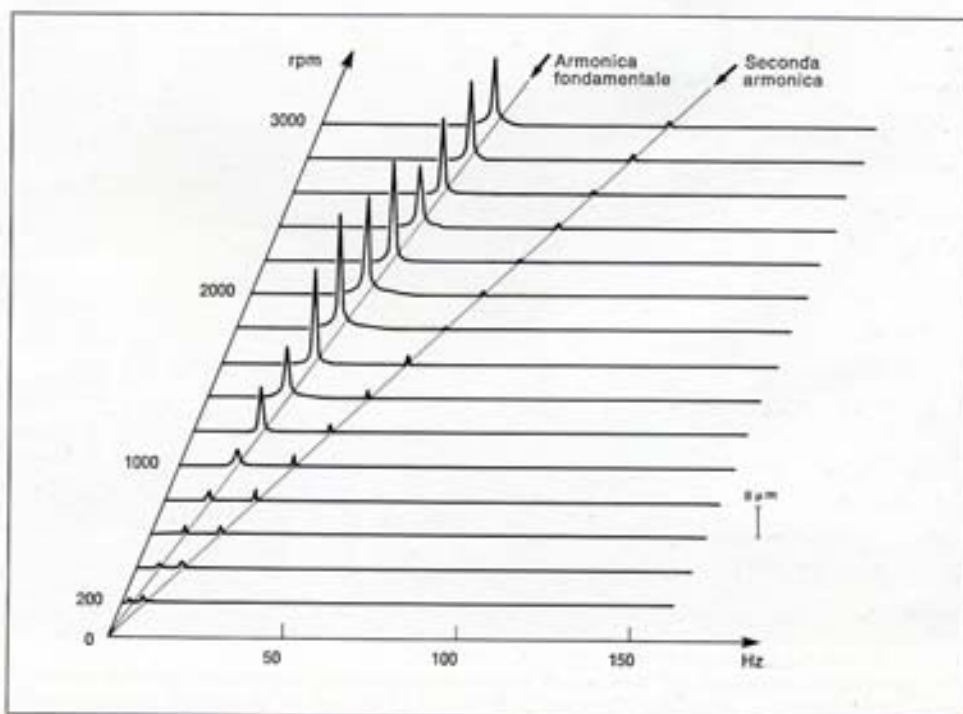


Fig. 55 - Tipico grafico di analisi spettrale di segnali di vibrazione su una macchina rotante, ottenuto con l'apparecchiatura mostrata nella fig. precedente.



lo del macchinario rotante. Queste vibrazioni vanno minimizzate soprattutto per ridurre l'entità delle forze dinamiche agenti sui cuscinetti di supporto. L'attività del CISE su questo argomento è stata svolta nel quadro di apposite commesse ENEL ed ha riguardato i grandi turboalternatori delle centrali termoelettriche. È stata sviluppata una speciale strumentazione di sorveglianza, basata su trasduttori non a contatto della posizione dell'albero rotante (v. fig. 53) e su trasduttori della pressione dell'olio di lubrificazione dei cuscinetti; sono state messe a punto procedure di elaborazione dei segnali, che permettono di diagnosticare in esercizio l'insorgenza di guasti tipici, quali sbilanciamenti delle parti rotanti e disallineamenti dei supporti.

Questa strumentazione è stata sperimentata con risultati molto positivi su vari turboalternatori, anche di grande potenza, sia nel corso del normale funzionamento, sia in condizioni artificialmente perturbate.

Complessivamente, sull'argomento della sorveglianza delle vibrazioni meccaniche è maturata al CISE una notevole esperienza, che comprende conoscenze specialistiche di ingegneria meccanica, di strumentazione elettronica primaria, di trattamento delle informazioni e di presentazione automatica dei dati sperimentali (v. fig. 54 e 55). Competenze di questo tipo potrebbero essere utilizzate in vari altri campi, ad esempio per la risoluzione di problemi di sorveglianza in impianti chimici o in raffinerie.

Si ricorda infine la misura a distanza di vibrazioni di strutture, attuata con tecniche di ottica coerente, per cui si rinvia al par. 14.2.

#### **9.4. Emissione acustica nei materiali sotto sforzo**

L'« emissione acustica » che si verifica nei metalli e in generale in tutti i materiali solidi, al momento in cui avvengono anche minime al-



Fig. 56 - Strumentazione del sistema di misura dei segnali di emissione acustica prodotti da un recipiente a pressione nel corso di una prova a pressione idrostatica. Si notano i sensori di emissione acustica applicati al recipiente stesso.

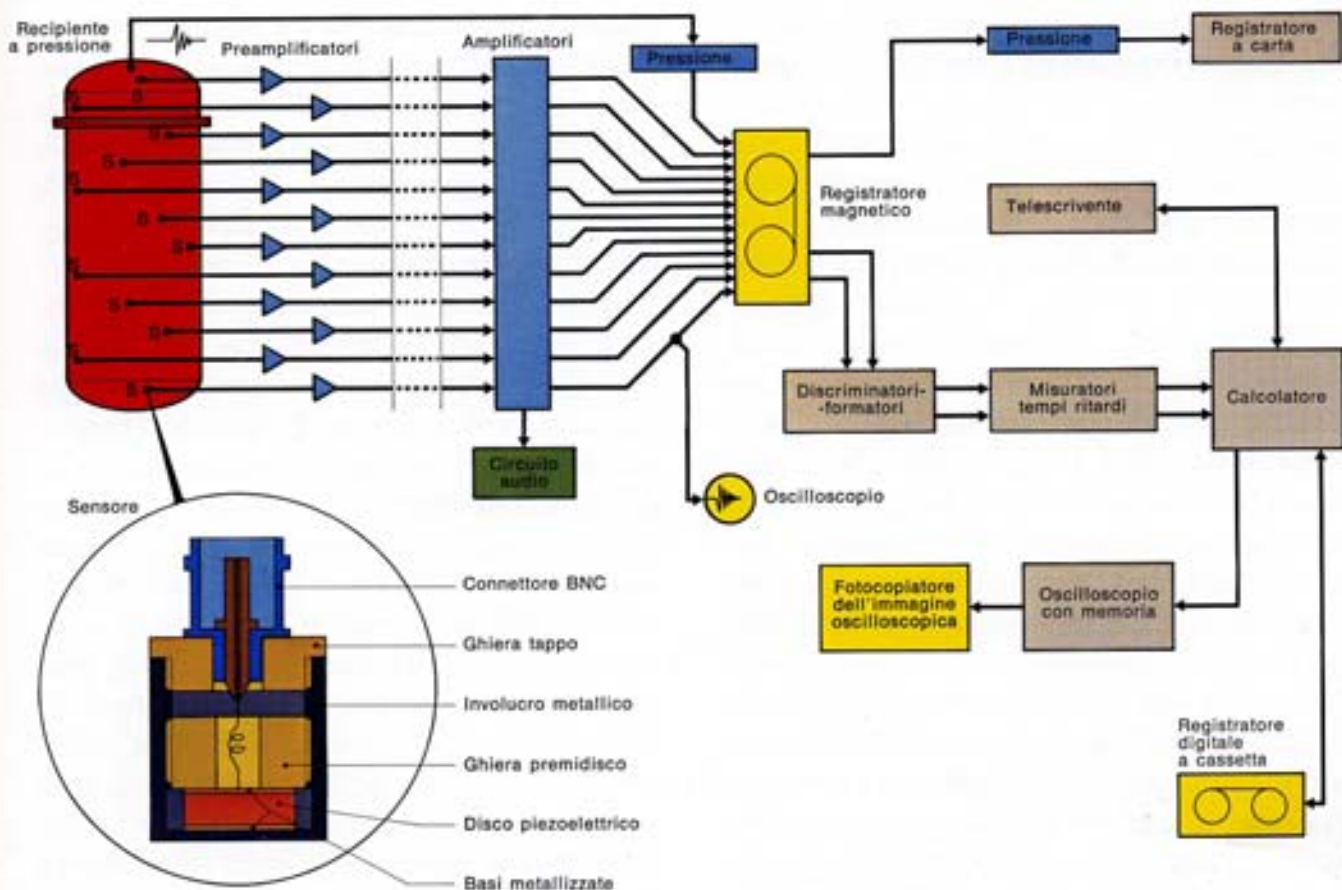


Fig. 57 - Schema a blocchi della strumentazione di un tipico sistema per analisi di emissione acustica durante prova a pressione idrostatica (v. fig. precedente). In basso a sinistra, ingrandito, il disegno di un sensore di emissione acustica.

terazioni nella struttura dei materiali stessi (quali dislocazioni, plasticizzazioni localizzate, micropropagazioni di cricche, coalescenza di microvuoti, frizioni tra grani cristallini, segregazioni e microdistacchi tra materiali diffe-

renti, etc.), può essere definita come rilascio localizzato di energia elastica. Questa energia si propaga poi a tutta la struttura sotto forma di microperturbazione vibrazionale secondo le complesse leggi di propagazione delle onde

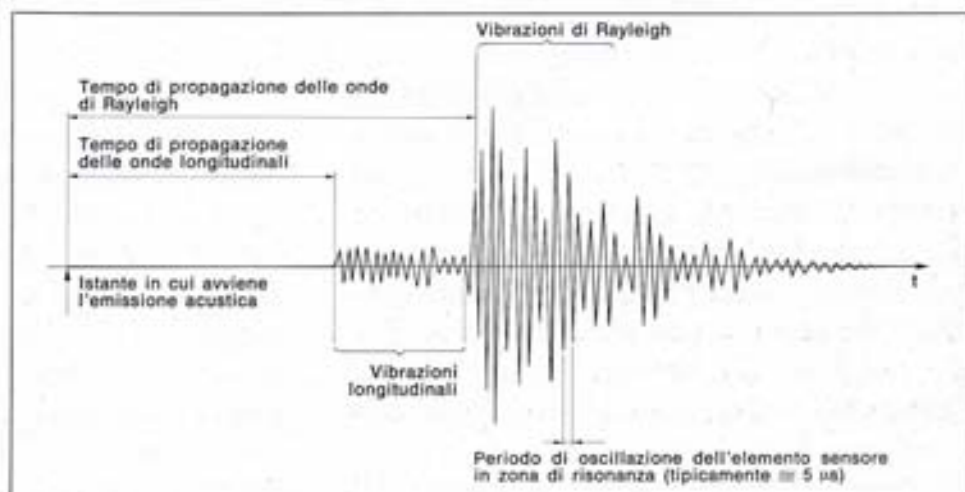


Fig. 58 - Tipico grafico di segnale di emissione acustica ottenuto con la strumentazione illustrata nella fig. precedente.

elastiche nei solidi, in modo cioè simile a quello che in scala macroscopica avviene per i terremoti.

Per la grande maggioranza dei materiali i singoli rilasci di energia elastica sono ben separati nel tempo l'uno dall'altro e si parla di emissione acustica ad impulsi (distinta per ciò stesso dall'emissione acustica « continua », caratteristica, ad esempio, dei materiali molto duttili, come l'alluminio). Ogni evento di emissione acustica costituisce un fenomeno spontaneo e sotto molti aspetti imprevedibile, che si produce in un materiale all'atto di una qualunque « propagazione » di un suo difetto interno, necessariamente in presenza di uno stato di sollecitazione che fornisce l'energia elastica rilasciata.

Le applicazioni su cui si sono indirizzate fin dall'inizio (1971) le attività del CISE hanno riguardato in particolare i recipienti a pressione dei reattori nucleari ad acqua leggera, per i quali è ben nota l'assoluta esigenza di una elevatissima affidabilità. Il primo obiettivo è stato quello della messa a punto di un sistema strumentale in grado di rivelare le emissioni acustiche che avvengono in un grande recipiente a pressione – non necessariamente nucleare – durante la sua prova a pressione (la cosiddetta prova idrostatica) (v. figg. 56, 57, 58) e di individuare sulle pareti le posizioni dei punti sorgenti delle emissioni acustiche stesse, evidentemente coincidenti con i difetti strutturali « attivi ».

La localizzazione delle sorgenti è effettuata disponendo sulle pareti del manufatto in esame un numero adeguato di sensori di emissione acustica (almeno 4), misurando le differenze  $\Delta T$  dei tempi di arrivo ai vari sensori dei singoli impulsi acustici e risalendo mediante questi  $\Delta T$ , in base alla geometria del manufatto, alle posizioni delle sorgenti.

Un successivo secondo obiettivo è quello dello sviluppo di un sistema strumentale in grado di effettuare una sorveglianza in esercizio del

recipiente a pressione di un reattore nucleare PWR o BWR, che garantisca cioè con assoluta sicurezza la rivelazione durante il funzionamento del reattore dell'emissione acustica che accompagnerebbe sin dagli stadi iniziali, e ben prima della rottura catastrofica, la crescita di una ipotetica cricca.

Il primo obiettivo può attualmente ritenersi raggiunto. Date le carenze delle apparecchiature disponibili sul mercato, è stato necessario procedere allo sviluppo di molti degli strumenti necessari: dai sensori primari e dai relativi preamplificatori ed amplificatori, ai formatori a soglia, ai dispositivi per la misura delle differenze dei tempi di arrivo ai singoli sensori delle perturbazioni vibrazionali associate alle singole emissioni acustiche, ai programmi di calcolo per la localizzazione delle sorgenti acustiche. La sensibilità della rivelazione e la precisione nella determinazione della posizione delle sorgenti acustiche sono state dimostrate in varie esperienze in laboratorio e in occasione di diverse prove idrostatiche di recipienti a pressione svolte presso industrie costruttrici. Nel 1975 è stato effettuato, con risultati molto positivi, il monitoraggio dell'emissione acustica del recipiente a pressione del reattore BWR di Caorso in occasione della prova idrostatica. Successivamente è stato approntato un sistema di auscultazione a 24 canali, che dovrebbe soddisfare ogni esigenza industriale.

L'auscultazione dell'emissione acustica di recipienti a pressione durante la prova idrostatica deve quindi essere ormai considerata una nuova tecnica di controllo non distruttivo a disposizione del costruttore e dell'utente, in grado di determinare con sicurezza e rapidamente le posizioni dei difetti acusticamente e meccanicamente « attivi » globalmente su tutto il manufatto. Questa tecnica verrà applicata a componenti a pressione di particolare rilevanza (quali reattori per impianti chimici e biforcazioni per condotte forzate).

Il secondo obiettivo è relativo specificatamente allo sviluppo di tecniche di sorveglianza in esercizio. Le difficoltà legate all'alta temperatura del manufatto possono essere superate sia mediante sensori di tipo speciale, che il CISE è in grado di progettare e costruire, sia mediante opportune guide d'onda acustica (come già fatto per il monitoraggio in esercizio a 540 °C di alcune saldature di una tubazione di vapore di centrale termoelettrica).

Un'altra notevole difficoltà quasi sempre presente è costituita dalla presenza di rumori dovuti al normale funzionamento dell'impianto, che possono grandemente ridurre l'efficacia dell'auscultazione. In questi casi è risultato opportuno utilizzare sensori di emissione acustica particolarmente sensibili ad alta frequenza (intorno al MHz), perché in questo intervallo di frequenze i rumori spuri d'impianto sono generalmente ridotti.

La sorveglianza in esercizio richiede infine apparecchiature elettroniche automatizzate in grado di effettuare una auscultazione continua e la memorizzazione precisa di tutte le emissioni acustiche significative, apparecchiature in genere non reperibili sul mercato, ma da sviluppare caso per caso. Anche a questo riguardo il CISE dispone di competenze e di esperienza specifica.

### **9.5. Diagnosi acustica di rotture in componenti a pressione**

In moltissimi processi industriali vengono utilizzati componenti, contenenti fluidi a pressione, che presentano una non trascurabile probabilità di « perforazione » (per erosione, per corro-

sione, per corrosione sotto sforzo, per difetti di costruzione, etc.). La fuoriuscita del fluido a pressione conseguente all'eventuale rottura in taluni casi può essere tollerata, almeno per valori di portata non troppo alti, ma generalmente si richiede un immediato intervento per impedire l'innescò di ulteriori processi di danneggiamento.

Per la diagnosi di rottura, particolarmente interessanti risultano le tecniche acustiche, basate cioè sulla rivelazione del rumore acustico prodotto dalla fuoriuscita del fluido dall'apertura di rottura. Le applicazioni studiate al CISE in questo campo hanno riguardato i preriscaldatori dell'acqua di alimento e le tubazioni di caldaia di centrale termoelettrica.

Nel primo caso la rivelazione di rotture nel fascio tubiero dei preriscaldatori è realizzata mediante il monitoraggio acustico del rumore di pressione dell'acqua di alimento e i sensori primari sono appunto trasduttori di pressione. Nel secondo caso viene monitorato il rumore presente nell'ambiente della caldaia e i sensori primari sono microfoni posti in corrispondenza delle portelle di ispezione.

I risultati della sperimentazione di entrambi i sistemi di sorveglianza, che si è svolta per più anni in varie centrali dell'ENEL (Vado Ligure, La Casella, La Spezia, Portovesme), sono stati molto positivi ed è attualmente in corso l'applicazione di questi sistemi a tutte le nuove centrali termoelettriche dell'ENEL. Sono inoltre allo studio altre applicazioni analoghe ad impianti nucleari. La relativa semplicità, il basso costo e l'elevata affidabilità di queste tecniche diagnostiche acustiche configurano una notevole varietà di possibili applicazioni.

## 10. STUDI SUI MATERIALI METALLICI E SVILUPPO DI TECNOLOGIE AVANZATE

### 10.1. Struttura dei materiali metallici

Lo studio della struttura dei materiali metallici implica indagini su una serie di fenomeni diversi, che vanno da quelli rilevabili in scala macroscopica – con l'ausilio di apparecchiature semplici – sino a quelli che si verificano in scala atomica, che richiedono apparecchiature sofisticate. L'importanza di tali studi è evidente se si pensa che gran parte delle proprietà – soprattutto di quelle meccaniche – è legata alle condizioni strutturali dei materiali. Al CISE i problemi strutturali sono stati seguiti con interesse da molti anni e le attrezzature disponibili hanno seguito il passo del progresso in campo strumentale. Volendo delineare le competenze del Centro in questo settore, va innanzitutto menzionata l'attività metallografica condotta per microscopia ottica (v. figg. 59 e 60). Con essa è possibile rivelare la morfologia sia nei suoi aspetti macroscopici (in strutture di solidificazione, macrosegregazione, ma-

croinclusioni, macroporosità, etc.), che necessitano per l'osservazione di ingrandimenti non superiori a  $30\times$ , sia in quelli microscopici, che implicano l'impiego di microscopi ottici dotati di un potere di risoluzione mediamente di  $1\ \mu\text{m}$  e di una possibilità di ingrandimento da  $100\times$  a  $2000\times$  circa; questi ultimi sono in grado di rilevare la granulometria, la presenza di precipitati e di inclusioni, o comunque di fasi diverse, lo spessore di strati superficiali dovuti ad alterazione chimica (diffusione, ossidazione), oppure a trattamenti meccanici. Le osservazioni qualitative possono essere corredate di dati quantitativi riguardanti la frazione in volume, la forma, le dimensioni ed il numero delle singole fasi presenti; tale risultato viene raggiunto utilizzando un'apposita strumentazione elettronica accoppiata ai microscopi.

L'indagine sull'aspetto delle superfici, difficoltosa per le caratteristiche del microscopio ottico, viene svolta al CISE per mezzo della microscopia elettronica a scansione (v. fig. 61),



Fig. 59 - Microscopi metallografici, con cui si effettuano esami sulla microstruttura di metalli e leghe, sia per qualificarli, sia per rilevare fenomeni indotti da trattamenti termici, meccanici, chimici.



Fig. 60 - Banco per la preparazione meccanica e chimica dei campioni da sottoporre ad esame metallografico.

con la quale, grazie alla grande profondità di campo, si rilevano direttamente i particolari delle superfici di frattura, o comunque la presenza di fasi di forma e composizione diverse, con possibilità di operare praticamente ad ingrandimenti da  $300 \times$  a  $30\,000 \times$ , mantenendo la risoluzione a 10 nm. L'accertamento quantitativo della composizione, eseguito su zone molto ristrette, dell'ordine di pochi  $\mu\text{m}$  di diametro e profondità, è eseguibile entro la stessa apparecchiatura utilizzata come microsonda, che consente di ottenere dati numerici o mappature di tutti gli elementi della tavola periodica, a partire dal boro, con limiti di rile-

vabilità che vanno dalla decina a qualche centinaio di ppm, secondo l'elemento.

Con le tecniche di microscopia elettronica a trasmissione esistenti al CISE (v. fig. 62) vengono indagati invece anche i fenomeni che intervengono a livello di struttura cristallina, con una risoluzione dell'ordine di 1 nm.

Oltre all'esame di aspetti morfologici particolari - ad esempio forma e disposizione di precipitati molto fini - è infatti possibile rilevare gli effetti delle deformazioni meccaniche o dei trattamenti termici attraverso l'osservazione di difetti reticolari, quali dislocazioni o difetti di impilamento. Nel microscopio elettronico a trasmissione, poi, è direttamente applicabile la tecnica di microdiffrazione, che consente, noti i parametri cristallini, di rilevare la natura delle fasi e le giaciture dei piani cristallini, rendendo così possibile, ad esempio, lo studio della coerenza tra le interfacce di fasi diverse.

La microdiffrazione elettronica, per sua natura, si presta male alla determinazione dei parametri cristallini, che sono invece di norma determinati con un diffrattometro a raggi X, che consente di individuare le radiazioni X diffratte sia con un contatore accoppiato a un goniometro, sia con pellicola, secondo la tecnica di Debye. Con quest'ultimo metodo è anche pos-

Fig. 61 - Microscopio elettronico a scansione (Jeol 50A) con possibilità di microanalisi di raggi X di fluorescenza mediante sistema dispersivo sia in lunghezza d'onda, sia in energia. Viene utilizzato per l'esame delle superfici di frattura metalliche, di origine meccanica o da corrosione; tra le altre possibilità vi è quella di esaminare materiali semiconduttori e dispositivi con essi realizzati. La microanalisi consente l'accertamento qualitativo e quantitativo della composizione di volumi molto ridotti di materiale (circa  $10 \mu\text{m}^3$ ), rendendo ad esempio possibile l'identificazione di precipitati ed inclusioni nei metalli.





Fig. 62 - Microscopio elettronico a trasmissione (Philips M300) con diffrazione elettronica per lo studio di fasi e difetti reticolari nei materiali metallici. Ad esempio, esso viene impiegato per lo studio della forma e dei parametri cristallini di idruri, carburi, fasi intermetalliche in genere. Viene inoltre studiata l'evoluzione dei difetti cristallini (dislocazioni, difetti di impilamento) conseguente a trattamenti termici e/o meccanici su leghe, quali gli acciai inossidabili, lo Zircaloy, etc.

sibile seguire fenomeni di nucleazione dei grani e ricristallizzazione.

A titolo informativo si citano taluni materiali esaminati al CISE: acciai, leghe di rame, acciai inossidabili, leghe di nichel, di zirconio, di alluminio, ossidi di uranio sinterizzati, leghe rinforzate per dispersione, etc.

Non va trascurata in questa panoramica l'attività di metallografia effettuata su elementi di combustibile tipo CIRENE e tipo BWR ir-



Fig. 63 - Apparecchiatura per l'analisi del tenore di idrogeno nei metalli mediante estrazione a caldo sotto vuoto. È stata impiegata prevalentemente per l'analisi della quantità di idruri contenuti nelle leghe di zirconio.

raggiati a diversi tassi di irraggiamento in reattori nucleari; questi esami sono stati effettuati in una cella schermata appositamente progettata e costruita.

Gli studi sulla struttura dei materiali vengono applicati non solo a manufatti, a parti sollecitate in esercizio, a componenti corrosi, ma anche, con altrettanta frequenza, ad indagini sul comportamento dei materiali stessi al variare di parametri chimici, termici, meccanici. Per studi

di questo genere è possibile, presso il CISE, intervenire sui parametri principali; ad esempio, è operante l'attrezzatura per la preparazione di piccoli campioni, con modifiche nella composizione elementare, grazie all'impiego di forni ad arco o a resistenze per alte temperature. È pure possibile praticare interventi volti a fare assorbire o desorbire (v. fig. 63) gas da metalli - soprattutto idrogeno da leghe di zirconio - per accertarne la suscettibilità a processi di infragilimento in esercizio. Quanto ai parametri termici, è eseguibile una vasta gamma di interventi. Sono disponibili numerosi forni per trattare termicamente campioni - anche sino a 2000 °C - o studiare processi di sinterizzazione. Una notevole esperienza si sta pure accumulando sui processi di saldatura in genere, e su quelli delle leghe di zirconio e degli acciai inossidabili in particolare.

Si ricorda inoltre la possibilità di studiare l'influenza di trattamenti meccanici, eseguendo trafilature, laminazioni, trazioni, compressioni, torsioni a temperatura ambiente o a bassa temperatura.

## **10.2. Materiali metallici con caratteristiche avanzate**

Il progresso tecnologico e, in certi casi, la necessità di un risparmio energetico richiedono incessantemente lo studio e la messa a punto di nuovi materiali metallici con caratteristiche avanzate, soprattutto per quanto riguarda le proprietà meccaniche. A questo proposito un campo di indagine promettente, ancora in evoluzione, è rappresentato dai materiali compositi a composizione eutettica e orientati monodirezionalmente, con matrice metallica e fase rinforzante costituita da un composto intermetallico. Gli impieghi di questi materiali potrebbero essere molteplici; ad esempio alcuni mostrano caratteristiche ottimali per eventuali applicazioni in parti di turbine sottoposte ad alte temperature; altri potrebbero invece avere mo-

duli di elasticità specifici molto elevati, che li renderebbero interessanti là dove siano richiesti materiali a bassa densità.

Al CISE da alcuni anni si studiano materiali a composizione eutettica, soprattutto a base di nichel (leghe nichel-tantalo-cromo) per impieghi ad alte temperature. Si sono ottenuti campioni cilindrici di tali materiali, che sono stati sottoposti a prove meccaniche ed a prove di compatibilità in ambienti diversi. Ai campioni si perviene dopo fusioni preliminari dai metalli di base - e dopo una rifusione seguita da una solidificazione lenta e progressiva in presenza di un opportuno gradiente assiale di temperatura. Dopo questo trattamento il materiale risulta bifasico, con la fase rinforzante allineata ed intercalata dalla matrice metallica; la solidificazione lenta assicura un buon equilibrio termodinamico tra le fasi e quindi una elevata stabilità anche ad alte temperature.

## **10.3. Corrosione di materiali metallici**

Uno dei problemi che talora vengono sottovalutati nell'industria, in sede di progettazione di impianti, riguarda la compatibilità dei materiali di cui sono costituiti i vari componenti con i fluidi circolanti nell'impianto stesso. Se si considera che, secondo stime recenti, i danni, sia diretti che indiretti, provocati dalla corrosione ammonterebbero a circa il 3,5% del reddito nazionale lordo (qualcosa intorno ai 3000 miliardi di lire all'anno), si può facilmente capire l'importanza effettiva di questo tipo di problemi.

Il CISE è impegnato da parecchi anni in attività riguardanti la corrosione dei materiali metallici, ed ha via via acquisito una gamma di conoscenze abbastanza ampia, familiarizzandosi con numerosi tipi di materiali (ognuno infatti ha le sue particolari caratteristiche di comportamento), utilizzati sia in campo nucleare che convenzionale. A seconda delle ca-





Fig. 64 - Circuito HECO-1 (Heat Exchanger CORrosion-1), impiegato per prove di corrosione, anche in condizioni di scambio termico, su materiali per impieghi nucleari (Zircaloy, Inconel, etc.) e convenzionali (acciai al carbonio, acciai inossidabili, etc.); in esso sono possibili il controllo in continua delle caratteristiche chimico-fisiche dei fluidi circolanti (soluzioni acquose) e l'aggiunta di additivi ed impurezze per simulare le condizioni reali di impiego dei materiali in prova.

ratteristiche di impiego - ambiente, temperatura, pressione, etc. -, è necessario disporre degli opportuni dispositivi per eseguire i controlli sperimentali nelle condizioni appropriate. Sono attualmente disponibili impianti di prova che permettono di operare in differenti condizioni.

Gli impianti sperimentali sono del tipo a ciclo chiuso (v. fig. 64), con una parte ad alta pressione, che comprende una pompa dosimetrica per la circolazione dell'acqua, un preriscaldatore, un bollitore e la sezione di prova, ed una parte a bassa pressione, formata dal depressurizzatore, dal circuito di raffreddamento, da un sistema di purificazione con filtri e resine a

scambio ionico, e da un degasatore che agisce anche da serbatoio di riserva. Nella zona a bassa pressione vengono anche introdotti nell'impianto gli additivi desiderati e vengono controllate le caratteristiche chimiche dell'acqua circolante.

Se si impiega come fluido l'acqua od il vapore è possibile effettuare prove da condizioni ambiente fino a circa 330 °C e 130 kg/cm<sup>2</sup>. Qualora siano più appropriate prove di tipo statico, si utilizzano autoclavi (v. fig. 65). Se invece sono necessarie prove di tipo dinamico, sono impiegati circuiti sperimentali in cui l'acqua ed il vapore vengono fatti fluire con le velocità desiderate. Ovviamente vengono aggiunte so-



Fig. 65 - Batteria di autoclavi in acciaio inossidabile, per prove di corrosione, fretting corrosion e stress corrosion in acqua o vapore, con o senza additivi, fino a temperatura di 500 °C e pressione di 150 kg/cm<sup>2</sup>. Le prove riguardano materiali diversi, come Zircaloy, Inconel, acciai austenitici e martensitici, e giunzioni tra materiali diversi (Zircaloy-2/acciaio inossidabile, Zircaloy-2/platino, etc.).

stanze chimiche - reattivi o gas - (ad es. ammoniaca, cloruri, fosfati, idrogeno, ossigeno, etc.), in modo tale da riprodurre il più fedelmente possibile le condizioni operative reali, oppure in modo da accelerare artificialmente il fenomeno e poterne vedere con congruo anticipo le conseguenze.

Per particolari tipi di indagini (materiali di interesse nucleare), circuiti di questo tipo sono

stati installati in reattori nucleari da ricerca (v. anche par. 7.2); alle difficoltà di una normale sperimentazione si sono aggiunti in questo caso tutti i problemi posti dall'interazione del circuito con l'impianto nucleare (sicurezza, affidabilità, etc.) e dall'effetto delle radiazioni sui materiali e sui fluidi in esame (radioattivazione, radiolisi, etc.).

La maggior parte delle attività sperimentali finora svolte ha riguardato lo studio del comportamento di acciai inossidabili, leghe di zirconio e leghe di nichel, di cui si prevede l'impiego a temperature abbastanza elevate (250-330 °C) e nelle condizioni di esercizio più diverse.

Una sperimentazione analoga è stata svolta, ed è tuttora in corso, nel campo della corrosione in ambiente gassoso. Anche in questo caso vale quanto detto in precedenza: le ricerche vengono effettuate usando le attrezzature che più fedelmente simulano le condizioni reali, sia per quanto riguarda la temperatura (dove i valori massimi finora utilizzati in prove a lungo termine sono di circa 600 °C), che la velocità del gas, la pressione, il grado di purezza o l'aggiunta di contaminanti, etc.

Quando invece si voglia studiare la corrosione a temperatura ambiente, o comunque a valori



Fig. 66 - Laboratorio di elettrochimica, in cui si effettuano ricerche sulla corrosione a temperature non elevate di materiali per impiego in condensatori e circuiti di raffreddamento di impianti termoelettrici, in rivestimenti di dighe, etc..



Fig. 67 - Paramento metallico della diga a gravità dell'Alpe di Gera (impianto idroelettrico del Mallero, dell'ENEL). In primo piano si notano le funi metalliche, tese trasversalmente al bacino, che fungono da anodi per il sistema di protezione catodica a corrente impressa, realizzato dal CISE.

di poco superiori, è chiaramente intuibile che non sono sempre necessarie attrezzature di prova particolarmente impegnative e sofisticate: ed infatti si sono potuti affrontare numerosi problemi, abbastanza differenti tra loro, ma che richiedono come denominatore comune una competenza specialistica analoga, con gli apparecchi scientifici di base di cui è dotato il laboratorio di elettrochimica (v. fig. 66). In questo ambito sono state effettuate ricerche

che vanno dall'esame del comportamento di materiali studiati per l'utilizzazione in acqua di mare allo studio di effetti corrosivi dell'acqua di buona purezza.

Un particolare esempio applicativo di tali ricerche è dato dallo studio del fenomeno di corrosione a cui sono sottoposti i rivestimenti metallici di alcune dighe di bacini idroelettrici dell'Italia Settentrionale (v. fig. 67). Si è quindi definito il più adatto sistema di protezione (sia attiva, mediante protezione catodica con anodi a corrente impressa, sia passiva, mediante verniciatura) per bloccare il processo corrosivo in atto.

Non si può chiudere una panoramica sulle attività riguardanti la corrosione di materiali metallici, effettuata per ovvii motivi in termini molto generali, senza citare taluni aspetti particolari che però rivestono una notevole importanza. Ci si riferisce alle ricerche condotte per studiare quei processi in cui la corrosione è assistita da particolari situazioni meccaniche del materiale in esame. Due problemi classici, che richiedono tuttora un notevole impegno di lavoro, sono la «stress-corrosion», o corrosione sotto sforzo, e la «fretting corrosion», o corrosione per sfregamento (v. par. 6.3). Quest'ultima problematica ha stimolato l'avvio di una



Fig. 68 - Apparecchiatura SIMS (Secondary Ion Mass Spectrometer) impiegata negli studi sugli attriti e l'adesione di materiali metallici; essa è in grado di analizzare strati superficiali molto sottili (dell'ordine di qualche Å) di metalli o leghe.

attività, nata al CISE solo recentemente, che riguarda, in termini più generali, gli studi sulla chimica-fisica delle superfici (v. fig. 68), studi che in questi anni stanno assumendo su scala mondiale una rilevanza sempre crescente.

Le attività descritte in questo paragrafo richiedono ovviamente la disponibilità di servizi e attrezzature in appoggio, che vanno dai classici sistemi di decapaggio (v. fig. 69) a sofisticate apparecchiature per il controllo dei profili superficiali di campioni metallici (v. fig. 70).



Fig. 69 - Vasche in moplén per trattamenti di sgrassaggio, decapaggio e passivazione di materiali metallici diversi (alluminio, acciai inossidabili, Zircaloy, ottoni, etc.). Tali trattamenti vengono effettuati su componenti di impianti e su campioni per prove di corrosione.



Fig. 70 - Apparecchiatura Talysurf per la determinazione della rugosità e del profilo di superfici, impiegata per la caratterizzazione di campioni di materiali per prove di corrosione, per la determinazione di corrosioni localizzate sui campioni (fretting corrosion), per la qualificazione di manufatti (ad esempio, tubi a pressione del CIRENE), etc.

#### 10.4. Prove meccaniche sui materiali metallici

Le prove meccaniche sui materiali svolgono un ruolo determinante nell'arco di un moderno sviluppo tecnologico che, partendo dallo studio di nuovi materiali, si conclude nella realizzazione di componenti o strutture di elevate prestazioni. Questa disciplina, nota nei suoi aspetti più tradizionali, si è arricchita in anni recenti di nuovi campi di studio, quali la meccanica della frattura e l'emissione acustica (v. fig. 71).

La meccanica della frattura tende a risolvere il problema antichissimo, ma ancor oggi sfuggibile, della fragilità, fornendo un'interpretazione quantitativa del fenomeno, che è legato ai parametri microstrutturali del materiale ed alle sue condizioni di utilizzazione.

L'emissione acustica, che si sta sempre più affermando anche come interessante metodo di indagine sui materiali, è basata sull'analisi dell'informazione contenuta nei segnali emessi da un campione sotto sforzo (v. anche par. 9.4). Questi segnali sono legati, nel loro contenuto di informazione, all'intima struttura del materiale ed al processo di deformazione o frattura in corso.

Nel settore delle prove meccaniche sui materiali, per cui il CISE dispone di una moderna attrezzatura adatta per misure di tipo classico (macchine di trazione, pendolo di Charpy, etc.), esso svolge, nei campi della meccanica della frattura e dell'emissione acustica, ricerche tendenti sia a definire il comportamento a frattura di acciai per recipienti a pressione nucleari e di acciai ad alta resistenza, sia a chiarire il ruolo svolto dai parametri microstrutturali di questi materiali sui meccanismi elementari di deformazione e frattura.

Un altro campo di interesse è l'analisi sperimentale delle sollecitazioni, che si fonda sulla rilevazione delle deformazioni meccaniche superficiali di strutture tramite estensimetri elet-



Fig. 71 - Sistema di apparecchiature mediante il quale si fanno indagini sulla correlazione tra le proprietà meccaniche dei materiali - in particolare degli acciai per recipienti a pressione nucleari - e le caratteristiche dei segnali di emissione acustica rilevati durante le prove di trazione, di torsione e di meccanica della frattura. A destra, è visibile la macchina Instron per prove sui materiali, da 10 t; a sinistra, l'apparecchiatura per il condizionamento e l'amplificazione dei segnali di emissione acustica; al centro, il registratore magnetico Ampex 3000 a 14 tracce, per la registrazione simultanea di tutti i dati rilevati.

trici a resistenza (v. fig. 72). Questo tipo di sperimentazione è stato applicato in particolare alla determinazione dello stato di autotensione delle giunzioni mandriate (v. par. 10.6).

### 10.5. Caratterizzazione di manufatti e di materiali metallici

Fra le attività svolte al CISE per la caratterizzazione di manufatti e materiali, meritano di essere citati gli studi relativi a manufatti utilizzati come componenti strutturali di reattori a tubi a pressione. Si tratta di manufatti tubolari, realizzati in lega zirconio-stagno (Zircaloy-2), che si presta particolarmente a questo impiego, unendo ad ottime caratteristiche meccaniche e di resistenza chimica una sezione di cattura neutronica molto bassa. Nei reattori a tubi, quali il CIRENE, questi manufatti svolgono essenzialmente due funzioni: la prima, svolta dai tubi a pressione, è quella di contenere il fluido primario, caldo e ad alta pressione; la seconda, svolta dai tubi di iso-

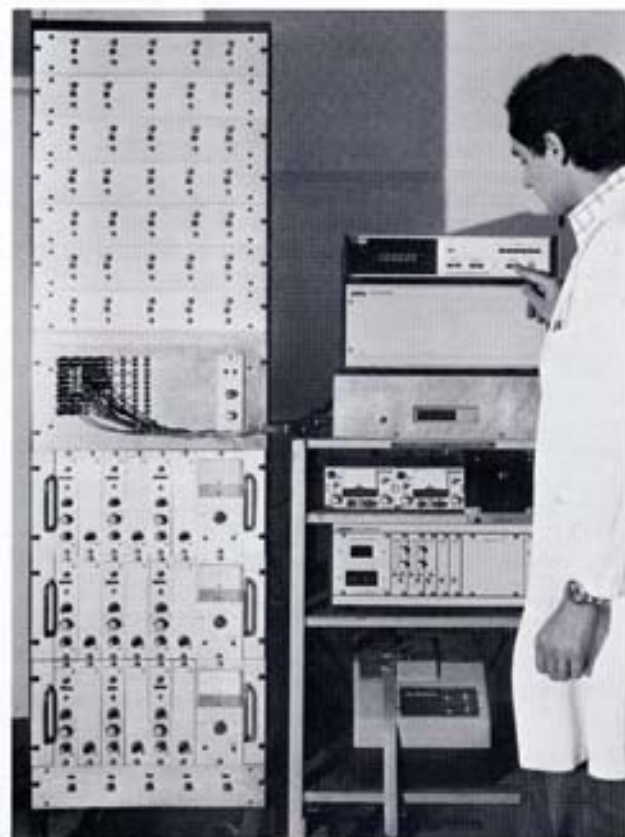


Fig. 72 - Apparecchiature per l'analisi sperimentale delle sollecitazioni. Questa attrezzatura, di uso generale, consta di una centralina a ponti di Wheatstone per il « condizionamento » di segnali estensimetrici e di un sistema di acquisizione dei dati, che vengono successivamente elaborati mediante calcolatore.

lamento, consiste nel creare una separazione (barriera termica) fra il tubo a pressione, caldo, ed il moderatore, costituito da acqua pesante fredda. Altri tubi in Zircaloy-2 sono utilizzati nel nocciolo del reattore (almeno nella versione CIRENE) per il convogliamento di acqua borata (barre fluide di regolazione ed arresto rapido).

Va da sé che a questi manufatti, ed in particolar modo al tubo a pressione, si richiedono un'elevatissima affidabilità ed una caratterizzazione molto spiccata per quanto riguarda le proprietà meccaniche e fisiche d'interesse per i progettisti. Trattandosi di materiali che non sono ancora stati accettati dalla normativa nucleare consolidata per l'impiego in strutture di contenimento della pressione del circuito primario, e che sono inoltre caratterizzati da un comportamento nettamente anisotropo, si è reso necessario studiarli approfonditamente, sia nelle condizioni iniziali d'impiego, sia dopo prolungati irraggiamenti.

Questi studi, condotti dal CISE nell'arco di più di un decennio, hanno comportato l'acquisizione di una conoscenza molto ampia di questi manufatti, per quanto riguarda sia l'ottimizzazione dei processi di fabbricazione che la loro caratterizzazione.

Circa le caratteristiche fisiche, si sono studiati il modulo elastico longitudinale e trasversale in funzione della temperatura, rilevato con metodi sia dinamici che statici, il coefficiente di dilatazione termica, le transizioni di fase; si è proceduto ad un'estesa caratterizzazione metrologica e difettoscopica dei manufatti, nonché a quella morfologica nelle varie condizioni d'esercizio.

Circa le caratteristiche meccaniche, particolare attenzione è stata dedicata: alle proprietà tensili monoassiali nelle varie condizioni d'esercizio (materiali vergini, idrurati e/o irraggiati), entro un ampio intervallo di temperature (fino a 750 °C); alle proprietà meccaniche in condi-



Fig. 73 - Esempari di giunzioni mandrinate: quella a sinistra, del tipo a « sandwich », è utilizzata per la transizione Zircaloy-2/acciaio nella parte superiore del tubo a pressione CIRENE; quella a destra, del tipo « convenzionale », è utilizzata per detta transizione nella parte inferiore del tubo stesso. La giunzione a sandwich differisce essenzialmente da quella convenzionale per il fatto che in essa lo Zircaloy si trova compresso tra l'acciaio del prolungamento di estremità del canale ed un anello esterno pure in acciaio.

zioni biassiali (prove di scoppio) a varie temperature, anche qui nelle varie condizioni di esercizio; all'influenza di difetti sul comportamento a scoppio; alla valutazione della duttilità di manufatti saldati, con riferimento al materiale di partenza.

Questo tipo di conoscenza costituisce il necessario supporto all'attività di progettazione di reattori a tubi, per l'elaborazione sia delle specifiche di fornitura, sia del progetto e della verifica dei manufatti considerati nelle condizioni di riferimento, nonché anomale e d'emergenza.

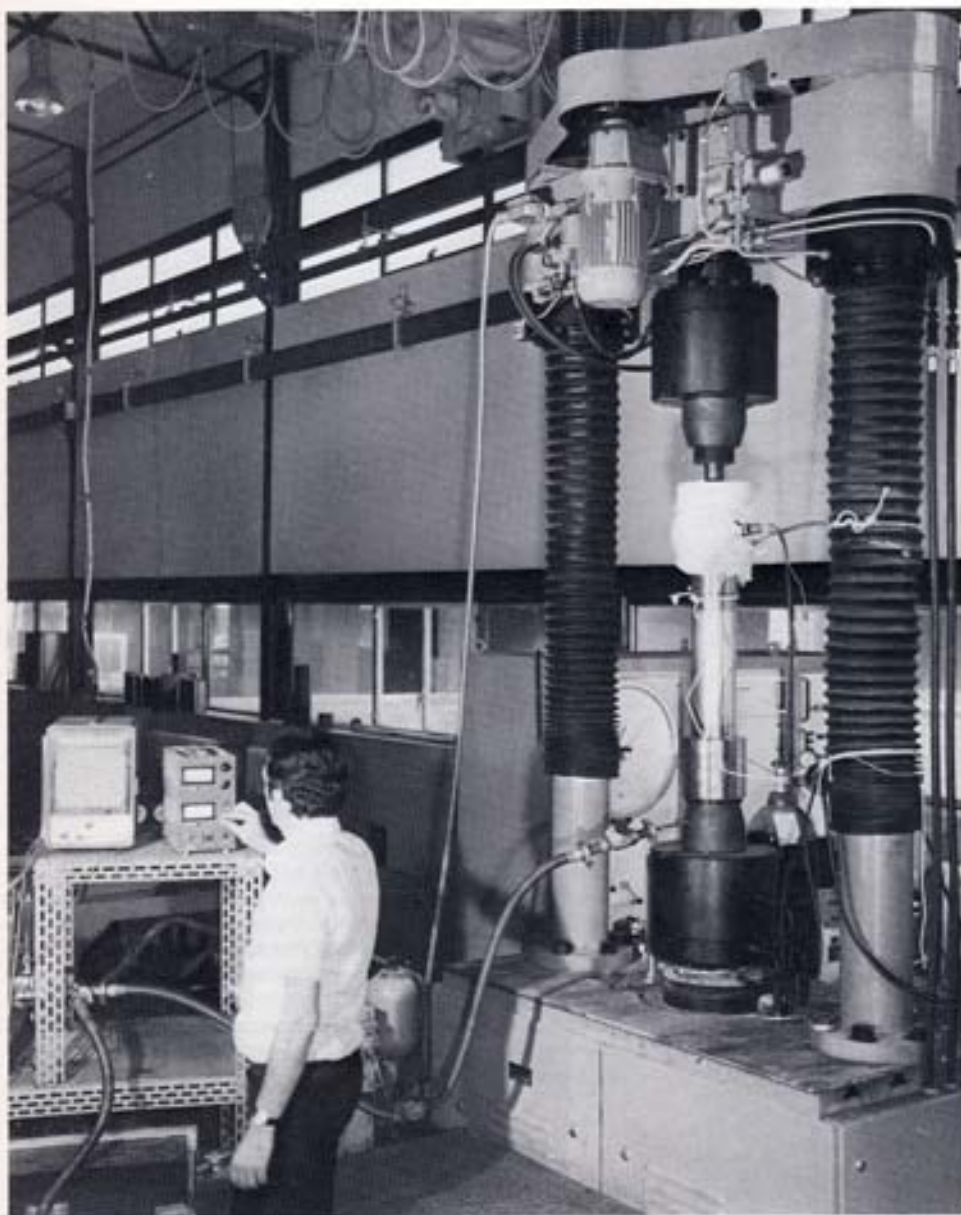


Fig. 74 - Macchina Lösenhausen UHS60, per prove di trazione e compressione. È utilizzata per la caratterizzazione meccanica delle giunzioni mandrinare dei diversi canali del reattore CIRENE e dei tubi di Zircaloy-2 (v. fig. 73). La portata della macchina è di 60 t.



Fig. 75 - Impianto per lo studio delle caratteristiche di tenuta delle giunzioni mandrinare del tubo a pressione del reattore CIRENE mediante prove a lungo termine a pressione e temperatura (v. fig. 73). L'impianto è costituito di sei unità, e consente quindi di provare contemporaneamente sei campioni a doppio giunto.

## 10.6. Sviluppo della tecnologia dei giunti mandrinati

I problemi tecnologici posti dall'ingegneria nucleare spesso non si differenziano sostanzialmente, in linea di principio, da quelli affrontati dall'industria tradizionale. Tuttavia la loro soluzione richiede una fase di sviluppo ed una messa a punto assai spinte affinché siano garantite quelle caratteristiche di prestazioni ed affidabilità richieste dall'applicazione nucleare. Parecchie di queste applicazioni sono state studiate e messe a punto al CISE nel quadro di vari programmi di sviluppo ad esso affidati. Si sorvolerà su svariati problemi la cui soluzione, pur presentando un indubbio interesse anche sul piano industriale tradizionale, non

ha richiesto l'esecuzione di estesi programmi (per esempio, messa a punto di processi speciali di saldatura fra materiali diversi e di giunzioni meccaniche di elevate caratteristiche, etc.).

Ci si soffermerà invece a descrivere, dato il carattere esemplare e l'importanza che essa riveste per reattori nucleari del tipo a tubi a pressione, quale il CIRENE, il lavoro svolto al CISE per la messa a punto e la qualificazione di giunti di transizione fra due materiali impiegati per il circuito primario e per altri elementi del reattore, e cioè acciaio inossidabile (austenitico o martensitico) e Zircaloy-2.

La necessità di impiegare, nel nocciolo, manufatti di Zircaloy-2, per ottenere l'indispensabile economia neutronica, comporta infatti la realizzazione di un collegamento estremamente

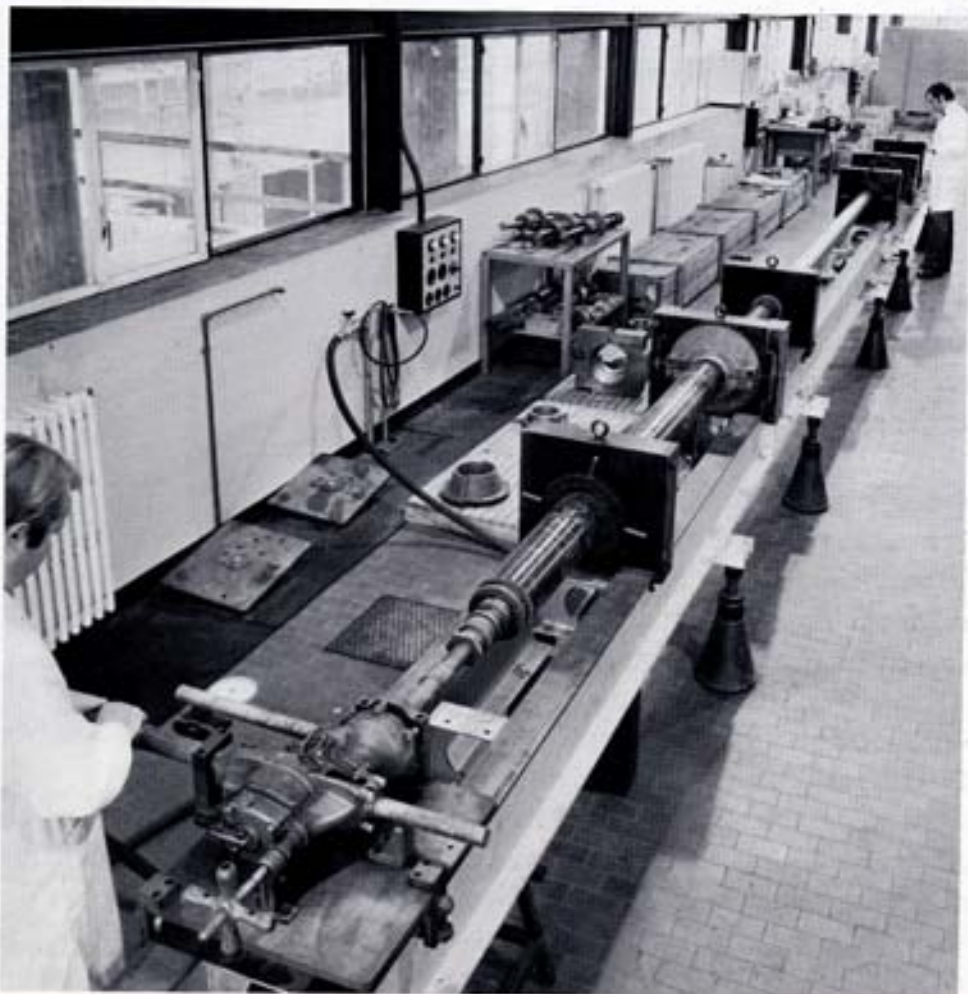


Fig. 76 - Banco di mandrinatura con relativa attrezzatura (di proprietà del CNEN): offre un piano di lavoro di 12 m di lunghezza e 0,4 m di larghezza. Esso è stato studiato per la messa a punto del processo di fabbricazione delle giunzioni mandrinate Zircaloy-2/acciaio (v. fig. 73) dei vari tipi di canali da impiegare nel reattore prototipo CIRENE.



affidabile, dal punto di vista sia della resistenza meccanica, sia della tenuta, fra lo Zircaloy-2 ed il materiale utilizzato all'esterno della zona attiva, cioè appunto l'acciaio inossidabile. Inoltre, date le difficoltà ed i costi connessi a sostituzioni dopo l'avviamento dell'impianto, questi giunti debbono offrire garanzie di buon funzionamento nell'arco dell'intera vita dell'impianto stesso.

Non potendosi ricorrere, per ragioni metallurgiche, a processi di saldatura, il problema è stato affrontato e risolto con un programma assai ampio e complesso di studio e messa a punto di un processo di mandrinatura. Gli aspetti da affrontare erano molteplici: i giunti dovevano fornire elevate prestazioni, con tassi di fuga estremamente ridotti, entro campi di temperatura notevolmente estesi, pur avendo i due materiali costituenti coefficienti di dilatazione molto diversi tra loro; le differenti esigenze di ingombro richiedevano inoltre lo sviluppo di giunti di svariate geometrie, appartenenti a due tipi fondamentali: uno convenzionale, l'altro a « sandwich », ottenuto mandrinando il tubo fra un nocciolo interno ed un anello esterno (v. fig. 73). Di questi giunti è stato studiato il comportamento in varie condizioni operative e di emergenza con opportune attrezzature (v. figg. 74 e 75). È stato anche eseguito un sofisticato esame delle sollecitazioni congelate nei materiali a seguito delle operazioni di mandrinatura.

Per caratterizzare il comportamento dei giunti in condizioni anomale, tipiche di situazioni incidentali, alcuni esemplari di essi sono stati sottoposti ai transitori termici che si verificano nel canale di potenza in caso di assenza di portata (incidente LOCA).

Queste prove consistevano nel sottoporre giunti di tipo convenzionale presenti nel canale ad una rapida salita di temperatura dalle condizioni nominali ( $\sim 250$  °C) ad oltre 600 °C, seguita da un brusco raffreddamento (intorno ai 100 °C), rappresentativo di quello do-



Fig. 77 - Attrezzatura per la messa a punto del processo di fabbricazione in sito delle giunzioni mandrinate dei tubi di calandria (di isolamento, di arresto rapido e strumentati) del reattore CIRENE (v. fig. 73). L'attrezzatura è dotata di due macchine per la mandrinatura, una superiore ed una inferiore (v. le due figg. successive) e riproduce le condizioni geometriche proprie del reattore: in particolare, essa misura circa 25 m di altezza.

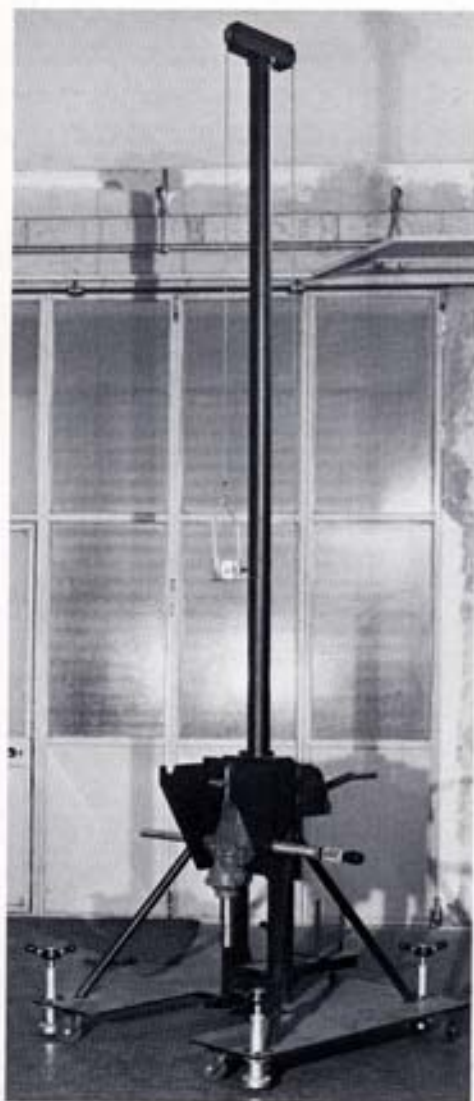


Fig. 78 - Macchina superiore dell'attrezzatura mostrata nella fig. precedente: con essa si effettua la mandrinatura delle giunzioni superiori dei tubi di calandria. Tale macchina permette di effettuare l'operazione sia con la tecnica usualmente impiegata per le giunzioni mandrinate, sia con la tecnica del «protractive rolling», che permette all'utensile di avanzare gradualmente mentre si effettua la prima fase di mandrinatura.

vuto all'iniezione di acqua relativamente fredda proveniente dal sistema di raffreddamento d'emergenza. Per l'esecuzione di queste prove è stata realizzata un'apposita apparecchiatura, denominata SHOT (SHOCK Termico). Il programma di prove ha dimostrato che le mandrinature sono in grado di assicurare, an-

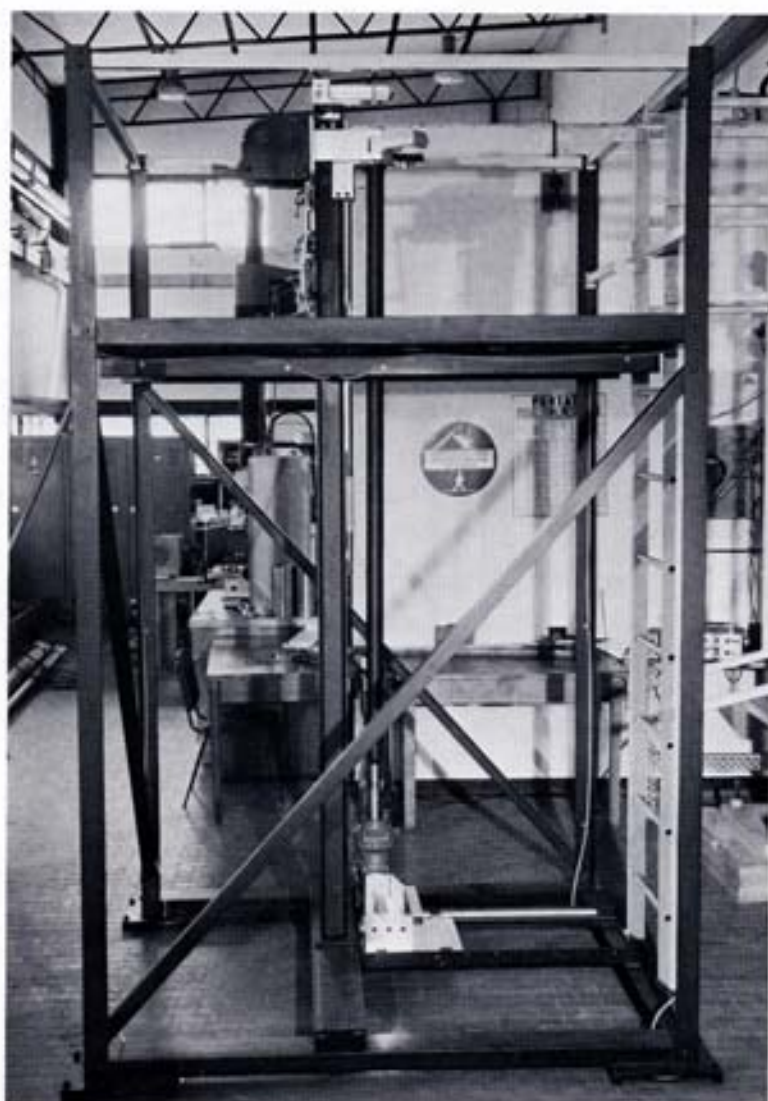


Fig. 79 - Macchina inferiore dell'attrezzatura mostrata nella fig. 77: con essa si effettua la mandrinatura delle giunzioni inferiori dei tubi di calandria. Tale macchina viene rapidamente e facilmente posizionata grazie ad un dispositivo costituito da quattro cuscinetti ad aria compressa disposti ai vertici della base dell'incastellatura e capaci di sollevare l'insieme a circa 2 mm dal suolo.

che in corrispondenza di eventi accidentali di questa gravità, la continuità geometrica e meccanica del canale di potenza, nonché una tenuta verso l'esterno del tutto soddisfacente, seppure inferiore a quanto richiesto dalle specifiche di fabbricazione.

Altri giunti mandrinati, sempre di tipo con-

venzionale, sono stati sottoposti a sollecitazioni meccaniche di tipo dinamico, per valutare la loro capacità di resistenza a sollecitazioni meccaniche di tipo impulsivo che potrebbero verificarsi in altre ipotesi di incidente. Anche per l'esecuzione di queste prove è stato necessario realizzare una apposita apparecchiatura, denominata SHOMEK (SHOCK MECCANICO), in grado di applicare al campione in esame cicli di trazione e compressione di frequenza dell'ordine dei 50 Hz, con carichi fino a circa 8000 kg. Anche in questo caso il comportamento dei giunti è risultato adeguato.

Questa attività ha comportato una completa qualificazione delle procedure di fabbricazione; per i giunti da eseguire in cantiere, la qualificazione è stata estesa al più complesso ciclo

realizzativo, dal posizionamento del tubo da mandrinare fino ai controlli d'accettabilità del giunto finito. Inoltre è stato affrontato e risolto il problema della sostituzione di tubi già installati in caso di mandrinatura difettosa. Nella fase esecutiva è stato necessario progettare e realizzare tutta l'attrezzatura indispensabile per la corretta esecuzione delle varie operazioni previste, che sono state tutte provate e messe a punto sperimentalmente su opportuni modelli a piena scala (v. figg. 76, 77, 78, 79). La fase conclusiva di questa attività comprende la trasmissione all'industria di tutte le conoscenze necessarie per poter produrre direttamente le giunzioni così messe a punto, anche attraverso un opportuno periodo di addestramento del personale necessario.

## 11. SVILUPPO DI MATERIALI PER L'ELETTRONICA E DI DISPOSITIVI ELETTRONICI

### 11.1. Attività sui materiali semiconduttori

Il CISE ha sviluppato, nel campo dei materiali per l'elettronica, una attività strettamente legata alle esigenze dei dispositivi elettronici speciali di cui si parlerà in seguito (v. par. 11.3). Lo studio è stato focalizzato su due classi di materiali semiconduttori composti, appartenenti rispettivamente ai gruppi III-V e II-VI della tabella di Mendeleeff: più in particolare, sono state sviluppate le tecniche di sintesi e crescita di monocristalli di GaAs (arseniuro di gallio), GaP (fosfuro di gallio) (v. fig. 80), (HgCd)Te (tellururo di cadmio e mercurio) (v. fig. 81) e (PbSn)Te (tellururo di piombo e stagno). Accanto a queste tecniche sono state sviluppate quelle di crescita epitattica, sia attraverso la fase vapore, sia da soluzione, di GaAs (v. fig. 82), (GaAl)As (arseniuro di alluminio e gallio) e GaP.

Con oltre 10 anni di attività in questo campo, il CISE possiede le competenze necessarie per crescere monocristalli di un gran numero di semiconduttori composti, con elevate caratteristiche di purezza o con concentrazioni predeterminate di elementi « droganti ». Altrettanto si può dire per quanto riguarda la crescita epitattica (v. figg. 83 e 84), attraverso la quale sono state realizzate strutture a molti strati, anche di materiali semiconduttori diversi, di spessore minimo fino a 1000 Å (=0,1 µm).

Le attrezzature per la crescita e la caratterizzazione dei materiali, salvo alcune eccezioni, sono state sviluppate e costruite appositamente in laboratorio, e la loro stessa realizzazione ha permesso l'acquisizione di un patrimonio tec-

nologico indispensabile per ogni ulteriore sviluppo dell'attività in questo campo.

Esse consistono, per quanto riguarda la crescita dei monocristalli, in reattori chimici ad alta temperatura (fino a 1500 °C), eventualmente ad alta pressione (fino a 200 kg/cm<sup>2</sup>) (v. figg. 85 e 86), e sempre con atmosfera controllata. Esistono inoltre forni, pure in atmosfera controllata, per la diffusione nei semiconduttori degli opportuni droganti.

Per quanto riguarda la valutazione delle caratteristiche dei materiali, sono disponibili linee di strumenti adatte per la caratterizzazione elettrica ed ottica in un intervallo di temperatura che va da 4 K a qualche centinaio di gradi. Gli strumenti di tipo tradizionale sono stati acquistati, mentre alcuni di tipo più specifico sono stati realizzati ad hoc.

Le principali applicazioni dei materiali citati si trovano nei dispositivi elettronici speciali che vengono sviluppati al CISE. Va anche sottolineato che si tratta di materiali non reperibili sul mercato internazionale o non reperibili con le caratteristiche richieste di purezza e perfezione cristallina. Le competenze acquisite sui materiali, pur essendo state originate da una precisa finalizzazione, hanno tuttavia suscitato anche di per sé stesse l'interesse di alcune industrie, ed in qualche caso questo interesse si è concretato in contratti di ricerca, con lo scopo di mettere a punto le tecniche di preparazione di alcuni dei materiali menzionati, per la loro commercializzazione.

Sul piano più generale, i possibili interessi industriali sono indirizzati in genere verso i dispositivi elettronici per sviluppare i quali è necessario disporre degli opportuni materiali semiconduttori. È pertanto difficile scindere i

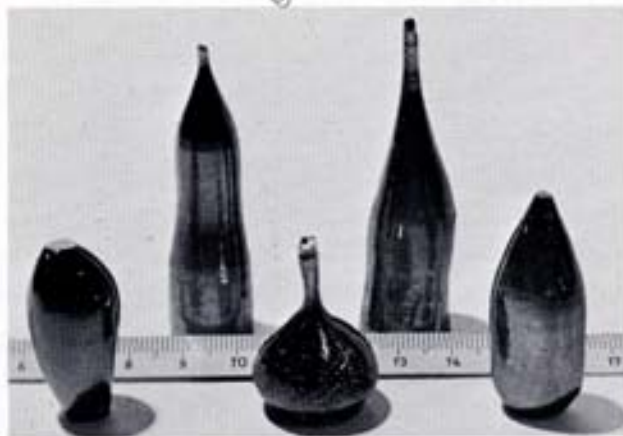


Fig. 80 - Monocristalli di fosforo di gallio (GaP), cresciuti con il metodo Chzocralski mediante l'apparecchiatura di fig. 85. Detto metodo consiste nell'immergere un seme di monocristallo (visibile in parte nella foto in corrispondenza del «collo» dei monocristalli) in un crogiolo contenente del GaP fuso e nel favorire una cristallizzazione direzionale estraendo il seme a velocità controllata.

due aspetti, in quanto i materiali in questione devono possedere di volta in volta requisiti molto specifici, che possono essere soddisfatti solo se si dispone di impianti e competenze già sviluppati a questi fini. Comunque il CISE ha ormai la possibilità di preparare una larga gamma di materiali semiconduttori composti, oltre a quelli citati.



Fig. 81 - Monocristalli di tellurio di cadmio e mercurio ((HgCd)Te), cresciuti con il metodo a zona fusa mediante una delle apparecchiature mostrate in fig. 86. La forma esterna dei lingotti mostrati nella figura corrisponde a quella della provetta di quarzo in cui il materiale di partenza è stato posto. Questi monocristalli sono stati utilizzati per la preparazione di rivelatori per l'infrarosso (v. fig. 88).

## 11.2. Genesi dell'attività sui dispositivi a semiconduttore al CISE

In Italia esisteva – ed esiste tuttora – la casa madre di un'impresa multinazionale che, nel campo dei dispositivi elettronici al silicio, ha raggiunto un livello tecnico bene allineato con lo standard mondiale. Non esisteva, però, salvo qualche sporadico esempio, alcuna competenza nel campo dei dispositivi speciali che non utilizzano, quale materiale semiconduttore, il silicio.

Verso la metà degli anni sessanta, fu decisa un'iniziativa congiunta CISE-CNR (Consiglio Nazionale delle Ricerche) – con il parziale supporto finanziario di quest'ultimo – tendente a sviluppare anche nel nostro Paese qualche esempio di dispositivi speciali per i quali non si può utilizzare il silicio e si deve fare ricorso a semiconduttori composti.

Dopo un'indagine su scala nazionale nell'ambiente industriale interessato, furono scelti come temi di studio i dispositivi per microonde, i laser a semiconduttore ed i rivelatori per il medio e lontano infrarosso.

Per poter studiare con cognizione di causa questi dispositivi, si dovette anche sviluppare una

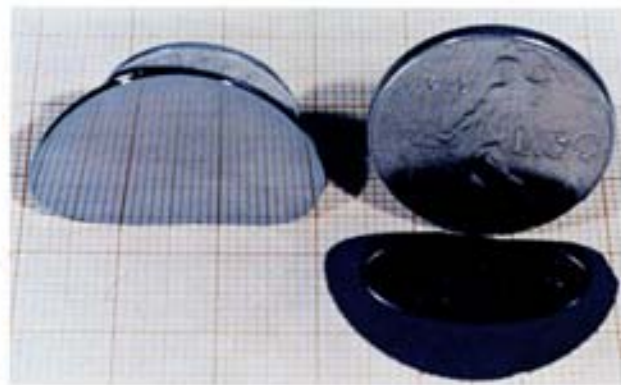
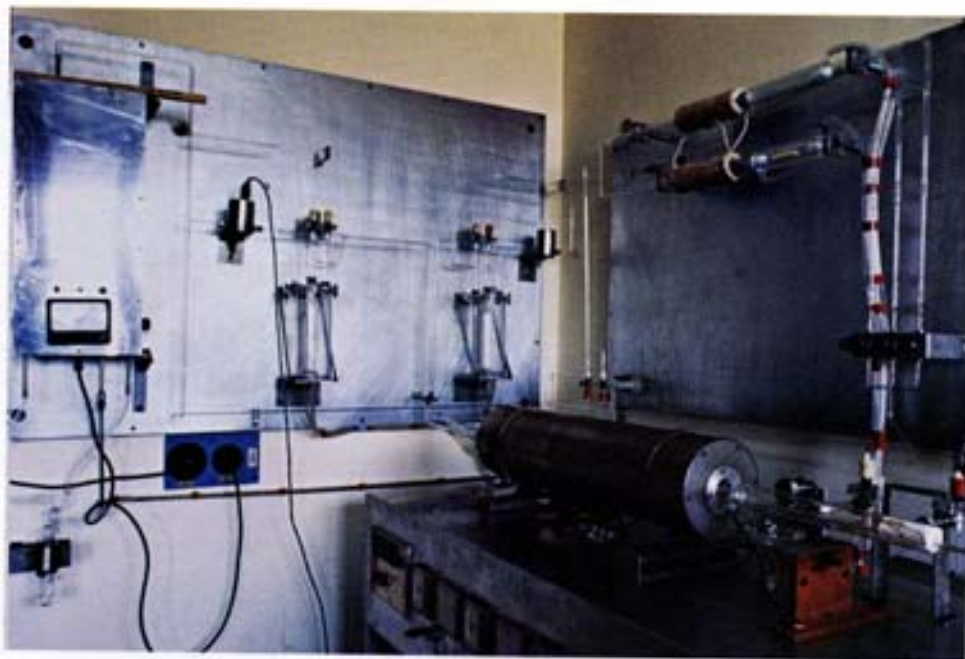


Fig. 82 - Fette di arseniuro di gallio (GaAs) monocristallino, utilizzate come substrati per la fabbricazione di dispositivi realizzati al CISE, quali i diodi Gunn, i transistori ad effetto di campo (FET), le celle solari, etc. La specularità delle superfici è ottenuta per politura chimico-meccanica. Le dimensioni sono intuibili dal confronto con la moneta.

Fig. 83 - Apparecchiatura per la crescita epitattica da fase vapore dell'arseniuro di gallio (GaAs) su substrati del tipo di quelli rappresentati nella fig. precedente. È visibile in primo piano il forno a tre stadi regolati indipendentemente allo scopo di ottenere condizioni termiche ottimali per il processo. Con tale apparecchiatura vengono realizzati strati dello spessore da qualche frazione di  $\mu\text{m}$  a qualche  $\mu\text{m}$  e di caratteristiche fisiche rigorosamente controllate.



attività rivolta alla preparazione dei materiali semiconduttori di partenza, come descritto nel paragrafo precedente.

### 11.3. Dispositivi per microonde

Nella classe dei dispositivi per microonde venne ritenuto prioritario lo studio di un dispo-

sitivo nato agli inizi degli anni sessanta, e cioè il diodo ad effetto Gunn, che adopera come materiale attivo l'arseniuro di gallio. Si tratta di un componente allo stato solido che consente di generare o amplificare segnali a frequenze comprese tra qualche GHz ed un centinaio di GHz. Esso trova applicazioni nei sistemi di telecomunicazioni, nei radar portatili,

Fig. 84 - Apparecchiatura per la crescita epitattica da fase liquida dell'arseniuro di gallio (GaAs) e dell'arseniuro di gallio ed alluminio ((GaAl) As) su substrati orientati di GaAs (v. fig. 82). Le manipolazioni del materiale vengono eseguite in una scatola a guanti in atmosfera controllata, per ridurre al massimo le contaminazioni.





Fig. 85 - Apparecchiatura per la crescita di monocristalli con metodo Chzocralski (v. anche fig. 80). Il crogiuolo è contenuto in una camera per alta pressione (fino a 200 kg/cm<sup>2</sup>). Il controllo delle diverse fasi di crescita dei monocristalli viene perciò effettuato a distanza, mediante la telecamera visibile in figura. A destra sono visibili gli altri sistemi di controllo del processo.



Fig. 86 - Apparecchiature per la crescita di monocristalli di tellururo di cadmio e mercurio ((HgCd)Te). Sono visibili i due forni a tre stadi regolati indipendentemente, così da permettere un predeterminato profilo di temperatura (in particolare, i profili tipici dei sistemi a zona fusa ed a Bridgman, cioè a fusione totale).

nei sistemi antifurto, etc.. I vantaggi rispetto alle soluzioni più tradizionali risiedono nell'estrema compattezza del dispositivo, nel modesto consumo di energia e nell'elevata affidabilità. Una limitazione di questi dispositivi risiede nella loro modesta potenza.

Numerosi anni di attività in questo settore hanno permesso al CISE di acquisire tutte le conoscenze tecnologiche per costruire ed utilizzare i diodi in questione. Attualmente i prototipi di diodi Gunn costruiti al CISE (v. fig. 87) sono di caratteristiche confrontabili rispetto a quelli descritti in letteratura ed in qualche caso forniti dal mercato internazionale.

Accanto all'attività sui diodi Gunn è stata effettuata un'analisi dettagliata e sistematica, anche con l'ausilio di modelli matematici, delle cavità oscillanti per microonde che impiegano i diodi stessi. Questo studio ha consentito di ottimizzare la struttura di un oscillatore a cavità.

L'attività sui diodi Gunn ha costituito il germe delle attuali competenze generali del CISE nella tecnologia dei dispositivi a semiconduttore. Per esempio vengono studiati transistori ad effetto di campo a GaAs (MESFET - Metal Semiconductor Field Effect Transistor), che si ritiene diverranno i dispositivi di maggior interesse per l'amplificazione di segnali alle frequenze di microonde e dovranno sostituire i ben più complicati tubi ad onda progressiva (TWT - Travelling Wave Tube).

I componenti a stato solido per microonde (tra cui i citati diodi Gunn ed i transistori ad effetto di campo) dovrebbero consentire la produzione di ricevitori a microonde con caratteristiche professionali, ma con costi tipici dell'elettronica di largo consumo.

L'industria nazionale delle telecomunicazioni ha manifestato molto interesse a che in Italia vengano coltivate attività in questo campo, in vista di un prossimo sviluppo su scala industriale della produzione dei dispositivi per microonde.



Fig. 87 - Diodi Gunn utilizzati come generatori di microonde e parti dei loro contenitori (basette e cappucci). All'interno di alcune basette sono già montati i diodi stessi. Questi ultimi hanno dimensioni di qualche decimo di mm. Le dimensioni dei contenitori si rilevano dal confronto col fiammifero.

#### 11.4. Laser a semiconduttore

Un particolare tipo di laser è rappresentato dal laser a giunzione tra semiconduttori. Le tecnologie di costruzione di questo laser sono quelle tipiche dei dispositivi a semiconduttori composti ed è per questa ragione che tale argomento viene qui trattato, anziché nel capitolo specificatamente dedicato ai laser (v. cap. 12). Il laser a semiconduttore ha di per sé caratteristiche estremamente diverse rispetto a tutte le altre classi di laser (a ioni, a stato solido, etc.): più in particolare, il fascio di radiazione emessa da un laser di quel tipo ha una divergenza del fascio molto maggiore ed una purezza spettrale molto inferiore; per contro, esso ha dimen-

sioni fisiche tipiche di un componente a semiconduttore (poche centinaia di  $\mu\text{m}$  di lato) ed un estremamente limitato consumo di energia. Queste caratteristiche rendono il laser a semiconduttore il componente ideale per costituire la sorgente di radiazione per i sistemi di telecomunicazioni in fibra ottica e per altre molteplici applicazioni.

Con le competenze acquisite nell'ambito della preparazione dell'arseniuro di gallio e dell'arseniuro di gallio e alluminio, sono stati sviluppati al CISE vari tipi di laser a semiconduttore, sia ad omogiunzione, sia ad eterogiunzione, che emettono radiazione nel vicino infrarosso. Mentre fino a pochi anni fa una limitazione fondamentale dei laser di questo tipo era l'impossibilità di mantenerli in funzionamento continuo (non impulsivo), a meno di sottoporli a temperature criogeniche, più recentemente si è riusciti ad ottenerne il funzionamento continuo a temperatura ambiente. Il CISE ha sviluppato la tecnologia dei dispositivi in continua almeno a livelli di fattibilità.

Ovviamente si è acquisita anche, come conseguenza di ciò, la capacità di progettare e realizzare dispositivi emettitori di radiazione incoerente (LED), per applicazioni anche simili a quelle dei laser, ma con proprietà più modeste.

#### 11.5. Rivelatori per il medio e lontano infrarosso

Com'è noto, l'occhio umano è sensibile solo ad un ristrettissimo intervallo di lunghezze d'onda delle radiazioni emesse dagli oggetti che ci circondano. La lunghezza d'onda corrispondente al massimo di emissione dei corpi per temperature prossime a quella ambiente (circa 300 K) è intorno ai 10  $\mu\text{m}$ . Un rivelatore sensibile a lunghezze d'onda di tale valore consente pertanto di vedere, attraverso un'apposita strumentazione, una scena estremamente luminosa per luce propria. Se la scena è illu-



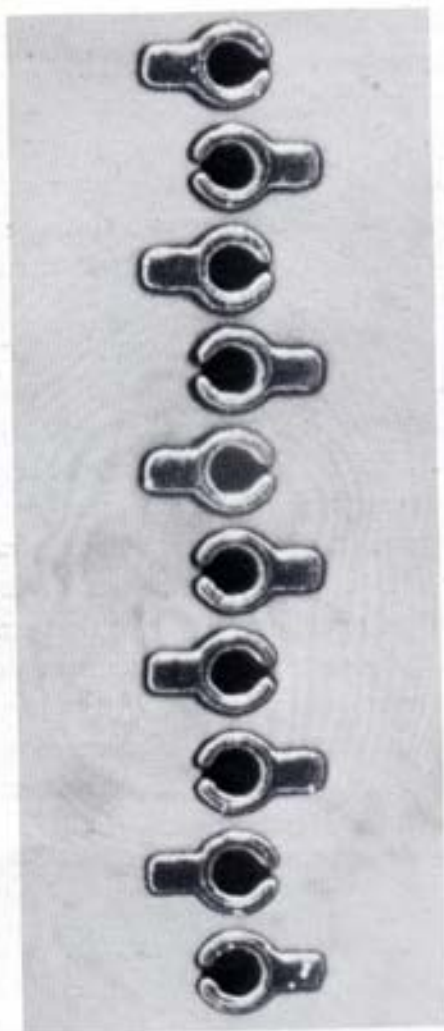


Fig. 88 - Insieme lineare di rivelatori fotovoltaici per l'infrarosso, ottenuti mediante impiantazione di ioni in un substrato di tellururo di cadmio e mercurio ((HgCd)Te). Le aree circolari scure visibili all'interno dei contatti elettrici corrispondono alle zone sensibili (cioè a quelle impiantate).

minata da luce solare, è possibile utilizzare per la visione larghi spettri di lunghezze d'onda cui l'occhio umano non è sensibile.

La rivelazione dell'infrarosso ha un larghissimo campo di applicazioni sia civili che militari: tra le prime citiamo la sorveglianza ecologica (scarichi termici), l'analisi a distanza delle risorse naturali, la fitopatologia, la meteorologia, le telecomunicazioni ottiche a propagazione libera.

I rivelatori a semiconduttore costituiscono la classe più usata di rivelatori per l'infrarosso, specialmente qualora sia necessario disporre di elevate velocità di risposta. È però necessario disporre di semiconduttori che abbiano un intervallo di energie proibite abbastanza ristretto da rendere possibile l'interazione con la radiazione da rivelare.

Il CISE ha per questo sviluppato sia le tecniche di preparazione dei semiconduttori a piccolo intervallo di energie proibite, come il già citato (HgCd)Te, sia la tecnologia di costruzione dei dispositivi che impiegano questo materiale (v. figg. 88 e 89). Su questo argomento sono state messe a punto tecniche originali, quale, ad esempio, l'inserimento nella superficie del materiale, mediante una macchina acceleratrice (v. fig. 90), degli atomi di impurezze sotto forma di ioni per creare giunzioni n-p

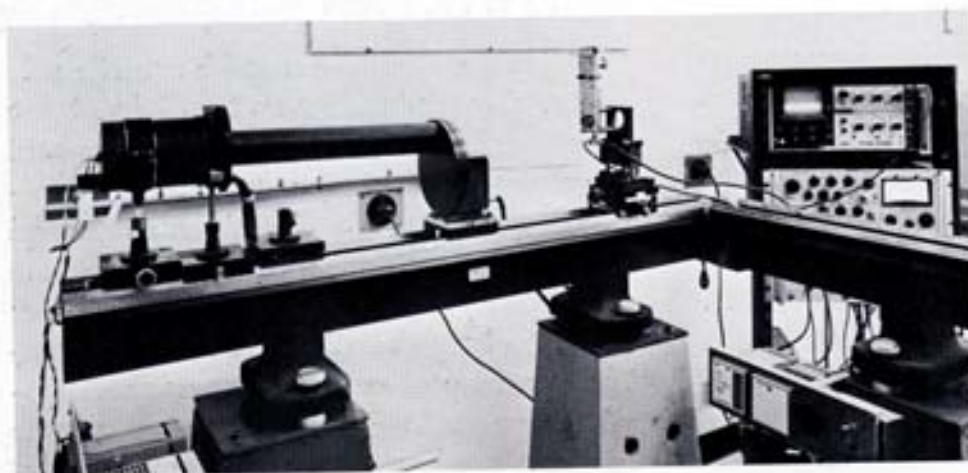


Fig. 89 - Una delle catene di misura e collaudo dei rivelatori per l'infrarosso costruiti al CISE. La radiazione emessa dal corpo nero (a sinistra) serve per la valutazione della sensibilità del rivelatore in prova, contenuto nel criostato visibile a destra sul banco ottico.

Fig. 90 - Apparecchiatura per l'impiantazione di ioni, realizzata al CISE quando ancora non erano reperibili sul mercato apparecchiature similari. Essa è essenzialmente costituita da un dispositivo per la produzione di ioni, da un selettore magnetico e da un acceleratore elettrostatico. È stata utilizzata per la realizzazione di rivelatori per l'infrarosso.



superficiali. La sensibilità di questi rivelatori, nell'intervallo di lunghezze d'onda da 8 a 12  $\mu\text{m}$ , è prossima al limite teorico, e la loro frequenza di risposta è dell'ordine di 1 GHz. Recentemente il CISE ha sviluppato un « telescopio » di rivelatori, cioè un insieme di tre

rivelatori sullo stesso asse, sensibili a diverse lunghezze d'onda (rispettivamente 1  $\mu\text{m}$ , 3-5  $\mu\text{m}$ , 8-12  $\mu\text{m}$ ).

Questo tipo di attività ha suscitato interesse presso l'industria, sia nazionale che internazionale, ed ha dato luogo a commesse di ricerca.



Fig. 91 - Catena di misura impiegata per valutare la sensibilità a diverse lunghezze d'onda (della luce incidente) delle celle solari ad arseniuro di gallio (GaAs) ed arseniuro di gallio e alluminio ((GaAl)As).

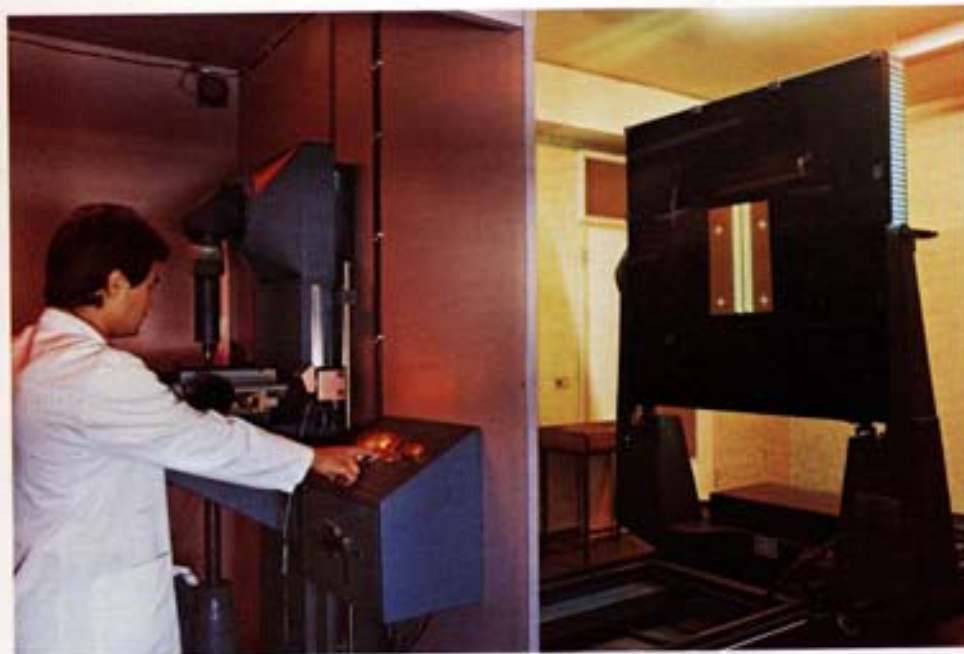


Fig. 92 - Attrezzatura per la fabbricazione di maschere impiegate nei processi fotolitografici necessari per la costruzione dei dispositivi a semiconduttore. Vengono realizzate figure miniaturizzate di dimensioni fino ad 1  $\mu$ m. Si notano: a destra, il telaio luminoso mobile portante il disegno da fotoridurre; a sinistra, la macchina per fotoriduzione.

### 11.6. Celle solari

Per la trasformazione diretta di energia solare in energia elettrica si usano, per applicazioni speciali, celle a semiconduttore. Attualmente, nella ricerca di fonti energetiche alternative, si tende a sviluppare celle solari per applicazione su larga scala, che presentino caratteristiche di economicità paragonabili con quelle di altri

sistemi di produzione di energia elettrica. Le possibilità sono due: la prima è quella di sviluppare metodi di produzione di celle in grande serie e di bassissimo costo, la seconda di mettere a punto celle di elevate caratteristiche, da accoppiare ad economici sistemi di concentrazione della luce solare, il che consentirebbe di ridurre sostanzialmente il numero di celle necessarie a parità di potenza prodotta.



Fig. 93 - L'intero processo fotolitografico con cui vengono realizzati i dispositivi a semiconduttore, partendo dalle maschere ottenute con l'attrezzatura visibile nella fig. precedente, viene svolto nelle cappe mostrate in questa figura, situate entro una camera gialla depolverizzata. La luce gialla è richiesta per non impressionare le sostanze fotosensibili.

Su questa seconda possibilità si è indirizzato recentemente il CISE, studiando le proprietà delle celle ad eterogiunzioni GaAs-(GaAl)As (v. fig. 91), che dovrebbero consentire fattori di concentrazione dell'ordine di qualche migliaio, mentre con le più classiche celle al silicio si raggiungono attualmente fattori di concentrazione dell'ordine del centinaio. Questo lavoro si innesta sulle competenze sulle eterogiunzioni del tipo più sopra citato, acquisite negli ultimi anni nello sviluppo del laser a semiconduttore.

### **11.7. Attrezzature per la costruzione di dispositivi**

Il CISE dispone delle attrezzature tipiche necessarie per la costruzione di dispositivi elet-

tronici a semiconduttore. In particolare esistono: una linea completa di microfotolitografia per la preparazione delle maschere (v. fig. 92); un sistema di allineamento delle maschere (v. fig. 93); gli apparecchi di deposizione delle emulsioni fotosensibili; gli impianti di deposizione dei metalli e leghe; gli apparecchi di montaggio e saldatura, sia per termocompressione che ad ultrasuoni. Tali strumenti sono installati in camere depolverizzate a flusso laminare.

Esistono inoltre le attrezzature elettroniche per la valutazione delle caratteristiche dei vari dispositivi prodotti, quali numerosi banchi a microonde, spettrofotometri, criostati, rivelatori di rumore elettronico, simulatori di radiazione solare, etc..

## 12. SVILUPPO DI STRUMENTAZIONE ELETTRONICA ED ELETTROTTICA

### 12.1. Strumentazione elettronica

Il CISE ha una lunga tradizione nel campo della strumentazione elettronica avanzata. La attività ebbe inizio con le applicazioni di tecniche elettroniche, sia analogiche che numeriche, al campo nucleare; essa si è poi andata via via sviluppando, mediante l'applicazione di tecniche elettroniche peculiari, anche in altri settori, quali quelli della strumentazione biomedica e della strumentazione per l'acquisizione dei dati in connessione con diverse misure di tipo industriale.

Una caratteristica comune, che mette in evidenza le competenze sviluppate, è quella dell'uso di metodi di misura e di circuiti elettronici utilizzando i più moderni componenti, che a volte hanno comportato una notevole originalità di ideazione e di realizzazione.

Le realizzazioni più salienti nel campo della strumentazione nucleare riguardano strumenti per l'analisi di forme d'onda impulsive. La misura e classificazione di ampiezze di impulsi con elevata precisione, da un lato, e la misura di brevi intervalli di tempo, sempre delimitati da brevi impulsi elettrici, d'altro lato, furono gli argomenti considerati in diverse realizzazioni circuitali, che originarono anche alcuni brevetti ed utilizzazioni industriali.

Strumenti particolarmente interessanti sviluppati in questo campo sono: amplificatori per la misura di piccolissime cariche elettriche; classificatori di ampiezze di impulsi elettrici - che permettono la determinazione di funzioni di distribuzione delle ampiezze degli impulsi stessi -; misuratori e classificatori di brevi intervalli di tempo dell'ordine dei nanosecondi.



Fig. 94 - Apparecchiatura per la rilevazione del potenziale cardiaco. Il potenziale viene misurato in 240 punti del torace, alla velocità di 120 000 dati al secondo. Tali dati, elaborati mediante calcolatore, forniscono informazioni sull'evoluzione spazio-temporale dell'attività elettrica del cuore, che consentono la diagnosi di cardiopatie non rivelabili con i comuni elettrocardiografi.

**Fig. 95 -** Apparecchiatura ad ultrasuoni per la rivelazione con metodo non intrusivo di profili di velocità del sangue in grossi vasi nell'uomo, sia in modo pulsato che continuo (quindi sia in arterie che in vene). Esso consente di rivelare anomalie funzionali nella circolazione sanguigna.



**Fig. 96 -** Prototipo di un'attrezzatura per la determinazione mediante microonde dell'umidità di terre e sabbie. Essa sfrutta il diverso comportamento di questi materiali, a seconda del loro grado di umidità, quando sono inseriti in una cavità per microonde. Queste misure sono di grande utilità per il controllo dei materiali da costruzione e dell'umidità dei terreni nelle dighe.



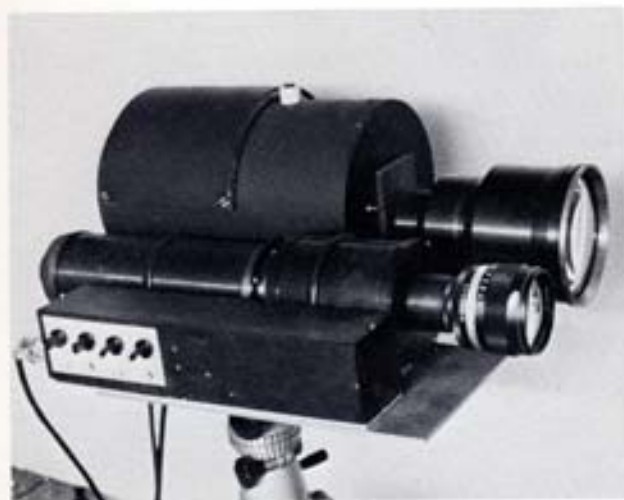


Fig. 97 - Apparecchiatura prototipo per il miglioramento della visibilità nella nebbia con tecniche di selezione temporale. È costituita da una sorgente laser a semiconduttore ad impulsi, che illumina la scena, e da un sistema di osservazione, che comprende un otturatore elettroottico rapido sincronizzato con la sorgente e un intensificatore di immagine. Con tale sistema è possibile aumentare di circa un fattore 3 la visibilità.

Nel quadro della collaborazione tra il CISE ed il CNR, concretatasi come già detto a proposito dei dispositivi elettronici, e che aveva anche come scopo lo sviluppo di strumentazione avanzata di laboratorio, i campi di indagine si estesero al di fuori di quello nucleare. Negli ultimi anni sono stati affrontati problemi di misure di interesse biomedico, da un lato, e di elaborazione elettronica dei dati, dall'altro. Due realizzazioni in particolare caratterizzano il primo tipo di attività. La prima riguarda un elettrocardiografo sperimentale (v. fig. 94) capace di utilizzare l'informazione proveniente da 240 sonde poste sul torace del paziente; l'acquisizione e l'elaborazione dell'informazione proveniente da tutte queste sonde permette di ottenere la distribuzione del potenziale sul torace e la sua evoluzione nel tempo con risoluzione del ms. Lo strumento, di cui si continua l'evoluzione, viene usato da una équipe di cardiologi ed ha già fornito utili informazioni nella diagnostica dell'infarto miocardico.

La seconda realizzazione concerne uno strumento che misura la velocità del sangue nell'uomo con metodi non intrusivi (v. fig. 95); si utilizzano infatti tecniche ad ultrasuoni dall'esterno per poter ottenere il profilo della velocità del sangue in vasi non di piccolo diametro. Si prevedono importanti utilizzazioni in medicina di questo strumento.

Questa strumentazione è caratterizzata nel suo insieme da tecniche elettroniche di acquisizione dei dati spinte al limite della loro precisione, per poter estrarre la maggior parte dell'informazione. In altri termini, la misura di particolari grandezze fisiche viene effettuata tenendo presenti le diverse cause di disturbo, in modo da massimizzare il rapporto segnale/disturbo. È opportuno sottolineare particolarmente che le competenze acquisite nello sviluppo degli strumenti menzionati, i quali hanno ovviamente un interesse ed una validità settoriali, sono utilizzabili in modo molto più generale; infatti qualunque problema di misura, quando lo si voglia spingere al limite delle possibilità, in modo da conseguire la massima precisione possibile, comporta problematiche elettroniche sostanzialmente identiche, indipendentemente o quasi dal particolare settore applicativo.

Un altro settore d'interesse è stato, come già detto, quello dell'elaborazione dei dati acquisiti già in forma elettrica. Abbiamo già menzionato gli analizzatori di ampiezza di impulsi; di tipo analogo possono essere considerati uno strumento per la misura di funzioni di auto- e cross-correlazione di eventi casuali, così come uno strumento incorporante un piccolo calcolatore elettronico digitale, che realizza, mediante l'algoritmo della trasformata rapida di Fourier, la misura di spettri di potenza di fenomeni casuali.

Questi sistemi trovano numerose applicazioni anche nella tecnica industriale; ad esempio, si può ricordare quella connessa con l'analisi delle vibrazioni di strutture ed organi meccanici.

Si è messa particolarmente in evidenza la competenza esistente nella acquisizione ed elaborazione di fenomeni elettrici di tipo casuale, proprio perché questi fenomeni si presentano in diversi settori della tecnica e particolari metodologie sono richieste per la loro analisi.

Un'altra competenza più recentemente acquisita riguarda le tecniche di microonde. Già per la prova e la verifica circuitale di componenti a semiconduttore per microonde, quali i diodi Gunn all'arseniuro di gallio, di cui si è già parlato, era risultato essenziale acquisire le attrezzature e le competenze in questo campo di frequenze; sono stati infatti realizzati, con un significato che va al di là della semplice prova del componente, oscillatori per microonde con caratteristiche particolarmente originali. Le tecniche di microonde sono state alla base dello sviluppo di strumenti per effettuare particolari misure; l'applicazione più saliente è quella riguardante uno strumento per la determinazione dell'umidità di terre e di calcestruzzi (v. fig. 96).

## 12.2. Strumentazione elettroottica

Sempre con il supporto del CNR, si sono da anni sviluppate varie attività e si sono acquisite competenze nella realizzazione di prototipi di particolari strumenti che utilizzano, oltre ai classici componenti elettronici - quali attualmente possono essere considerati i transistori ed i circuiti integrati al silicio - altri tipi di componenti, in particolare i laser, e le associate tecniche elettroottiche. Tra gli strumenti sviluppati di questo tipo si annoverano telemetri ad alta precisione - quale non ottenibile con quelli in commercio - di cui uno con laser a semiconduttore, per la misura di distanze terrestri di interesse topografico, ed un

secondo con laser a stato solido a due lunghezze d'onda, di interesse geodetico, come pure uno strumento, realizzato a livello di indagine di fattibilità (v. fig. 97), che permette un miglioramento della visibilità attraverso la nebbia, e la cui applicazione pratica sarebbe di evidente utilità. Per qualche dettaglio su queste realizzazioni si rinvia ai parr. 14.4 e 14.5.

Particolare interesse per la loro novità e per le notevoli potenzialità future presentano i sistemi di comunicazione dell'informazione con segnali ottici. È stato studiato, anche per poter sperimentalmente valutare la potenzialità della trasmissione dei segnali su fibra ottica, un sistema per la trasmissione dei dati, utilizzabile per distanze delle centinaia di metri, fondato su diodi emettitori di luce come sorgente del segnale, fibre ottiche come mezzo trasmissivo, e rivelatori a semiconduttore per la ricezione. Si ritiene che, proprio nel campo della trasmissione a breve distanza dell'informazione, questo tipo di tecnica potrà avere interessanti sviluppi per i suoi numerosi vantaggi rispetto a sistemi più convenzionali, quali, ad esempio, l'assenza di disturbi elettromagnetici e la possibilità di isolamento elettrico tra i diversi punti del sistema di comunicazione. Attualmente si prevedono numerose applicazioni di questa tecnica, quali ad esempio la comunicazione di segnali e di dati all'interno di una centrale elettrica, di una nave, di un aereo, etc.

L'impiego probabilmente più importante e più peculiare nel mettere a frutto le possibilità della luce laser in elettroottica si è verificato nel campo dell'analisi di vibrazioni in strutture di grandi dimensioni, impiegando tecniche diverse, come la velocimetria Doppler (v. par. 14.2) e l'olografia e l'interferometria elettronica a luce diffusa con metodi di « speckle pattern » (v. par. 14.3).



## 13. L'ELETTRONICA QUANTISTICA E LO SVILUPPO DI SORGENTI LASER

### 13.1. Cenni sull'elettronica quantistica

Nel 1962 ebbe inizio presso il CISE una nuova attività di ricerca in un settore, l'elettronica quantistica, in cui nell'anno precedente erano stati ottenuti in alcuni laboratori esteri risultati di particolare importanza. Si trattava della scoperta del laser, messo in funzione per la prima volta da Maiman e Townes nel 1960 con materiale a stato solido (rubino) e successivamente da Javan nel 1961 con materiale gassoso (He-Ne). Da allora le sorgenti laser si sono moltiplicate via via che nuovi materiali e nuovi metodi di controllo venivano messi a punto, consentendo un ampio spettro di applicazioni. Il settore dell'elettronica quantistica riguarda in generale i processi di interazione del campo elettromagnetico con gli elettroni legati in sistemi atomici, a differenza di quanto accade nell'elettronica classica, che impiega dispositivi nei quali gli elettroni od i portatori di cariche sono liberi di muoversi nel materiale impiegato.

L'origine del termine « elettronica quantistica » è legato al fatto che nei processi di interazione con gli elettroni legati in particolari orbite atomiche lo scambio di energia con il campo e.m. avviene per quantità discrete associate alle transizioni fra i vari livelli.

Un ulteriore aspetto caratterizzante questo settore, che diversamente non avrebbe avuto particolare rilievo rispetto agli analoghi e ben noti campi della spettroscopia atomica e molecolare e della fisica atomica in genere, è dato dall'impiego, nelle sorgenti laser, del processo di emissione stimolata, che consente un trasferimento di energia fra atomi e campo e.m. particolar-

mente efficace e controllabile. Si tratta di un processo nel quale il campo e.m. incidente provoca la diseccitazione di un atomo con la generazione di un fotone coerente con il campo eccitante, avente cioè la stessa direzione di propagazione, la stessa frequenza e fase. Questo processo, che su un sistema di atomi eccitati può essere ripetuto, dà luogo ad una moltiplicazione a catena dei fotoni, e cioè ad una amplificazione del campo incidente. È possibile quindi in pratica far passare un fascio di luce in un materiale, ottenendo all'uscita un fascio di luce più intenso.

Questo processo di amplificazione è stato utilizzato con opportuni sistemi di reazione per ottenere un oscillatore a frequenze ottiche, il laser, con proprietà di coerenza, direzionalità e brillantezza particolari rispetto a quelle delle sorgenti ottiche tradizionali.

In sintesi esse consistono in:

#### *Proprietà di coerenza spaziale (e direzionalità)*

Il fascio di luce emesso è caratterizzato da un campo e.m. che vibra con la stessa fase su tutti i punti delle superfici d'onda perpendicolari alla direzione di propagazione del fascio. Questo ne consente sia la propagazione a lunga distanza come fascio collimato, sia la focalizzazione con opportune ottiche in aree molto piccole (con dimensioni dell'ordine della lunghezza d'onda).

#### *Proprietà di coerenza temporale (e monocromaticità)*

Il fascio di luce emesso è caratterizzato da un campo e.m. che vibra in uno stesso punto con legge sinusoidale, conservando la stessa fre-

quenza nel tempo. Questo consente il confronto di fase con tecniche interferometriche fra il campo che è presente in un punto ad un certo istante e quello che vi era in precedenza e che può essere fatto ritornare nel punto stesso dopo aver attraversato un percorso ottico in andata e ritorno.

La massima differenza di percorso ottico che consentiva l'osservazione di frange di interferenza con le sorgenti convenzionali era inferiore ad un metro. Con i laser si sono ottenuti effetti di interferenza fino a distanze di oltre un km, il limite essendo posto non più dalle caratteristiche della sorgente, ma da quelle del percorso ottico.

#### *Elevata intensità (e brillantezza)*

La possibilità di trasferire in tempi brevi (dell'ordine dei nanosecondi o anche dei picosecondi) l'energia accumulata in un sistema di atomi eccitati nel fascio laser permette di ottenere per tali tempi potenze di picco particolarmente elevate (fino a valori dell'ordine dei GW o dei TW). Questa proprietà, unita a quella di direzionalità già citata, ha come conseguenza una brillantezza particolarmente elevata rispetto alle sorgenti convenzionali: è possibile ottenere cioè elevati valori di potenza emessa per unità di superficie e di angolo solido.

In sintesi, le sorgenti laser consentono di concentrare l'energia e.m. nello spazio, nel tempo e nel dominio delle frequenze. Questi aspetti sono singolarmente o simultaneamente all'origine di tutta la vasta serie di applicazioni finora studiate.

### **13.2. Proprietà statistiche del campo e.m. emesso da un laser**

Un'attività di ricerca di base, svolta sempre con il supporto del CNR, ha riguardato la caratterizzazione delle proprietà del campo e.m. emesso da un laser. I motivi per questo tipo di

ricerca non mancavano. Le proprietà del fascio di luce emessa da un laser, da un lato, erano descrivibili con metodi classici in termini di ampiezza e di fase, come nel caso delle radiofrequenze; dall'altro, i rivelatori disponibili (fototubi) erano in grado di rivelare i singoli fotoni, mettendo in evidenza la natura particellare della radiazione, come nel caso di radiazioni a frequenza più elevata (raggi X o  $\gamma$ ). Sono stati necessari alcuni anni perché questi due aspetti della radiazione, rilevabili simultaneamente solo nel campo ottico da quando erano disponibili sorgenti coerenti, trovassero un'adeguata descrizione unitaria con la teoria di Glauber degli stati  $\alpha$ , che collegava la descrizione del campo in termini particellari (numero di fotoni) con quella classica (ampiezza e fase).

In questo filone di attività svolto in vari laboratori nel mondo il CISE ha dato contributi originali, mettendo per la prima volta in evidenza sperimentalmente i vari tipi di statistiche associate alla distribuzione di fotoni in un campo e.m. coerente o incoerente, quale si presenta, ad esempio, all'uscita di un laser al di sopra o al di sotto della soglia di oscillazione. Tali contributi hanno consentito la verifica di alcune teorie sui laser, grazie alla realizzazione di strumentazione di analisi per il conteggio dei singoli fotoelettroni particolarmente sofisticata. Tale strumentazione consente, fra l'altro, la misura di basse intensità luminose, migliorando con tecniche di sottrazione del fondo il rapporto segnale-rumore.

### **13.3. Attività sulle sorgenti laser**

In parallelo all'attività applicativa descritta nel capitolo seguente, e spesso a supporto di quest'ultima, viene svolta al CISE un'ampia attività di ricerca e sviluppo sulle sorgenti laser, in genere articolata nel modo seguente: in una prima fase vengono analizzate le proprietà dei mezzi attivi per comprenderne le modalità

TABELLA 4

## LASER REALIZZATI A LIVELLO DI PROTOTIPO DI LABORATORIO

	Materiale attivo	Potenza media	Lunghezza d'onda ( $\mu\text{m}$ )	Caratteristiche di emissione	
LASER A GAS	He-Ne	5/20/50 mW	0,6328	Continua	
	He-Ne	0,2 mW	0,6328	Stabilizzato in frequenza	
	He-Ne	5 mW	0,6328	In regime di modi vincolati	
	Ar	1/5/20 W	0,5145 $\div$ 0,4880	Continua	
	He-Cd	10 mW	0,4416 $\div$ 0,3250	Continua	
	He-Sc	50 mW	0,51 $\div$ 0,53	Continua	
	He-Hg	10 mW	0,615	Continua	
	CO <sub>2</sub>	10 W	9,6 $\div$ 10,6	Continua con selezione di $\lambda$ e contenitore sigillato	
	CO <sub>2</sub>	100 W	9,6 $\div$ 10,6	Continua con selezione di $\lambda$ e flusso gassoso	
	CO <sub>2</sub>	1 kW (*)	9,6 $\div$ 10,6	Continua con flusso gassoso ed eccitazione trasversali	
			Potenza di picco e durata impulsi		
		N <sub>2</sub>	300 kW 10 ns	0,3471	Impulsato con eccitazione trasversa
		Ne	30 kW 2 ns	0,5401	Impulsato con eccitazione trasversa
		CO <sub>2</sub>	1 MW 200 ns	9,6 $\div$ 10,6	Impulsato TEA ad elica
		HF	10 kW 200 ns	2,7 $\div$ 3,0	Impulsato TEA ad elica
LASER A STATO SOLIDO	Rubino	1 MW 2 ns	0,6943	Ad impulsi (regime PTM)	
	Nd/YAG	0,5 MW 20 ns	1,060	Ad impulsi giganti (Q switching)	
LASER ACCORDABILI:					
a) A COLORANTI	Rodamina 6 G	10 kW 600 ns	0,58 $\div$ 0,62	Eccitazione con lampade flash	
	DTTC, EXA, OXA, QUINO	100 kW 30 ns	0,75 $\div$ 0,95	Eccitazione con laser a rubino	
b) OSCILLATORI PARAMETRICI	Li NbO <sub>3</sub>	50 kW 20 ns	1,5 $\div$ 4,0	Eccitazione con laser a Nd/YAG	
	Li NbO <sub>3</sub>	1 kW 300 ns	0,7 $\div$ 2,6	Eccitazione con laser a coloranti	

(\*) In corso di realizzazione con eccitazione ad « electron beam ».

di funzionamento; successivamente si procede allo sviluppo e messa a punto di prototipi di laboratorio con un certo grado di affidabilità. Sono state studiate al CISE sorgenti con materiali attivi a stato solido, liquido, gassoso (v. tab. 4) e con semiconduttori (si rinvia, per queste ultime, al par. 11.4), ma gli sforzi maggiori sono stati concentrati, soprattutto all'inizio, sulle sorgenti a gas.

Anche questa attività è stata svolta con il supporto del CNR.

### 13.4. Laser a gas

Sono state studiate, in un primo tempo, le sorgenti ad He-Ne, di cui sono stati realizzati vari prototipi di laboratorio con tecnologie atte a consentirne il funzionamento in condizioni di emissione controllata, quali l'emissione su singolo modo, la stabilizzazione in frequenza, l'emissione in regime di modi vincolati.

L'analisi si è poi estesa ai laser a ioni: sono stati studiati i laser ad argo, cripto, xeno, mettendo a punto le tecnologie relative; per l'argo in particolare sono stati costruiti prototipi di tubi a plasma in ossido di berillio, in grado di dare emissione laser continua con potenze medie di 20 W.

Sempre nel settore dei laser a ioni sono poi stati studiati i laser a He-Cd (con emissione nell'ultravioletto), a He-Se (con emissione su numerose righe nel visibile) ed a Hg-Xe (emissione nel visibile), realizzando anche in questo caso vari prototipi di laboratorio.

Nel campo dei laser molecolari sono stati studiati laser a CO<sub>2</sub> ad emissione continua nell'infrarosso (9,6-10,6  $\mu\text{m}$ ) con potenze dell'ordine dei 100 W, e sono in corso studi per la realizzazione di unità di potenza maggiore (dell'ordine di 1 kW) con eccitazione a fascio elettronico (v. fig. 98). Tale attività, che è già stata

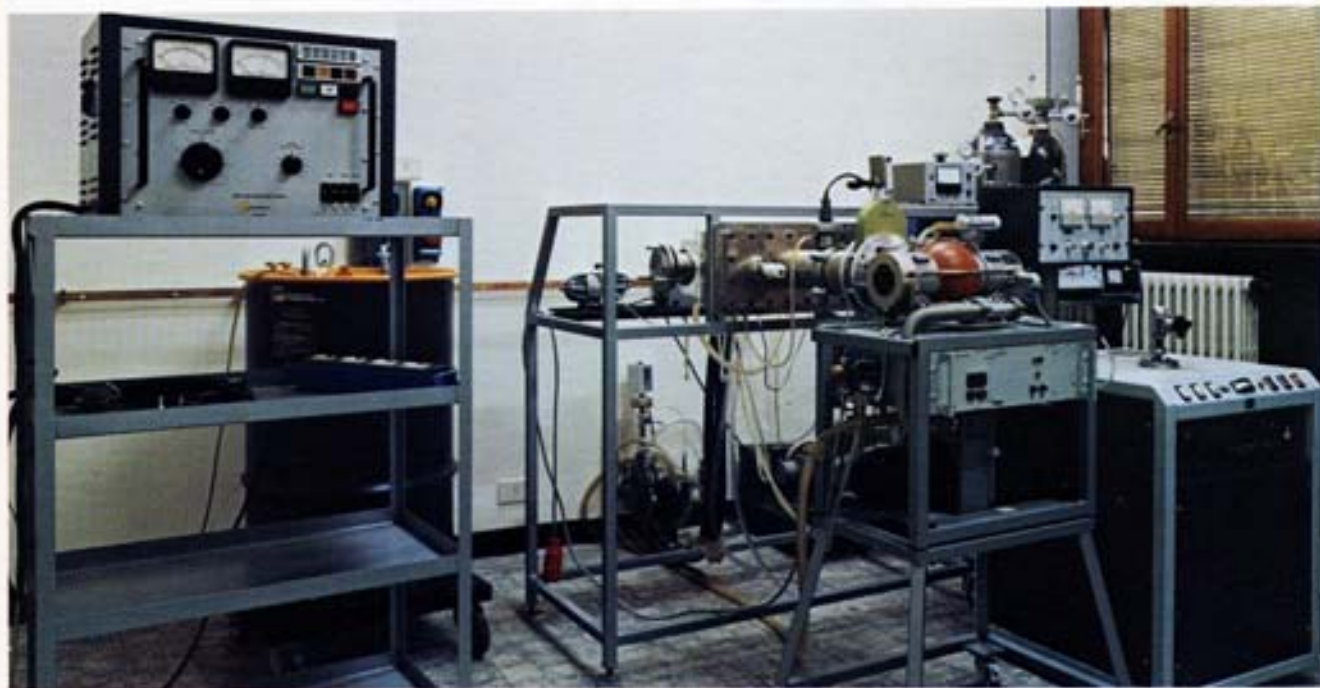


Fig. 98 - Prototipo sperimentale, in corso di sviluppo, di un laser di potenza da 1 kW ad anidride carbonica, con eccitazione per mezzo di fascio elettronico. Sorgenti di questo tipo, con potenze dell'ordine del kW, si stanno diffondendo presso l'industria meccanica estera, e recentemente anche presso quella nazionale. Esse sono impiegate per lavorazioni quali trattamenti termici, saldature, tagli, forature di parti meccaniche, e consentono una più spinta automazione dei processi di produzione nel campo della meccanica sia leggera che pesante.



Fig. 99 - Generazione di radiazione continua infrarossa coerente, accordabile nella regione 2-4  $\mu\text{m}$ , ottenuta mescolando in un cristallo di niobato di litio un fascio di laser ad argo con quello di un laser a coloranti accordabile nel visibile. La frequenza della radiazione ottenuta è la differenza tra quella dei due fasci. Questa apparecchiatura viene utilizzata per misure di spettroscopia lineare ad alta risoluzione.

ed è tuttora utilizzata da industrie italiane, ha consentito la realizzazione di sistemi laser commerciali. Uno degli esempi più significativi è l'applicazione alla microelettronica per l'incisione o « scribing » dei supporti ceramici per circuiti integrati. Su questa linea sono previsti altri contributi nel contesto di programmi di ricerca nazionali per lo studio dei laser di potenza e delle loro applicazioni alle lavorazioni meccaniche pesanti e leggere (trattamenti termici, formazioni di leghe superficiali, saldature, taglio, foratura di materiali).

Un altro settore che richiede sorgenti di questo tipo, e che verrà in parallelo potenziato sempre nel contesto di programmi nazionali, è quello delle applicazioni mediche, ed in particolare chirurgiche, dei laser.

Fra gli altri laser molecolari realizzati sono da citare quelli ad azoto, con emissione nell'ultravioletto, e quelli ad acido fluoridrico, con emissione nell'infrarosso (2,7-3,0  $\mu\text{m}$ ). Si tratta, in entrambi i casi, di sorgenti con emissione ad impulsi, realizzate per particolari esigenze sperimentali.

### 13.5. Laser a stato solido

Nel campo dei laser a stato solido sono state svolte fin dall'inizio attività per lo studio e la messa a punto di sorgenti a rubino con emissione ad impulsi di breve durata. In un primo tempo è stato studiato il regime di emissione ad « impulsi giganti », con durata intorno ai 20 ns. Successivamente, per particolari esigenze connesse con le esperienze di telemetria a due lunghezze d'onda su lunga distanza, citate nel par. 12.2, si è studiato il regime di emissione a doppia commutazione in cavità, con il quale si sono ottenuti impulsi con durata di 2 o 3 ns, di cui è stata effettuata la duplicazione in frequenza in cristalli non lineari.

Sono state anche messe a punto, ed utilizzate per lo studio di effetti non lineari, sorgenti laser a neodimio in YAG (granato di ittrio e alluminio) o in vetri, con emissione sulla scala dei tempi dell'ordine dei ns. Recentemente sono state utilizzate sorgenti di questo tipo con emissione ad impulsi sulla scala dei tempi dell'ordine dei ps, come è indicato nel paragrafo

dedicato allo studio di fattibilità di un laser a raggi X (par. 13.7), e ne sono state messe a punto le relative tecniche diagnostiche.

### 13.6. Laser accordabili in frequenza

Recentemente, a seguito del crescente interesse scientifico e delle potenziali applicazioni dei laser accordabili in frequenza, sono state avviate ricerche su questa classe di sorgenti,

con particolare riguardo a quelle con emissione nell'infrarosso.

Nella zona del visibile già da tempo sono disponibili sorgenti con emissione accordabile, che impiegano come materiale attivo una soluzione di sostanze coloranti, che viene eccitata con lampade flash o con altri laser. Le ricerche in questo settore sono già avanzate al punto da aver consentito la realizzazione di sorgenti commerciali versatili e riproducibili.

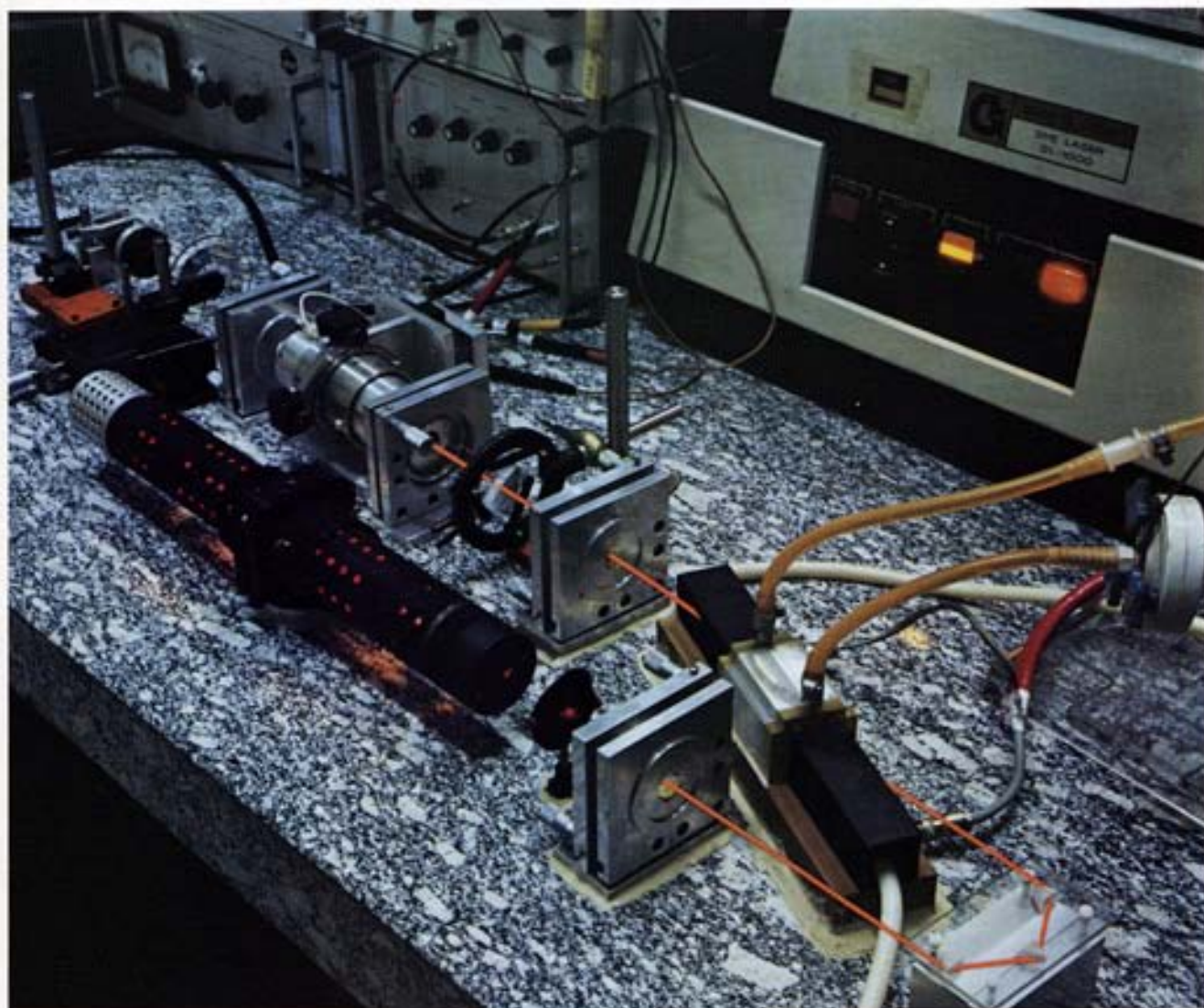


Fig. 100 - Sorgente di radiazione infrarossa ad impulsi coerente, accordabile nella regione  $0,7-3 \mu\text{m}$ , realizzata con oscillatore parametrico eccitato da un laser a coloranti accordabile nel visibile. Sorgenti di questo tipo sono di particolare interesse per il rilevamento a distanza della contaminazione atmosferica, per esperienze di fotochimica selettiva e di separazione isotopica e per misure di spettroscopia.

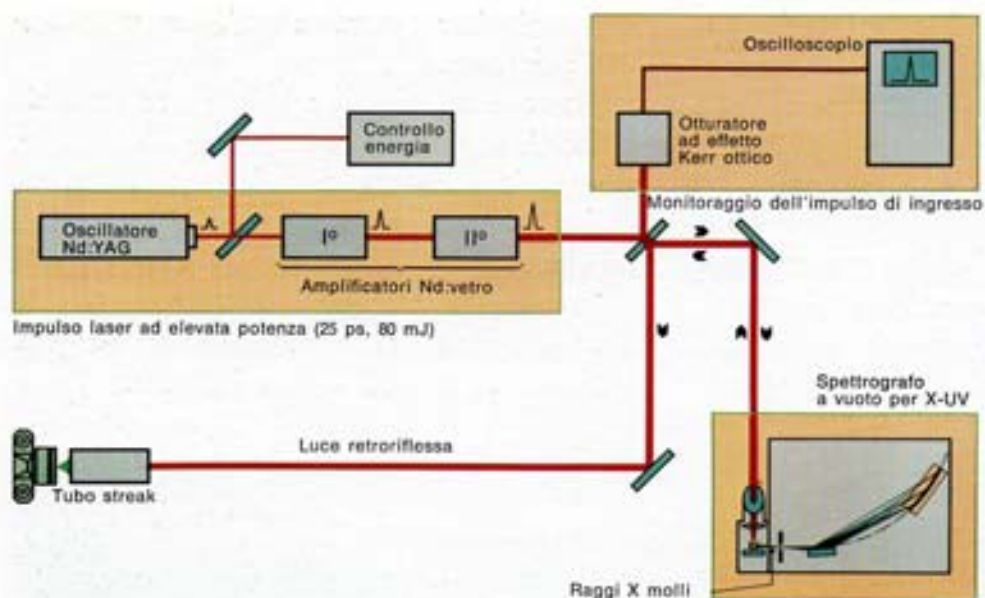


Fig. 101 - Schema dell'esperienza di riferimento prevista nell'ambito di uno studio di fattibilità di un laser a raggi X. Il fascio di un laser ad alta potenza di picco (dell'ordine delle decine di GW) viene focalizzato su un bersaglio metallico (ad esempio di alluminio) per generare un plasma di alta densità, che è una sorgente di radiazione X incoerente ad alta brillantezza. Dall'analisi delle caratteristiche del plasma e della radiazione emessa, effettuata con gli strumenti indicati nello schema e mostrati anche nelle tre figure seguenti, si pensa di poter individuare le condizioni sperimentali per la generazione di radiazione X coerente.

Nella zona dell'infrarosso le sorgenti accordabili sono ottenute quasi tutte per generazione indiretta tramite effetti non lineari, che utilizzano sorgenti laser nel visibile o nel vicino infrarosso come sorgenti primarie. Tale classe di processi non lineari consente la generazione di radiazione alla frequenza differenza fra quelle di due fasci laser miscelati in opportuni mezzi non lineari, quali cristalli e gas (v. fig. 99). Impiegando cristalli di niobato di litio ( $\text{LiNbO}_3$ ) è possibile, ad esempio, ottenere sorgenti accordabili nell'infrarosso da 2 a 4  $\mu\text{m}$  con processi di miscelamento o di generazione parametrica (v. fig. 100). L'estensione di tali me-

todi alla generazione di lunghezze d'onda maggiori presenta problemi di messa a punto ed ottimizzazione di nuovi materiali, soprattutto per migliorarne il rendimento di conversione. Studi sono rivolti alla generazione di infrarosso accordabile fino a 18  $\mu\text{m}$  in cristalli di recente realizzazione, e altri studi si prevedono per la generazione di infrarosso accordabile in celle a gas.

L'importanza di tali sorgenti è collegata soprattutto alle loro possibili applicazioni nel settore della fotochimica, con particolare riguardo alla separazione isotopica. Tali sorgenti consentono infatti l'eccitazione selettiva di legami

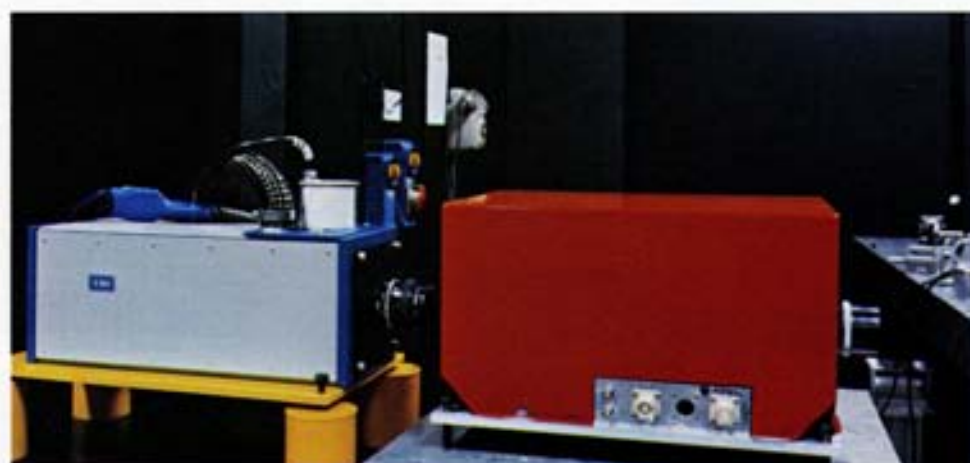


Fig. 102 - Macchina fotografica a scansione (streak-camera) per l'analisi di impulsi di luce di brevissima durata (nella scala dei tempi dell'ordine della decina di ps e con potere risolutivo fino a 7 ps). È impiegata per l'analisi dell'andamento nel tempo dell'intensità della luce emessa dal plasma generato nell'esperienza illustrata nella fig. precedente.

Fig. 103 - Otturatore rapido ad effetto Kerr ottico per l'analisi di impulsi di luce nella scala dei ps. Ha il medesimo impiego dell'apparecchio mostrato nella fig. precedente. La tecnica usata è però diversa e le informazioni ottenute sono sotto molti aspetti complementari.



molecolari che possono, a seguito di tale eccitazione, essere scissi, dando luogo a processi di dissociazione controllata.

Sono noti in letteratura numerosi esempi di reazioni fotochimiche controllate da fasci laser, che danno luogo a prodotti di reazione non ottenibili per mezzo dell'eccitazione termica delle stesse molecole. In particolare, tali processi sono utilizzati, per ora in fase sperimentale, per la separazione degli isotopi del carbonio, del boro, per la separazione del deuterio e recentemente anche dell'uranio 235, partendo dall'esaffluoruro di uranio. Le sorgenti che vengono studiate dal CISE possono trovare impiego in tali settori.

Queste sorgenti possono essere usate per spettroscopia ad alta risoluzione: per questo scopo sono richieste in genere potenze medie e di picco minori, ma è necessaria invece una miglior definizione dell'emissione nel dominio delle frequenze.

### 13.7. Studio di fattibilità di un laser a raggi X

Una ricerca con caratteristiche particolarmente avanzate è in corso da qualche anno, con lo scopo di studiare la possibilità di realizzare sorgenti coerenti nella regione X. Un laser a raggi X avrebbe una numerosa serie di applicazioni scientifiche e tecniche, soprattutto come strumento di indagine di strutture molecolari o biologiche e di strutture cristallografiche, nonché per l'analisi di materiali con grande dettaglio, grazie alla lunghezza d'onda della radiazione.

È stato finora dimostrato in vari laboratori che, generando plasmici con un laser primario ad impulsi di elevata potenza e breve durata in materiali quali il carbonio, l'alluminio ed altri, è possibile convertire con elevato rendimento (circa il 30%) la radiazione primaria in radiazione X non coerente. Le sorgenti X così ottenute hanno di per sé un notevole interesse





Fig. 104 - Spettrografo per radiazione ultravioletta e X, con possibilità di scansione fotoelettrica nella regione dello spettro compresa tra 10 e 900 Å. È impiegato per l'analisi della distribuzione spettrale della radiazione emessa dal plasma generato nell'esperienza illustrata nella fig. 101.

scientifico e tecnico per la loro brillantezza elevata. I successivi passi per la generazione di radiazione X coerente non sembrano semplici; tuttavia vi sono già esempi di emissione X da plasmi con caratteristiche particolari, che fanno pensare alla presenza di emissioni stimulate. La comprensione dei meccanismi di generazione della radiazione X dai plasmi e dei possibili processi di amplificazione passa attraverso

lo studio, assistito da esperienze, dei modelli matematici dei processi di interazione. La verifica sperimentale di tali modelli richiede lo svolgimento di esperienze e l'impiego di tecniche diagnostiche particolarmente avanzate per l'analisi dei fenomeni in esame, che avvengono su scale dei tempi dell'ordine dei ps. A tale scopo è stato attrezzato un laboratorio con sorgenti laser a Nd:YAG con emissione

ad impulsi di durata dell'ordine dei ps, dotato della relativa strumentazione diagnostica messa a punto di recente al CISE (v. fig. 101). Esso è costituito in particolare da:

– un sistema di registrazione fotografica con scansione elettroottica (« streak camera ») (v. fig. 102), che consente di registrare l'andamento nel tempo dell'intensità luminosa emessa dal plasma con potere risolutivo dell'ordine dei 10 ps;

– un otturatore elettroottico rapido ad effetto Kerr ottico (v. fig. 103), in grado di operare su scala dei tempi dello stesso ordine con tecniche di coincidenza ottica;

– uno spettrografo X-UV ad alta risoluzione (v. fig. 104), in grado di analizzare radiazioni X nell'intervallo 1-90 nm e di effettuare misure assolute di intensità.

Per tutti e tre gli strumenti, ed in particolare per la « streak camera » e lo spettrografo X-UV, è anche prevedibile tutta una serie di applicazioni ad altri tipi di ricerca.

Un'ulteriore tecnica diagnostica, che ha di per sé un notevole interesse per possibili applicazioni in altri settori, è l'olografia X, che è in fase di messa a punto (v. par. 14.3): in particolare si prevede di utilizzare come sorgente X il plasma generato da laser e, come materiale sensibile, film sottili di siliconi, che hanno già dato risultati soddisfacenti con metodi di incisione per mezzo di fasci elettronici; ci si attende un comportamento altrettanto efficiente per l'incisione con raggi X.

Il complesso di ricerche tecniche e sperimentali che è in corso per lo svolgimento del suddetto studio di fattibilità è destinato a fornire, in parallelo alle informazioni sull'obiettivo principale dello studio, numerose ricadute scientifiche e tecniche in altri settori a termine medio-lungo, come è dimostrato dall'interesse già manifestato da altri gruppi, in sede sia nazionale che internazionale, per questo tipo di esperienze.

## 14. APPLICAZIONI SCIENTIFICHE E TECNICHE DEI LASER

### 14.1. Esperimenti di diffusione di luce (scattering) da fluidi

I metodi di analisi delle proprietà statistiche della radiazione (v. par. 13.2), messi a punto per lo studio delle caratteristiche di emissione di un laser, ed in particolare i metodi di fototeleggio, hanno avuto una serie di applicazioni nelle esperienze di diffusione di luce da fluidi.

La luce diffusa da un fluido attraversato da un fascio laser conserva molte informazioni su quelle proprietà fisico-chimiche del mezzo in grado di agire sull'indice di rifrazione locale o medio. L'analisi della intensità media e delle fluttuazioni di intensità della luce diffusa consente di estrarre tali informazioni, che riguardano ad esempio i coefficienti di diffusione, il peso molecolare di particelle presenti nel fluido, lo stato di aggregazione di complessi in soluzione ed altri parametri che hanno spesso un notevole interesse pratico, perché intervengono in modo determinante nella cinetica di reazioni chimiche o di processi fisici nei fluidi considerati (v. figg. 105 e 106).

In questo campo, particolarmente ricco di risultati scientifici e applicativi, sono stati dati con continuità, con il supporto del CNR, numerosi contributi originali. Tra gli strumenti più significativi messi a punto per questo tipo di ricerche è da ricordare il correlatore rapido, che consente di determinare, con tecniche digitali, funzioni di correlazione in tempo reale con potere risolutivo fino a 60 ns per deboli segnali di luce. A completamento ed integrazione di questi metodi sono state messe a punto tecniche di misura che si basano sull'analisi della deflessione del fascio trasmesso.

Sono stati svolti negli ultimi anni studi su miscele in prossimità del punto critico, miscele bifasi, liquidi in presenza di gradienti di temperatura, fluidi con particelle in sospensione di diverso peso molecolare, aggregati molecolari in soluzione o in sospensione.

Fra le ricerche più recenti, vi sono quelle relative alle instabilità termiche ed alle modalità di innesco di moti convettivi in celle di fluidi, con presenza di gradienti di temperatura e di pressione (v. fig. 107). Sono in programma ricerche su processi di formazione di bolle di gas e di cavitazione in fluidi in moto, in presenza di forti gradienti termici e di pressione, per l'analisi dei transitori negli scambiatori di calore per reattori nucleari. Per tali esperienze sono state attrezzate due sale di misura con tutta la strumentazione elettronica ed ottica necessaria.

### 14.2. Interferometria su lunga distanza e misura di vibrazioni di strutture

Un altro settore che ha ricevuto un notevole sviluppo grazie all'impiego dei laser è stato quello della misura di distanze, di spostamenti e di vibrazioni con tecniche di ottica coerente. Le prime esperienze di interferometria su lunga distanza, svolte col supporto finanziario del CNR, risalgono al 1964. Utilizzando le proprietà di coerenza temporale del laser è stato possibile ottenere effetti di interferenza con differenze di percorso ottico dell'ordine di 100 m. Questo ha consentito di mettere a punto interferometri sperimentali con conteggio automatico di frange ed indicazione del senso di movimento, in grado di misurare spostamenti dell'ordine di  $0,10 \mu\text{m}$  anche a distanze



di quell'ordine. Successivamente tali ricerche sono state estese alla misura a distanza di vibrazioni di strutture anche di grandi dimensioni (~10 m).

Con tecniche di rivelazione particolarmente sensibili è possibile ridurre gli effetti della perturbazione introdotta dalla propagazione in atmosfera ed effettuare misure anche a distanze maggiori di 100 m.

Vengono attualmente svolte, per conto dell'ENEL, ricerche per la realizzazione di uno strumento, basato su tecniche di velocimetria Doppler, per la misura accurata a distanza di spostamenti e vibrazioni in strutture di grandi dimensioni, come dighe, edifici, ponti, etc. La misura a distanza con metodi ottici di spostamenti e vibrazioni di un punto è di particolare importanza quando l'accesso alla zona in esame è difficile o impossibile. Questo è il caso, ad esempio, di alcune parti di reattori nucleari o di linee aeree ad alta tensione.

### **14.3. Olografia ed interferometria in luce diffusa (speckle pattern) per l'analisi di campi di spostamento e di vibrazioni**

Le tecniche olografiche hanno consentito di

estendere i metodi di misura di spostamenti e vibrazioni di tipo interferometrico simultaneamente a tutti i punti della superficie dell'oggetto in esame.

Sono stati messi a punto, nell'ambito di commesse ENEL, metodi di analisi con interferometria olografica a doppia esposizione o in tempo reale dei campi di spostamento e deformazioni della superficie di un oggetto. Sulla stessa lastra olografica vengono effettuate due registrazioni dell'oggetto in esame, una prima della deformazione ed una seconda dopo la deformazione. Osservando simultaneamente attraverso l'ologramma le due superfici, si vedono dei sistemi di frange che consentono un confronto tra la superficie deformata e quella non deformata.

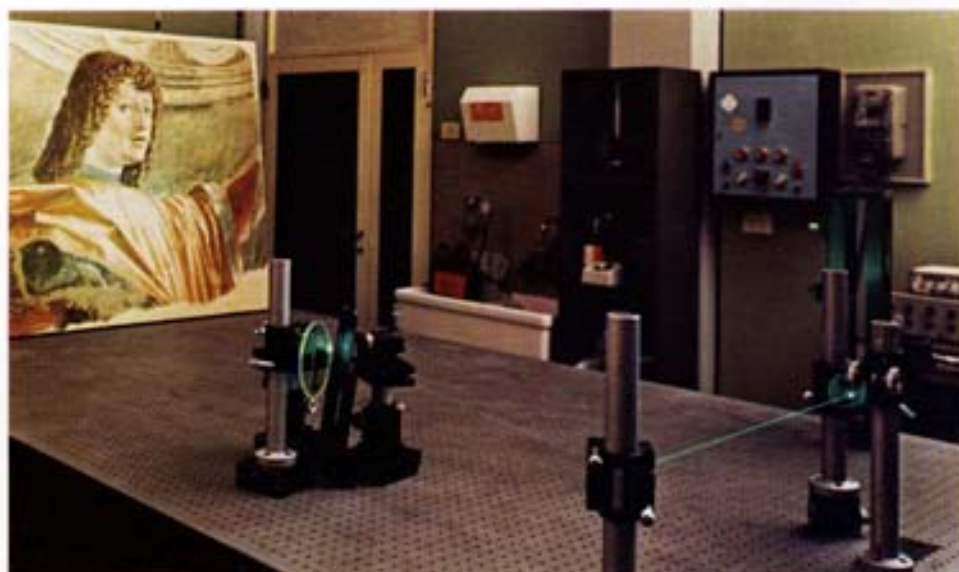
Per un'analisi in tempo reale della deformazione avvenuta il confronto avviene tra l'immagine olografica dell'oggetto, registrata nella prima fase, e l'oggetto stesso che viene lasciato sul posto. Si possono osservare allora direttamente durante la deformazione i sistemi di frange che descrivono la modifica della superficie.

È stato recentemente messo a punto un metodo elettroottico con scansione automatica dell'olo-



Fig. 107 - Apparecchiatura laser per l'analisi delle instabilità termoidrauliche in miscele liquide e la misura dei coefficienti di diffusione con metodi di deflessione del fascio di luce laser. L'apparecchiatura consente anche di determinare le variazioni di grandezze termodinamiche in prossimità dei punti critici delle transizioni di fase in miscele a più componenti. Questa tecnica potrebbe essere particolarmente utile nei processi di separazione isotopica, di distillazione frazionata e, come alternativa alle tecniche attuali, nella strumentazione biomedica.

Fig. 108 - Apparecchiatura per la registrazione di ologrammi: si tratta di un bancale antivibrante con sospensioni pneumatiche ad aria compressa, equipaggiato con un laser ad argo da 1 W (con selezione di lunghezza d'onda ed emissione su singolo modo) per l'illuminazione dell'oggetto in esame. Nel caso illustrato nella foto, si tratta di un affresco del Bramante staccato e trasferito su telaio (v. anche fig. 111). Le caratteristiche della sorgente consentono la registrazione di ologrammi di oggetti con dimensioni lineari fino a qualche m.

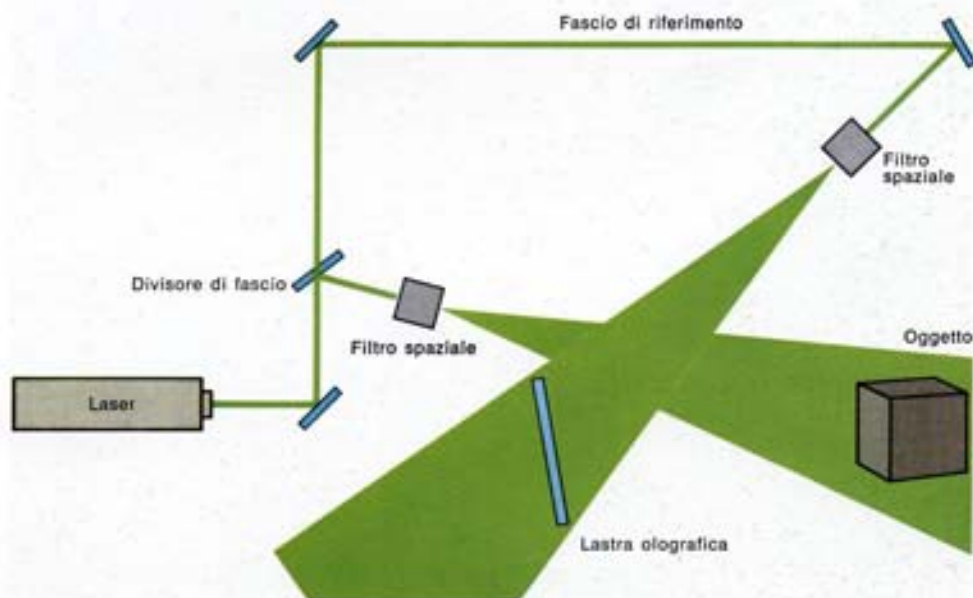


gramma, che consente la misura quantitativa del campo vettoriale di spostamento dei punti della superficie considerata con la precisione dell'ordine di  $0,2 \mu\text{m}$  per oggetti con dimensioni fino a 1 m.

L'analisi di vibrazioni può essere fatta con metodi analoghi. L'equivalente del metodo della doppia esposizione è, per le vibrazioni, il metodo stroboscopico, che consente, con illuminazione ad impulsi di luce in sincronismo con il ciclo di vibrazione, la realizzazione di ologrammi che registrano la differenza di po-

sizione fra due stati diversi del ciclo o tra l'oggetto vibrante e lo stesso non deformato. Questo metodo in particolare è stato l'oggetto di una commessa FIAT. L'analisi di vibrazioni può essere effettuata con la tecnica della media temporale, che consiste nel registrare anche un ologramma con tempo di esposizione maggiore del periodo di vibrazione. Infine, l'analisi in tempo reale viene effettuata come nel caso statico, sia con il metodo stroboscopico che con quello della media temporale. In questo secondo caso, però, le frange risultano poco

Fig. 109 - Schema dell'apparecchiatura per la registrazione di ologrammi mostrata nella fig. precedente. Il fascio laser viene suddiviso in due parti, di cui l'una serve per l'illuminazione dell'oggetto, l'altra costituisce il fascio di riferimento inviato direttamente sulla lastra olografica. Questo schema è utilizzato per l'analisi di deformazioni con il metodo della doppia esposizione, o di vibrazioni con il metodo della media temporale.



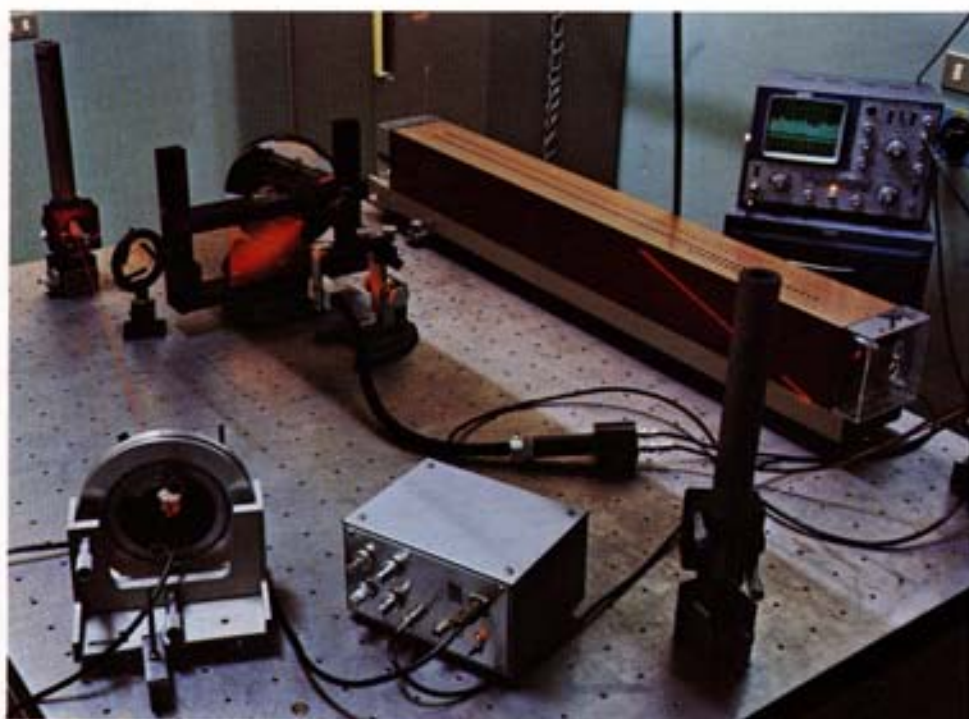


Fig. 110 - Banco per la scansione e la lettura di ologrammi. L'analisi quantitativa dell'ampiezza delle vibrazioni o delle deformazioni dell'oggetto in esame può essere effettuata in modo automatico, eseguendo una scansione dell'ologramma (nel portastre in fondo alla foto) con un fascio laser deflesso da un specchio oscillante (in basso a sinistra).



Fig. 111 - Fotografia di un ologramma a doppia esposizione dell'affresco visibile nella fig. 108, registrato con l'apparecchiatura mostrata nella fig. stessa. L'esame del sistema di frange presente nell'immagine ricostruita dall'ologramma, riportata nella foto, ha consentito di mettere in evidenza la presenza di distacchi dal supporto e di altre lesioni del dipinto. Informazioni di questo tipo relative ad opere d'arte sono utili sia per decidere interventi di restauro, sia per verificare a posteriori la correttezza degli interventi stessi.

contrastate. Anche l'analisi delle vibrazioni può essere fatta con una precisione dell'ordine di  $0,2 \mu\text{m}$ , impiegando il metodo di scansione elettroottico suddetto.

Questi metodi sono stati applicati nei seguenti settori:

- Studio di provini di materiali strutturali, per caratterizzarne il comportamento durante le prove di resistenza statica.
- Studio di modelli di strutture, per rilevarne il comportamento statico o dinamico.
- Studio di parti meccaniche in fase di collaudo o verifica, per determinarne in regime dinamico le frequenze di vibrazione e la distribuzione delle ampiezze.
- Controlli non distruttivi su parti meccaniche (particolarmente adatti per strutture laminari composite).

Al CISE è in funzione un laboratorio olografico attrezzato con banco antivibrante e laser ad argo per la registrazione di ologrammi di oggetti con dimensioni fino a  $\sim 2 \text{ m}$  (v. figg. 108 e 109) e banco di lettura con scansione elettroottica (v. fig. 110). Una singolare applicazione dell'olografia è mostrata nella fig. 111. In parallelo ed a complemento dei metodi olografici, con il supporto del CNR, sono state messe a punto tecniche di interferometria elettronica a luce diffusa con metodi di « speckle pattern » (ESPI - Electronic Speckle Pattern Interferometry). Con queste tecniche si possono usare mezzi di registrazione a bassa risoluzione, come le telecamere, e si ha un'immagine in tempo reale dell'oggetto sottoposto a sollecitazione. La disposizione base è sostanzialmente la stessa usata per registrare un ologramma di un'immagine formata da una lente (v. fig. 112), ma si introducono dei diaframmi per ridurre le frequenze spaziali del segnale. Questo causa ovviamente una diminuzione della qualità dell'immagine, che risulta però adeguata per molte applicazioni dell'ingegneria. Inoltre, usando una telecamera come mezzo di registrazione, l'informazione viene trasferita di-

rettamente ad un segnale video che può essere manipolato elettronicamente. Questo, se viene memorizzato, può essere successivamente confrontato con un segnale simile; solo l'informazione differenza viene presentata e questa dà informazioni sullo spostamento subito dall'oggetto in esame con un metodo analogo a quello olografico della doppia esposizione. In maniera alternativa un segnale video può essere filtrato elettronicamente: si ottengono così risultati equivalenti a quelli forniti dall'interferometria olografica a media temporale usata per studi di vibrazioni. In entrambi i casi si ottengono misure quantitative del fenomeno in esame come nell'interferometria olografica: il vantaggio è quello di averle in tempo reale (senza dover ricorrere a sviluppi fotografici) e di poter effettuare ulteriori elaborazioni dei dati (v. fig. 113).

#### **14.4. Misura di distanza con laser ad impulsi**

Sono stati studiati e realizzati sistemi di misura di distanza di interesse topografico e geodetico impieganti laser ad impulsi. Il telemetro topografico realizzato a livello di prototipo impiega un laser a semiconduttore con un sistema telescopico coassiale per la trasmissione e ricezione del fascio verso il prisma retroriflettore. Lo strumento è in grado di misurare distanze fino a  $2 \text{ km}$  con precisioni dell'ordine di 5 parti per milione; esso può essere alimentato a batteria e ne è previsto il montaggio su treppiedi standard per topografia.

Il telemetro geodetico studiato e realizzato a livello di laboratorio impiega un laser ad impulso a due lunghezze d'onda (quella del laser a rubino e la sua seconda armonica) per raggiungere precisioni migliori di una parte per milione. È stato fatto funzionare su distanze dell'ordine della decina di  $\text{km}$ , ma la sua portata può essere notevolmente aumentata impiegando sorgenti e rivelatori opportuni. L'aspetto



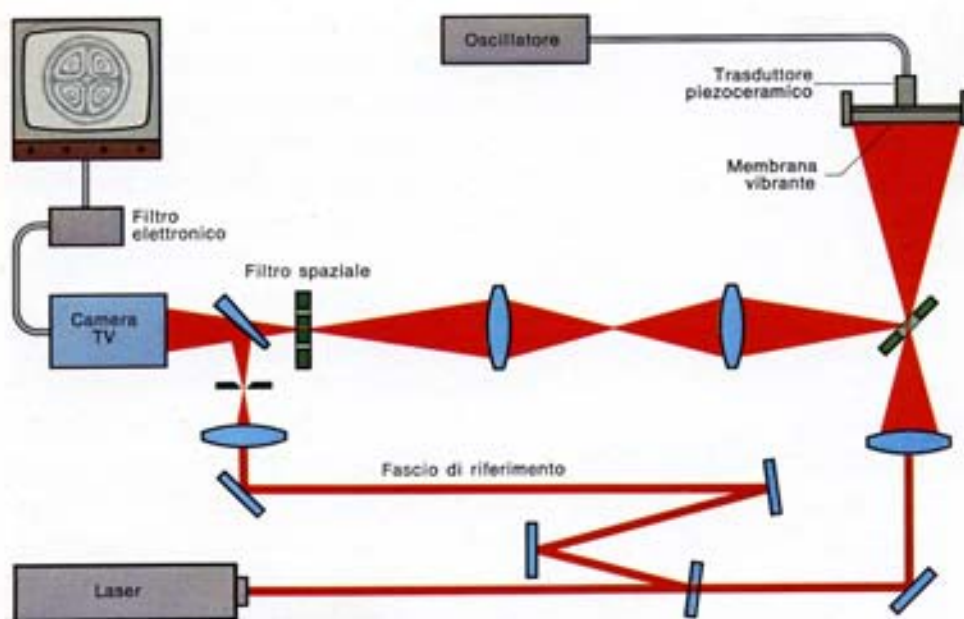


Fig. 112 - Schema dell'apparecchiatura per l'interferometria elettronica con luce diffusa (« speckle pattern »). Il fascio di un laser He-Ne da 20 mW viene suddiviso in due parti, di cui una serve per illuminare l'oggetto vibrante, l'altra costituisce il fascio di riferimento. La luce retroriflessa dall'oggetto viene inviata alla telecamera attraverso due lenti ed un'apertura di filtraggio. Questo schema è utilizzato per analizzare in tempo reale vibrazioni di oggetti con dimensioni lineari fino ad 1 m.

originale di questo tipo di telemetro consiste nella misura simultanea dei tempi di andata e ritorno dei due impulsi a lunghezze d'onda diverse fra il trasmettitore-ricevitore ed il retro-riflettore. Dalla differenza dei tempi di propagazione è possibile ottenere il valore medio dell'indice di rifrazione lungo il percorso ed effettuare quindi le correzioni necessarie per ot-

tenere, come si è detto, precisioni di una parte per milione.

#### 14.5. Metodi per il miglioramento di visibilità nella nebbia o in mezzi diffondenti in genere

Sono stati studiati sistemi atti a migliorare la visibilità in mezzi diffondenti con tecniche di



a)



b)

Fig. 113 - Fotografie di immagini televisive ottenute con l'apparecchiatura schematizzata nella fig. precedente, che mostrano i modi di vibrazione di una lamina metallica vincolata ai bordi ed eccitata sinusoidalmente al centro. Le frequenze di eccitazione sono rispettivamente 2,9 kHz in (a) e 3,6 kHz in (b).

selezione temporale della luce diffusa dall'oggetto in esame (range gating). Il sistema impiega una sorgente di illuminazione costituita da un laser ad impulsi ed un sistema di osservazione che comprende un intensificatore di immagine a più stadi, con il primo stadio impiegato come otturatore elettroottico rapido. Sfruttando la differenza nei tempi di propagazione della luce retrodiffusa dal mezzo diffondente antistante alla scena in esame rispetto a quella retrodiffusa dalla scena stessa è possibile selezionare nel sistema di osservazione solo la luce proveniente dalla scena in esame. Questo consente di migliorare il rapporto segnale/rumore e quindi il contrasto dell'immagine. Prove effettuate nella nebbia hanno consentito di mettere in evidenza aumenti di visibilità di un fattore  $3,0 \div 3,5$ , a seconda delle condizioni operative.

Tra le applicazioni possibili di queste tecniche vi è l'assistenza all'atterraggio di mezzi aerei (elicotteri in particolare, per il controllo della discesa in verticale) e lo sviluppo di altimetri, o telemetri in genere, ad osservazione diretta dell'immagine. Questi metodi sono utilizzabili, con sorgenti laser di lunghezza d'onda opportuna, anche per il miglioramento di visibilità in acqua marina, con prevedibili applicazioni allo studio della distribuzione di plancton ed in genere a problemi di ecologia marina.

#### **14.6. Misura a distanza della contaminazione atmosferica**

Una particolare applicazione delle sorgenti laser accordabili alla spettroscopia riguarda la rivelazione a distanza di contaminanti atmosferici. Tale rivelazione avviene impiegando pro-

cessi di interazione selettivi fra la radiazione laser e le specie chimiche in esame, che consentono di identificare la presenza dei vari contaminanti e di misurarne la concentrazione. Fra i processi più utili a questo scopo vi sono la fluorescenza e l'assorbimento; altri processi considerati in passato, come l'effetto Raman normale o risonante, risultano di scarsa utilità pratica. Grazie alla presenza nell'atmosfera di particelle in sospensione (aerosoli), che è nella maggior parte dei casi simultanea alla presenza dei vari contaminanti, è possibile utilizzare i processi di assorbimento in modo particolare. La luce retrodiffusa dagli aerosoli decresce quando la sorgente laser viene accordata su una linea di assorbimento del contaminante allo stato gassoso in esame. Un confronto fra l'intensità raccolta fuori risonanza ed in risonanza consente determinazioni quantitative delle specie chimiche presenti. Per questo tipo di misure possono essere utilizzate sorgenti laser nel visibile o, più opportunamente, sorgenti accordabili nell'infrarosso, ove esistono numerose linee di assorbimento delle specie molecolari.

A questo scopo è in corso di realizzazione una sorgente laser accordabile con continuità nell'infrarosso ( $1,5-4 \mu\text{m}$ ) con emissione ad impulsi.

Ha avuto inizio recentemente in questo settore una serie di ricerche, in cui verranno utilizzate sia le competenze specifiche sulle sorgenti laser accordabili e sulle tecniche di rivelazione nell'infrarosso, sia le competenze sui problemi di propagazione e di ricezione di radiazione laser nell'atmosfera acquisite durante le esperienze di telemetria su lunga distanza citate nel paragrafo precedente.

## 15. STUDI DI CHIMICA

### 15.1. Generalità

Le attività in campo chimico furono avviate al CISE fin dagli inizi, in relazione sia ai molti problemi specifici di questa scienza (analisi di sostanze e materiali, studio di reazioni, preparazione di sostanze particolari), sia come supporto insostituibile di altre discipline, come l'ingegneria, la fisica e l'elettronica. Attualmente il CISE dispone di una notevole esperienza specie nel campo della chimica analitica e della chimica-fisica degli elementi e dei materiali inorganici, valorizzata dalla disponibilità delle più moderne apparecchiature.

Le conoscenze nel campo della chimica analitica abbracciano una vasta gamma di tecniche, dalla tradizionale analisi per via umida alla radiochimica ed all'analisi strumentale con le apparecchiature più sofisticate. Esse sono state acquisite non soltanto con una lunga pratica di applicazione di metodi già collaudati, ma anche con un fruttifero lavoro di ricerca e di messa a punto di nuove metodologie.



Fig. 114 - Spettrografo di emissione ottica, impiegato presso il laboratorio di spettrografia per l'analisi di elementi in tracce in matrici differenti.

### 15.2. Chimica analitica strumentale

Il progetto tecnologico ha impegnato i ricercatori del CISE in un continuo aggiornamento delle attrezzature e dei metodi necessari per assolvere i compiti di una chimica analitica presata da sempre crescenti esigenze. Per tali motivi, se da un lato si è provveduto sistematicamente ad acquisire strumenti con caratteristiche d'avanguardia, dall'altro lato è stato incoraggiato lo sviluppo di metodologie particolarmente sofisticate, dedicate sia alla comprensione di fenomeni ed all'acquisizione di conoscenze fondamentali, sia alla soluzione di particolari problemi.

La gamma di tecniche analitiche di cui dispone il CISE comprende: la spettrografia di emissione (v. fig. 114), la spettrometria di fluorescenza di raggi X, la spettrometria di assorbimento atomico, la spettrofotometria nell'ultravioletto, nel visibile e nell'infrarosso (v. fig. 115), la diffrattometria X e la spettrometria  $\gamma$  per l'analisi mediante attivazione neutronica. Tra le apparecchiature di spettrografia di emissione, particolare menzione merita la microsonda laser, sviluppata al CISE. Questo strumento (v. fig. 116), uno dei pochi esistenti al mondo, desta attualmente un notevole interesse per le molte e suggestive applicazioni possibili in campi diversi: mineralogia, geologia, metallurgia, chimica dei materiali ceramici, archeologia, biologia, medicina, criminologia e medicina legale.

La spettrometria di fluorescenza di raggi X, dotata di uno tra i più moderni strumenti attualmente in commercio (v. fig. 117), viene impiegata per analisi rapide, non distruttive e molto precise. Si analizzano tra l'altro prodotti

Fig. 115 - Strumentazione per analisi chimiche spettrofotometriche: in primo piano, uno spettrofotometro a doppio raggio per misure nell'ultravioletto e nel visibile con campioni termostattati; in fondo, spettrofotometro per misure nell'infrarosso.



di corrosione, eventualmente anche radioattivi, campioni ambientali e campioni metallici. Per la soluzione di problemi particolari connessi all'analisi di campioni ambientali si compiono studi per la correzione delle interferenze dovute alla natura stessa del campione.

La spettrometria di assorbimento atomico si avvale di strumentazione aggiornata con correttori del fondo ed atomizzatori senza fiamma (v. fig. 118); essa è ormai di uso generale, con applicazioni in tutti i campi di interesse,

come la spettrofotometria nell'ultravioletto e nel visibile.

La spettrofotometria nell'infrarosso viene utilizzata per analisi particolari, quali ad esempio la determinazione dell'acqua pesante, la misura dello spessore di strati di ossido su materiali metallici, etc.

La diffrazione X viene impiegata per il riconoscimento delle specie cristalline presenti in un campione, o per la definizione della struttura di un materiale. Essa costituisce un

Fig. 116 - Microsonda laser-spettrografica impiegata per analisi non distruttive di campioni di diversa natura. Tale apparecchiatura consente di analizzare zone ristrette, dell'ordine dei  $\mu\text{m}$ , senza trattamento preliminare dei campioni. Viene altresì impiegata per indagini di carattere metallurgico sulla struttura e condizioni morfologiche dei materiali.





Fig. 117 - Apparecchiature a raggi X, utilizzate sia per analisi cristallografiche mediante diffrazione X, sia per analisi di composizione elementare mediante spettrometria di fluorescenza X.

valido aiuto per gli studi metallografici, fornendo utili informazioni sugli effetti di determinati trattamenti metallurgici sui materiali studiati.

L'analisi per attivazione neutronica viene eseguita generalmente in collaborazione con il CESNEF (CENTRO Studi Nucleari E. Fermi)

del Politecnico di Milano, nel cui reattore i campioni vengono irraggiati. Il CISE dispone di laboratori attrezzati per le manipolazioni chimiche dei campioni radioattivi e di moderni strumenti per le misure mediante spettrometria  $\gamma$  con tecniche automatiche di acquisizione e di elaborazione dei dati.

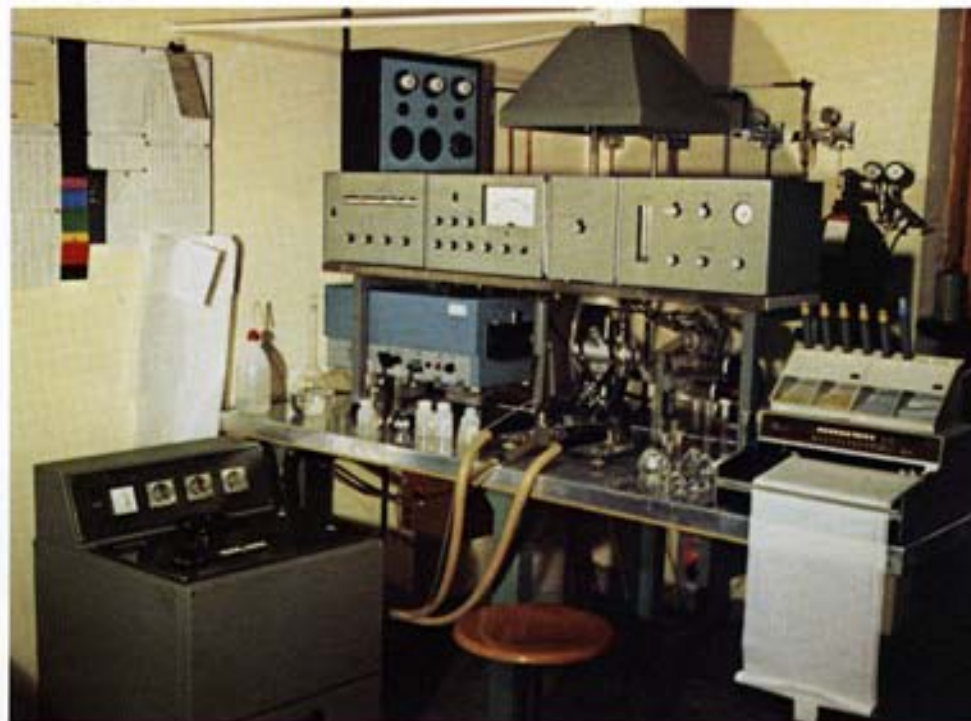


Fig. 118 - Spettrometro ad assorbimento atomico, con cui vengono eseguite analisi elementari a livelli di concentrazione bassissima. I campioni liquidi possono essere analizzati mediante atomizzazione sia in fiamma, sia elettrotermica.

Infine, per la rivelazione a distanza di contaminanti atmosferici è in fase di messa a punto una sorgente laser accordabile nell'infrarosso con emissione ad impulsi (v. par. 14.6).

### 15.3. Tecniche di separazione

L'avvento delle moderne tecniche strumentali di analisi, come quelle ora ora citate, ha fatto credere fino a qualche anno fa che la figura tradizionale del chimico analitico fosse destinata a tramontare. Ma il contemporaneo sviluppo della tecnologia e delle conoscenze ha talmente aumentato le esigenze di selettività e di sensibilità delle analisi da rendere ancora insostituibile quello stesso chimico, a cui ora viene chiesto di isolare l'elemento di interesse o di concentrarlo da grossi volumi di campione prima dell'analisi, per poter fornire valori di concentrazione che spesso non superano qualche milionesimo di grammo per chilogrammo di campione.

Le tecniche di separazione e di arricchimento hanno sempre interessato una frazione importante delle ricerche di chimica svolte al CISE, che hanno portato un contributo non trascurabile allo sviluppo di questa scienza, specie nel campo della cromatografia di ioni inorganici.

L'esperienza così acquisita ha permesso di mettere a punto e di disporre attualmente di metodologie di analisi particolarmente selettive e sensibili, in grado di determinare concentrazioni estremamente basse, spesso inferiori alle parti per miliardo. Recenti esempi di applicazioni di questi metodi sono la determinazione di ferro e rame nell'acqua di caldaia di centrali elettriche; la determinazione del cromo(III), del cromo(IV) e del cesio in acqua di fiume; la determinazione di argento in acqua piovana. La stessa esperienza si è dimostrata altrettanto utile per migliorare la sensibilità e l'accuratezza delle misure radiochimiche, delle analisi per attivazione neutronica e degli studi della ra-

dioattività ambientale, ad esempio per separare radionuclidi che interferiscono a vicenda, per isolare dalle loro matrici quei radionuclidi di cui si debba misurare la radioattività  $\beta$  o  $\alpha$ , o per arricchire radionuclidi che sono particolarmente diluiti nei campioni da analizzare.

### 15.4. Tecniche di radiochimica

Un isotopo radioattivo di un certo elemento chimico è un atomo di quell'elemento che presenta praticamente le stesse proprietà chimiche dell'isotopo stabile corrispondente, e che possiede in più la proprietà di emettere radiazioni ionizzanti. Se noi aggiungiamo un isotopo radioattivo ad una soluzione contenente il corrispondente isotopo stabile, disporremo in pratica della stessa soluzione di partenza, nella quale però all'elemento in questione sarà associata una certa radioattività; questo elemento sarà quindi « tracciato » dal suo isotopo radioattivo, facilmente rivelabile o misurabile con appropriate apparecchiature.

L'uso di isotopi radioattivi per semplificare le analisi nel corso di esperimenti di chimica è solo un esempio dei molteplici vantaggi dell'uso di traccianti radioattivi.

Il CISE dispone di un laboratorio opportunamente attrezzato per garantire la manipolazione sicura di materiali radioattivi, fino ad alcuni mCi, e di una notevole esperienza di radiochimica, maturata in numerose attività con l'impiego di sostanze a basso e medio contenuto di radioattività. Attualmente la tecnica dei traccianti viene applicata negli studi sulle separazioni chimiche e negli studi di chimica-fisica. Lo stesso laboratorio e la stessa esperienza forniscono anche il supporto chimico necessario per l'analisi mediante attivazione neutronica. Il laboratorio è anche dotato di una piccola « cella calda », dove le operazioni chimiche su materiali a radioattività relativamente elevata (fino a 20 Ci) vengono eseguite attraverso un muro di 10 cm di piombo, che pro-



Fig. 119 - Sala conteggi del laboratorio di radiochimica, attrezzata per misure di radiazioni  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma$  su campioni solidi o liquidi.

tegge l'operatore dai rischi derivanti dalle radiazioni. Annessa al laboratorio di radiochimica vi è una sala conteggi (v. fig. 119), attrezzata per misure  $\alpha$ , per misure  $\beta$  su campioni solidi e liquidi, e per la spettrometria  $\gamma$  ad alta risoluzione o ad elevata sensibilità.

### 15.5. Attività di chimica-fisica

Anche la chimica-fisica è stata da diversi anni argomento di ricerca al CISE, con studi teorici ed attività sperimentali su reazioni e su sistemi chimici, di interesse nel campo nucleare.

L'esperienza acquisita trova attualmente applicazione negli studi di base in supporto all'utilizzo di strumentazioni analitiche avanzate, e soprattutto nello studio dei meccanismi di diffusione nell'ambiente delle sostanze inquinanti radioattive e tradizionali. Tra le attività svolte, citiamo: gli studi sui meccanismi di ripartizione di ioni metallici tra l'acqua del fiume Po ed il particolato solido sospeso in essa; la previsione sulla diffusione nel terreno di cesio-137 e stronzio-90 eventualmente presenti in acqua di falda, basata sui risultati di prove cromatografiche in laboratorio, simulanti le condizioni naturali.

## 16. STUDI SULL'AMBIENTE

### 16.1. Generalità

In questi ultimi anni ha avuto luogo un'ampia espansione di tutte le ricerche aventi come oggetto l'ambiente naturale. Causa determinante di questo sviluppo è stata principalmente la presa di coscienza della portata e dei rischi insiti nelle alterazioni provocate direttamente o indirettamente dall'uomo nei sistemi naturali. A ciò si è aggiunta la crisi del petrolio, che, ponendo come alternativa più immediata per la produzione di energia l'impiego di centrali elettronucleari, ha stimolato in modo particolare gli studi sulla compatibilità con l'ambiente di questo tipo di impianti.

Anche al CISE taluni studi sull'ambiente - per cui esistevano già conoscenze e attrezzature di base - sono stati ampiamente sviluppati; in modo particolare ci si riferisce alle valutazioni sulla contaminazione chimica e sui livelli di radioattività di talune componenti ambientali, allo studio delle loro caratteristiche, nonché alle ricerche sulle alterazioni termiche delle acque dovute agli scarichi caldi di impianti termoelettrici.

### 16.2. Contaminazione chimica

I problemi che in questo ambito sono stati affrontati al CISE riguardano la messa a punto dei metodi analitici per la determinazione di alcuni elementi metallici inquinanti (ad esempio ferro, cromo, nichel, piombo, titanio) in parecchie componenti ambientali.

Posto un certo limite massimo al valore di concentrazione di un elemento in una matrice, non sempre è sufficiente avere a disposizione un metodo di analisi chimica che raggiunga questo limite. Frequentemente è necessario uti-

lizzare metodi con sensibilità molto più spinta per sapere se si è vicini o lontani dal limite massimo ammissibile.

Per questo scopo sono ora disponibili al CISE, come si è visto nel cap. precedente, metodologie che impiegano procedure chimiche classiche, oppure tecniche strumentali che utilizzano le più moderne apparecchiature attualmente disponibili, quali ad esempio la spettrometria per fluorescenza X, l'analisi per attivazione neutronica, etc.

### 16.3. Radioattività ambientale

Uno dei problemi posti dalle centrali nucleari è il controllo del livello di radioattività dell'ambiente circostante; è necessario infatti valutare l'effetto della piccola quantità di sostanze a bassa radioattività che vengono scaricate durante il funzionamento normale dell'impianto e tenere presente la possibilità, anche se molto remota, di incidenti e delle relative conseguenze. Vanno controllate quindi tutte le componenti ambientali (ad esempio aria, acqua, terreno, vegetali, animali, etc.) attraverso cui la radioattività può agire sull'uomo.

Il CISE è attrezzato con tutta quella serie di moderne apparecchiature, quasi sempre molto sofisticate, che permettono di misurare i bassissimi livelli di radioattività (v. figg. 120 e 121) delle componenti ambientali più importanti; tali apparecchiature sono state impiegate per le indagini effettuate in questi anni nelle zone dove già sono installate centrali nucleari ed in quelle dove potrebbero esserne installate nel futuro.

A seconda dei casi, lo scopo era quello di fare





Fig. 120 - Sistema Plurimat 20 Intertechnique per l'acquisizione e l'elaborazione automatica di spettri  $\gamma$  di campioni a bassa radioattività, eseguiti con rivelatori ad alta risoluzione. A destra dell'apparecchiatura è visibile il contenitore con pareti di ferro, spesse 15 cm, che serve a schermare dalle radiazioni naturali il rivelatore a Ge(Li) ed il campione da analizzare. Il sistema viene usato per spettrometria  $\gamma$  diretta di campioni di origine ambientale.

un accurato esame della radioattività naturale e della contaminazione radioattiva dell'ambiente (dovuta alla ricaduta di radionuclidi prodotti dall'esplosione di bombe nucleari) prima dell'entrata in funzione di una centrale nucleare, oppure di valutare gli effetti prodotti sull'ambiente da un impianto dopo un certo numero di anni di funzionamento.

Gli esami sono stati talvolta molto estesi ed hanno riguardato la determinazione di elementi radioattivi naturali (uranio, torio, rado, etc.) ed artificiali (cesio-134, cesio-137, stronzio-90, cobalto-60, zirconio-95, manganese-54, ferro-59, antimonio-125, etc.) in numerose matrici; come esempio, fra i prodotti analizzati si possono citare: grano, riso, foraggi, pomodori, latte, carni bovine e suine, pesci, molluschi, alghe, acqua di mare e di fiume, sedimenti, terreni, aria, etc. (v. fig. 122).

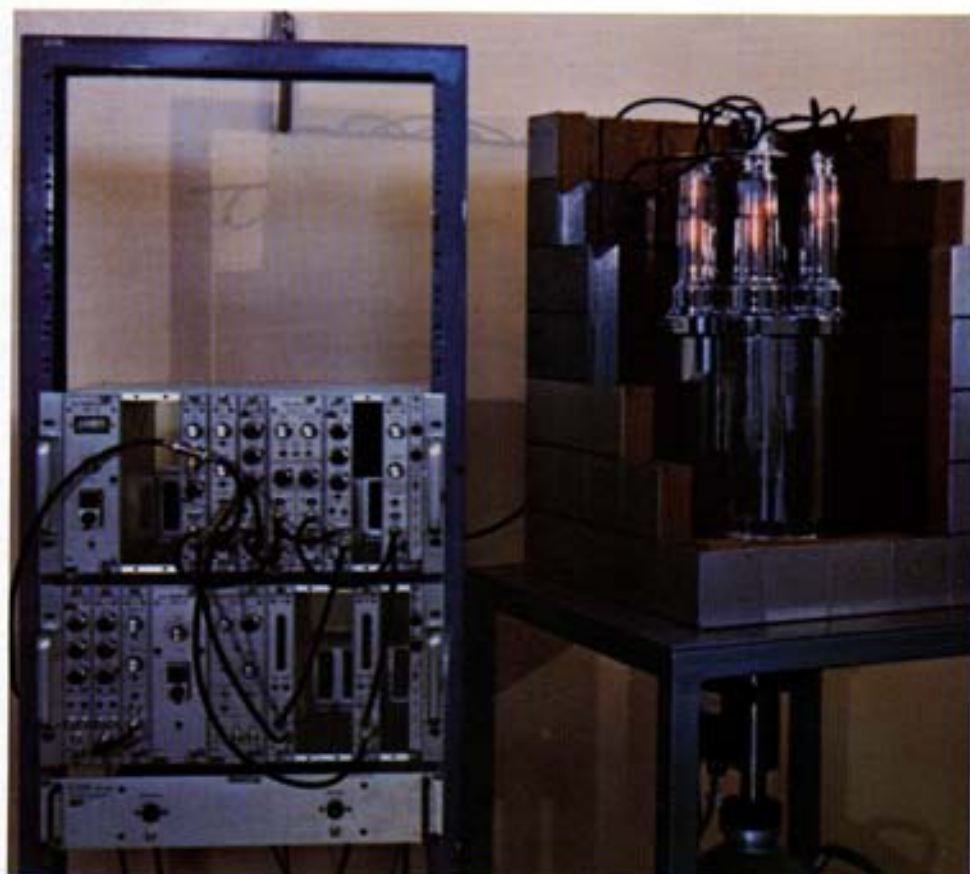


Fig. 121 - Sistema di coincidenza ed anticoincidenza  $\gamma/\gamma$  per misure di bassissimi livelli di radioattività. Il sistema sfrutta la particolarità di alcuni radioisotopi (ad esempio cesio-134, cobalto-60) di emettere contemporaneamente radiazioni  $\gamma$  di diverse energie, discriminando così la loro presenza da quella di altri radioisotopi e della radiazione di fondo. Esso trova applicazione nell'analisi di campioni ambientali.

Per le misure della radioattività  $\beta$  vengono normalmente impiegati complessi a basso fondo con contatori G.M. o plastici in anticoincidenza; la radioattività  $\gamma$  è misurata invece per spettrometria con rivelatori a Ge(Li). Appositi programmi di calcolo provvedono alla elaborazione automatica dei dati sperimentali.

In alcuni casi è possibile fare le misure di radioattività dopo trattamenti di essiccazione più o meno semplici, per cui è disponibile un apposito laboratorio, mentre per altri casi è indispensabile procedere a trattamenti chimici e separazioni radiochimiche (anch'esse svolte in particolari laboratori) che permettono di isolare e misurare il radioisotopo che interessa. Ciò ha richiesto la messa a punto di metodi chimici e radiochimici di estrazione e separazione, ai quali si è fatto cenno nel cap. precedente. Non tutte le misure vengono però effettuate in laboratorio; talune devono essere fatte direttamente « in campo ». È quindi disponibile un automezzo (v. fig. 123), appositamente attrezzato con la strumentazione necessaria per talune misure di radioattività, con il quale sono stati fatti rilevamenti in parecchie località italiane in cui sono situate centrali nucleari o se ne prevede l'installazione.

#### **16.4. Studi sulle caratteristiche di alcune componenti ambientali**

Una parte delle attività riguardanti in modo generale l'ambiente ha avuto come oggetto lo studio di alcune caratteristiche di un corpo idrico. Si è trattato prevalentemente di ricerche volte a caratterizzare dal punto di vista chimico e chimico-fisico l'acqua, il materiale in sospensione ed il sedimento, acquisendo dati indispensabili per valutare la ricettività di un corso d'acqua.

Oltre che le procedure per le analisi classiche sull'acqua di fiume, sono state messe a punto

le tecniche per la determinazione della distribuzione dei diametri delle particelle del materiale solido in sospensione e depositato sul fondo (v. fig. 124), e le procedure di analisi chimica e mineralogica di questi materiali.

Come caso pratico, queste metodiche sono state applicate alla caratterizzazione del materiale sospeso e dei sedimenti in un tratto del fiume Po, procedendo quindi alla definizione della loro capacità di scambio, mediante prove con traccianti radioattivi in laboratorio, nei confronti di alcuni elementi chimici. Determinando inoltre la concentrazione in acqua e la quantità di vari elementi contaminanti legata a quei tipi di sostanze (materiale sospeso e sedimenti), si sono calcolati i coefficienti di distribuzione caratteristici di questi elementi in quel tratto di fiume. Un'indagine di tipo relativamente simile, anche se per scopi molto diversi, è stata effettuata sui terreni, ed anche in questo campo sono state acquisite conoscenze abbastanza vaste. Dopo aver fatto un'accurata caratterizzazione dal punto di vista chimico e mineralogico, si sono definite la capacità di scambio ed il coefficiente di distribuzione dei terreni in esame nei confronti di alcuni elementi di particolare interesse (ad esempio cesio, stronzio, ferro, etc.). Facendo opportune valutazioni, si è in grado di prevedere le modalità con cui tali elementi - immessi nel terreno in certe concentrazioni e quantità - interessano la falda acquifera sottostante e le velocità con cui si spostano nella falda stessa.

Come esempio particolare di ricerche condotte su componenti ambientali, sembra interessante ricordare le datazioni di minerali e sedimenti, effettuate misurando l'equilibrio radioattivo di alcuni prodotti di decadimento di elementi radioattivi naturali (uranio e/o torio). Si tratta ovviamente di metodi abbastanza complessi, che però sono spesso insostituibili e permettono di risalire anche a decine di migliaia di anni (v. fig. 125).



Fig. 122 - Prelievo di un campione di sedimento marino per misure di radioattività naturale ed artificiale.



Fig. 123 - Particolare dell'interno dell'automezzo FIAT-242 attrezzato per misure in campo di radioattività naturale e artificiale. In particolare, la strumentazione visibile nella foto serve alla determinazione della concentrazione in aria del rado-222, radioisotopo della famiglia dell'uranio naturale.

### 16.5. Scarichi termici di impianti termoelettrici

Nel processo di conversione tra energia termica ed energia meccanica degli impianti termoelettrici, la quantità di calore che deve essere ceduta a bassa temperatura è una frazione sostanziale del calore totale prodotto. Infatti il rendimento complessivo di una centrale di questo tipo supera di poco - nel caso delle moderne centrali termoelettriche convenzionali - il 40%. Si tratta di valori difficilmente migliorabili, se non a prezzo di notevoli penalizzazioni economiche. Nel caso di centrali nucleari, quelle più comunemente diffuse oggi, equipaggiate cioè con reattori PWR o BWR, a causa del-

la bassa pressione e temperatura del vapore prodotto, hanno rendimenti ancora più bassi, intorno al 33%, e solo con l'adozione di reattori a gas ad alta temperatura o veloci si potrebbero avere rendimenti paragonabili a quelli delle centrali termoelettriche convenzionali.

In genere il calore residuo delle centrali attualmente funzionanti viene dissipato in corpi di acqua naturali, come fiumi, laghi o mari, facendo attraversare i condensatori della turbina da una portata d'acqua da quelli prelevata. Ciò provoca un'alterazione termica dell'acqua, che può dar luogo ad effetti dannosi sull'ecosistema interessato. Per questo motivo si parla sempre più spesso di « inquinamento termico »

delle centrali di potenza, anche se impropriamente, in quanto l'alterazione termica dell'acqua non provoca necessariamente effetti negativi, come avviene invece per le altre forme d'inquinamento. Esso provoca una perturbazione di tutto l'ecosistema acquatico e l'uomo ne subisce le eventuali conseguenze solo in modo indiretto. È quindi difficile valutare l'importanza dell'« inquinamento termico » rispetto ad altri pericoli più immediati per l'uomo. Tuttavia va ricordato che l'ecosistema acquatico è abbastanza sensibile alla temperatura dell'acqua, per cui anche sue modeste variazioni rispetto al valore « naturale » potrebbero provocare modifiche dell'ambiente.

Le alterazioni termiche hanno degli effetti sia locali che globali. La diluizione delle acque calde scaricate entro il corpo d'acqua richiede una zona più o meno estesa a seconda del tipo di scarico utilizzato e del grado di turbolenza del corpo d'acqua stesso. Si hanno così, nella zona prospiciente lo scarico, delle mappe termiche relativamente perturbate rispetto a quelle naturali (« pennacchi caldi »). Se si tratta di corso d'acqua, si può avere come caso estremo la formazione di una zona a temperatura più elevata, in direzione trasversale al corso d'acqua stesso. Ad una certa distanza dallo scarico si determina praticamente la miscelazione uniforme dell'acqua calda e di quella fredda, che provoca una sovratemperatura di tutto il corso d'acqua, quantitativamente però assai inferiore a quelle nel pennacchio caldo.

Nel 1971 è iniziato al CISE, ed è tuttora in corso, un programma di ricerca sull'alterazione termica del fiume Po, dovuta allo scarico dei condensatori degli impianti termoelettrici localizzati sulle sue sponde (Piacenza Levante, Ostiglia, La Casella e, prossimamente, Caorso). Per ogni sito si determina la configurazione del « pennacchio caldo », mediante rilevazione delle distribuzioni di temperatura del fiume in un certo numero di sezioni trasversali a valle dello stesso scarico, in funzione della portata del



Fig. 124 - Strumento Coulter Counter per il conteggio e la determinazione della distribuzione granulometrica di particelle sospese in acqua o altro liquido. Esso è in grado di fornire in pochi minuti la distribuzione granulometrica e la concentrazione di particelle con diametri anche inferiori al  $\mu\text{m}$ . È stato impiegato nello studio del materiale sospeso nei fiumi e di pigmenti per vernici.



Fig. 125 - Prelievo di una carota di sedimento marino in una zona a basso fondale. Analizzando la stratificazione di particolari elementi radioattivi naturali (piombo-210, polonio-210) o artificiali (cesio-137) è possibile valutare la velocità di sedimentazione sul fondale.



Fig. 126 - Il natante PANDORA, attrezzato per le ricerche sull'alterazione termica delle acque fluviali dovuta agli scarichi caldi delle centrali elettriche. In particolare, esso viene utilizzato in corrispondenza degli scarichi delle centrali dell'ENEL localizzate sulle rive del Po. È visibile a prora la sonda automatizzata porta-trasduttori per la rilevazione delle distribuzioni di temperatura e di velocità delle acque. A bordo è installato un minicalcolatore per l'elaborazione immediata dei dati rilevati.

fiume e del livello di potenza della centrale. Vengono anche sistematicamente misurate le distribuzioni di velocità del fiume e le profondità delle sezioni d'interesse.

Per tali rilevamenti è stata messa a punto una procedura sperimentale che si avvale di due natanti appositamente realizzati. Il più attrezzato dei due è il natante PANDORA (v. fig. 126). Esso è caratterizzato da una notevole stabilità in fase di ancoraggio, fondamentale per tali misure, soprattutto per quelle di velocità, e da un funzionamento assai automatizzato; in particolare esso è dotato di tre propulsori indipendenti che ne aumentano la manovrabilità e la flessibilità di funzionamento. Per mantenere rigorosamente fisso durante la misura il posizionamento del natante si è adottato un tipo di ancoraggio rigido, costituito da due pali automatizzati che vengono calati dai due

lati del natante. A prora, in posizione centrale, è stata montata su una struttura mobile una sonda automatizzata porta-trasduttori per le misure delle grandezze d'interesse. A bordo è installato un minicalcolatore che consente l'elaborazione immediata dei dati rilevati.

In parallelo al programma sperimentale sono stati svolti studi di analisi di modelli teorici che descrivono il miscelamento di due correnti e sono state messe a punto correlazioni dei dati sperimentali.

Le competenze e le attrezzature acquisite dal CISE nel campo dei problemi termoidraulici di corsi d'acqua naturale sono tali da consentire una completa analisi conoscitiva degli aspetti ambientali connessi con qualsiasi futura esigenza di sviluppo di impianti di potenza nel Paese.

## 17. STUDI DI FISICA

### 17.1. Competenze nel campo della fisica

Le competenze tradizionali acquisite dal CISE nel campo della fisica coprono i seguenti settori: acceleratori elettrostatici di particelle, struttura della materia, fisica atomica, fisica nucleare.

La pluridecennale competenza sugli acceleratori elettrostatici di particelle si è formata attraverso la successiva realizzazione, interamente ad opera di ricercatori e tecnici del CISE, di diversi acceleratori: Cockroft & Walton, da 400 keV; Van de Graaff, da 3 MeV; Tandem V.d.G., da 7 MeV. Il primo di essi si trova già da alcuni anni presso il Museo della Scienza e della Tecnica di Milano, dopo essere stato impiegato per quasi un decennio in numerose ricerche; il secondo è stato smantellato ed in parte riutilizzato per la costruzione del Tandem; quest'ultimo è l'unico acceleratore del suo tipo progettato e costruito interamente in Italia, e pertanto le competenze del CISE a questo riguardo sono praticamente uniche nell'ambito nazionale. In particolare, si è acquisita una notevole esperienza su svariate tecnologie in problemi di isolamento di alte tensioni elettriche (v. fig. 127), dell'ottica elettronica di fasci di particelle, di sorgenti di fasci di particelle (v. fig. 128), di impiantistica del vuoto spinto e di controllo automatico di impianti facenti uso di sistemi elettronici e circuitali avanzati. Il Tandem permette di ottenere fasci di protoni e deutoni di 7 MeV e fasci di ioni più pesanti, in particolare particelle alfa e ioni ossigeno. Nel caso di protoni, sono disponibili fasci analizzati di intensità dell'ordine di qualche  $\mu\text{A}$  e con risoluzione in energia dell'uno per mille.

Le competenze in struttura della materia vertono sulle proprietà dei solidi in relazione alla regolarità della struttura del solido stesso (influenza dei difetti reticolari in un materiale irraggiato, ad es., o comportamento di una lega metallica nella transizione ordine-disordine), sulle proprietà magnetiche della materia (il CISE dispone di strumentazione di elevatissima sensibilità per misure di suscettività magnetica), sulla vasta problematica della diffusione allo stato solido (sia di materia che di calore) anche in materiali anisotropi, sulla struttura elettronica di metalli, leghe e semiconduttori. A queste si affiancano altre competenze di tipo fisico-matematico sui particolari processi o sistemi non lineari. Produzione di monocristalli metallici e di strati sottili (v. fig. 129), studio della diffusività termica in isolanti non omogenei ed anisotropi, degli effetti fisici delle radiazioni sui materiali, delle proprietà elettriche dei superconduttori, sono alcuni dei filoni di ricerca attualmente coltivati.

Nel campo della fisica atomica sono presenti competenze applicative sulle tecniche analitiche mediante fluorescenza X eccitata da particelle cariche accelerate, sull'interazione tra ioni pesanti ed atomi pesanti, sul rumore elettronico nei solidi, sul comportamento degli elettroni nei gas.

In fisica nucleare le competenze si accentrano sulle reazioni alle basse energie. Ai notevoli sviluppi teorici e sperimentali sulle reazioni nucleari con neutroni da 14 MeV e con protoni e deutoni da 3 MeV, si è recentemente affiancata una modellistica sia sulle reazioni di fissione, sia sulla emissione di pre-equilibrio di particelle alfa dal nucleo atomico (quest'ultima confermata sperimentalmente), che ha

avuto ampia risonanza in campo internazionale. Questo filone di ricerca può trovare immediata applicabilità, ad esempio, nella determinazione delle sezioni d'urto di reazione e di altri parametri di processi nucleari tuttora poco noti, rilevanti ai fini del progetto di reattori veloci. Inoltre le competenze sperimentali sulle reazioni nucleari e le relative attrezzature possono essere vantaggiosamente sfruttate nel campo delle microanalisi.

Corredano queste competenze conoscenze particolari in settori specifici, quali ad esempio, nel campo teorico, la relatività e la gravitazione e, nel campo tecnologico, le tecniche del vuoto ultraspinto.

Fra le attività svolte totalmente o prevalentemente utilizzando competenze nel campo della

fisica, quelle principali sono descritte qui di seguito.

## 17.2. Messa a punto e gestione del tandem Van de Graaff

Questa attività, che comprende l'adeguamento delle attrezzature del Tandem ai programmi di utilizzazione, ha lo scopo di rendere disponibile uno strumento versatile per la sperimentazione che coinvolge l'interazione di fasci di particelle cariche accelerate con la materia, perciò in particolare per tecniche microanalitiche (fluorescenza X indotta da particelle cariche accelerate, microanalisi mediante reazioni nucleari, diffusione elastica di ioni), per applicazioni d'interesse per l'ingegneria nucleare avan-



Fig. 127 - L'acceleratore Tandem Van de Graaff, progettato e costruito interamente dal CISE, consente di ottenere fasci di protoni e deutoni da 7 MeV, e di ioni più pesanti, in particolare particelle  $\alpha$  e ioni ossigeno. Oltre che per misure di fisica di base, esso si presta per utilizzazioni nei campi della microanalisi, dell'ingegneria nucleare, della fisica dei materiali. La foto mostra l'interno del contenitore a pressione; si notano l'elettrodo ad alta tensione con le colonne di piatti equipotenziali e, al centro, il tubo acceleratore.

Fig. 128 - L'iniettore di ioni dell'acceleratore Tandem V.d.G., situato sopra il contenitore a pressione (v. fig. precedente). Si nota in particolare, alla sommità dell'iniettore, la sorgente Duoplasmatron di ioni negativi.

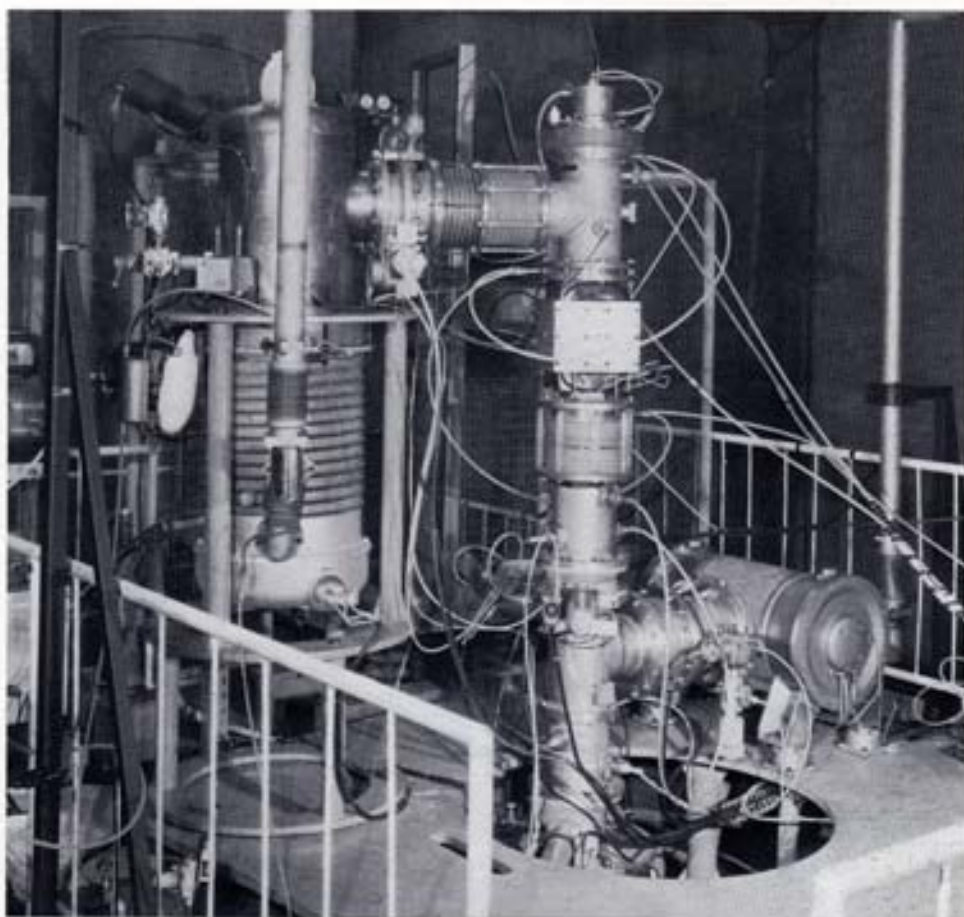
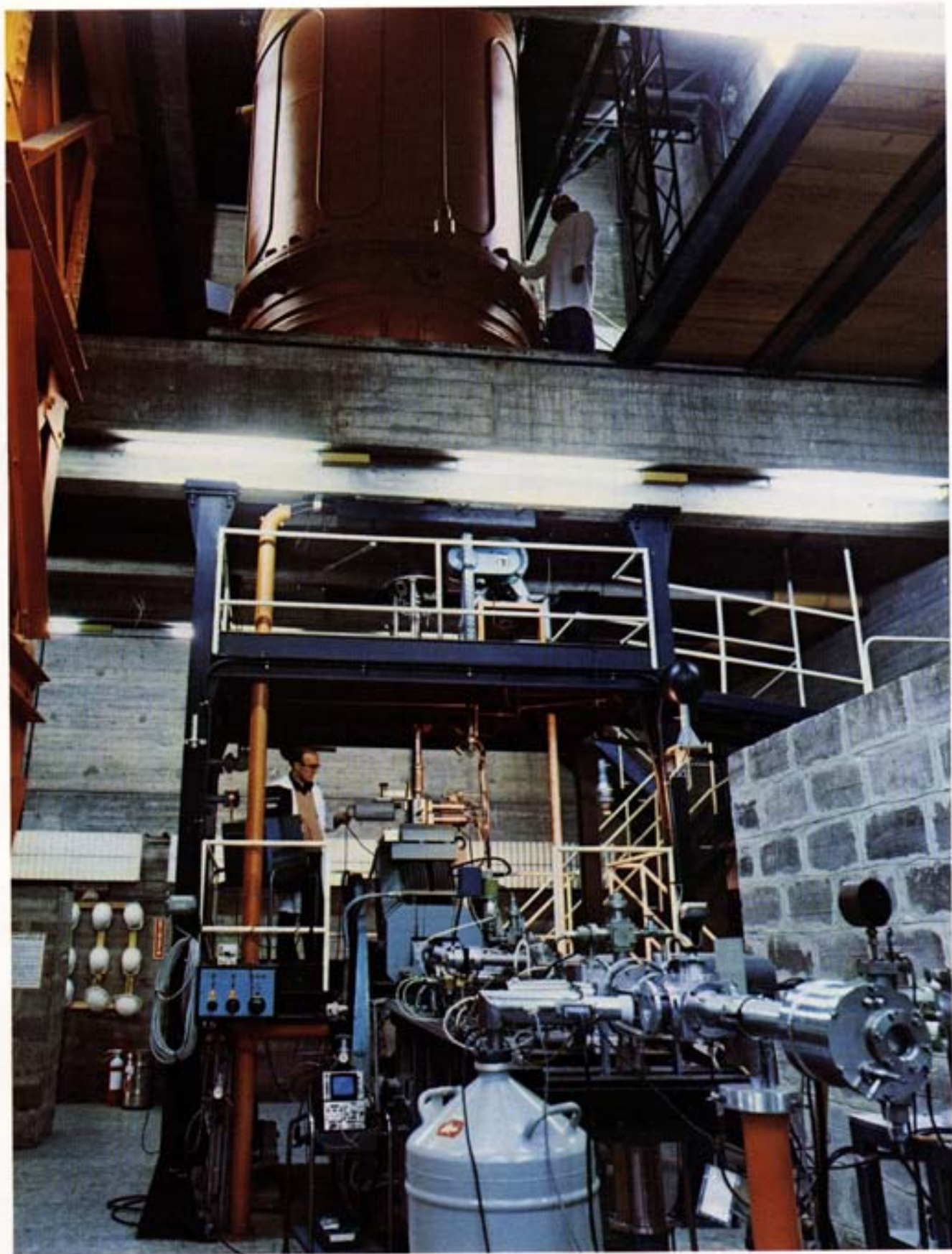


Fig. 129 - Evaporatore Airco-Temescal: una apparecchiatura commerciale altamente sofisticata per evaporare metalli e materiali refrattari, mediante bombardamento elettronico (il fascio ha la potenza di 8 kW), in condizioni di estrema purezza (vuoto limite,  $10^{-6}$  torr). Esso viene utilizzato per la deposizione di strati sottili su supporti eterogenei per applicazioni ottiche, elettroniche, elettroottiche e di fisica delle superfici e dello stato solido.







zata (simulazione del danneggiamento dei materiali da parte di altissime fluenze neutroniche, misura dei parametri delle reazioni (n, p) ai fini del progetto dei reattori veloci), e per tecniche interessanti la fisica dei materiali ed i processi produttivi di materiali e dispositivi (spettroscopia dell'interazione tra fascio e strato sottile, localizzazione di impurezze e difetti in cristalli mediante incanalamento o blocco di ioni) (v. figg. 130 e 131).

L'esigenza di strumenti di sperimentazione di questo tipo è dimostrata dal fiorire di iniziative consimili in Italia ed all'estero. L'attività del CISE in questo settore è svolta nella prospettiva di stabilire un coordinamento nell'ambito nazionale per l'utilizzazione di tali apparecchiature.

### 17.3. Materiali criogenici

È in funzione al CISE un laboratorio per basse temperature (elio liquido) per il rilievo delle caratteristiche elettriche di materiali superconduttori nuovi o poco noti (v. fig. 132). L'esercizio del laboratorio è affiancato da un notevole impegno teorico per individuare le cause del rumore elettronico che si riscontra nella misura della resistività residua in tali materiali, allo scopo di controllarlo. Tale programma, di interesse per l'ENEL, mira a mettere a punto le competenze per risolvere uno dei principali problemi che si presenteranno nel prossimo futuro in connessione con l'esercizio di centrali elettriche di potenza installata dell'ordine di diversi GW.

◀ Fig. 130 - Vista d'insieme dell'acceleratore Tandem V.d.G. (v. fig. 127). Si notano: in alto, la parte inferiore del contenitore a pressione; in basso, il canale d'uscita del fascio accelerato, il magnete di deflessione ed alcune camere di utilizzazione del fascio ai fini della sperimentazione.



Fig. 131 - La console di comando dell'acceleratore Tandem V.d.G. (v. fig. 127). Da sinistra a destra si notano: 1) il controllo delle apparecchiature di uscita del fascio accelerato (magneti e quadrupoli); 2) il controllo della strumentazione interna all'acceleratore; 3) il controllo dell'iniettore di ioni; 4) il controllo generale dell'impianto del vuoto e dei sistemi di sicurezza.



Fig. 132 - Criostato prototipo realizzato dalla Thor-Cryogenics (G. B.) in collaborazione col CISE. Esso viene utilizzato per lo studio del comportamento di materiali superconduttori nuovi o poco noti, a temperature tra 4 e 77 K e percorsi da correnti (8000 A). A destra del criostato si nota un microwattmetro sviluppato espressamente al CISE per la misura delle potenze dissipate da una bobina superconduttrice.



Fig. 133 - Sistema di acquisizione dati Hewlett Packard, utilizzato per misure di conducibilità e diffusività termica e per la taratura di sensori di temperatura. Esso è situato in una stanza a temperatura e umidità controllata per garantire condizioni uniformi e costanti di misura.

#### **17.4. Diffusività termica in solidi non omogenei e in solidi anisotropi**

L'uso di metodi matematici di discretizzazione consente precisioni prima irraggiungibili nelle verifiche di progetto di molti manufatti. Nel caso delle dighe, si prevede che ciò renda possibile un notevole risparmio nei pesi e perciò negli investimenti.

Tuttavia, la migliorata precisione dei calcoli rende insufficiente la precisione con la quale sono note le caratteristiche dei materiali. In particolare, risulta inadeguata la conoscenza della distribuzione del calore nel corpo della diga e del suo comportamento sotto sollecitazioni termiche, fondata sui dati sperimentali finora noti.

L'attività sperimentale, che sfrutta la tradizionale competenza del CISE sul più generale problema della diffusione allo stato solido, è volta a mettere a punto metodi di misura dei parametri termici (conducibilità e diffusività termica) del calcestruzzo, metodi adatti alle sue caratteristiche di solido isolante, non omogeneo, poroso ed umido.

Un problema analogo al precedente consiste nel rilievo delle caratteristiche termiche delle

rocce stratificate, ai fini della localizzazione e dello sfruttamento delle rocce calde esistenti nel sottosuolo, quale fonte ausiliaria di energia. Anche in questo caso, l'attività è diretta a mettere a punto un metodo e la strumentazione (v. fig. 133) necessari per il rilievo della conducibilità e diffusività termica di rocce stratificate e perciò altamente anisotrope. Queste attività vengono svolte nell'ambito di commesse ENEL.

#### **17.5. Teoria della risposta non lineare**

L'attività in questo settore è stata rivolta ad una generalizzazione del metodo di Volterra-Wiener (usato ad esempio ampiamente in teoria delle comunicazioni), in modo da estenderne l'applicazione a sistemi fortemente non lineari.

Il metodo è stato applicato allo studio del comportamento di un laser a singolo modo, di un laser a più modi interagenti e di un circuito RL con resistenza molto piccola e non lineare: sistemi per i quali il metodo Volterra-Wiener non generalizzato porterebbe ad una convergenza troppo lenta per essere utilizzata o addirittura ad una netta divergenza.

## APPENDICE - ELENCO DELLE PAROLE-CHIAVE

Si fornisce qui di seguito un elenco di parole-chiave, ossia di termini tecnici relativi agli argomenti più significativi trattati nei capitoli numerati di questo volume, con accanto specificato il relativo paragrafo.

Chi non è interessato alla lettura dell'intera trattazione ma solo a determinati argomenti o, comunque, chi desidera individuare determinati argomenti, potrà, nei casi in cui l'indice generale non sia esauriente a tal fine, ricorrere a questo elenco, ricercandovi per tentativi la o le parole-chiave presumibilmente usate nel caso che interessa, e da queste risalire al paragrafo in cui questo è trattato.

Acceleratore Tandem Van de Graaff (Messa a punto e gestione dell'-) (17.2)

Acceleratore Tandem Van de Graaff (Realizzazione dell'-) (17.1)

Acciai inox (Corrosione di -) (10.3)

Acciai inox (Morfologia di -) (10.1)

Acciaio inox (Giunti mandrinati -/Zircaloy-2) (10.6)

Acquisizione di dati (sperimentali) (1.5)

Acustica (Diagnosi - di rotture in componenti a pressione) (9.5)

Analisi numerica (2.1)

Analizzatori di forme d'onda impulsive (12.1)

Arseniuro di gallio (Monocristalli di -) (11.1)

Arseniuro di gallio e alluminio (Monocristalli di -) (11.1)

Attivazione neutronica (Analisi chimica per -) (15.2)

Automazione (di sistemi di strumenti) (1.3)

Barra Bifase (per regolazione e controllo del CIRENE) (5.7)

Best fitting (Curve di -) (2.2)

BETULLA (impianto sperimentale per lo studio degli effetti dello scoppio di tubi a pressione) (5.6)

Bifase (Fluidi termovettore - per reattori nucleari) (5.1)

Bifase (Fluidi termovettore - del CIRENE) (5.2)

Blow-down (svuotamento) (nel CIRENE) (5.3)

Calcolatori (in dotazione) (1.7)

Calcolatori (Utilizzazione dei -) (1.1)

Cambiamento di fase (Acqua in -, quale fluido termovettore per impianti nucleari) (5.1)

Caorso (Monitoraggio acustico del recipiente a pressione del reattore di -) (9.4)

CART-TC (impianto per prove in reattore del combustibile CIRENE) (7.2)

Celle solari (ad eterogiunzione arseniuro di gallio - arseniuro di gallio ed alluminio) (11.6)

Chimica analitica (Tecniche di -) (15.2)

CIRCE (impianto termoidraulico sperimentale) (5.5)

CIRENE (Reattore prototipo -) (5.2)

Classificatori di ampiezze di impulsi elettrici (12.1)

Combustibile (Caratteristiche del - CIRENE) (6.1)

Combustibile (Caratterizzazioni metrologiche di elementi di -) (7.3)

Combustibile (Comportamento del - CIRENE in condizioni di incidente) (6.3)

Combustibile (Modulazione di potenza degli elementi di -) (7.3)

Combustibile (Permutazione e sostituzione degli elementi di -) (7.3)

Combustibile (Prove fuori reattore sul - CIRENE) (6.3)

Combustibile (Prove in reattore sul - CIRENE) (6.2)

Combustibile (Regime vibrazionale del - CIRENE) (6.3)

Componenti ambientali (Caratterizzazione di -: fiumi, terreni, minerali e sedimenti) (16.4)

Contaminazione atmosferica (Misura a distanza della - mediante laser) (14.6)

Contaminazione chimica ambientale (16.2)

Contaminazione radioattiva ambientale (16.3)

Controlli non distruttivi in reattore (7.4)

Corrosione (di materiali metallici) (10.3)

Corrosione (di materiali metallici) (Impianti per studi di -) (10.3)

Corrosione (di rivestimenti metallici e dighe) (10.3)

DIC (dispositivo per controlli non distruttivi in reattore) (7.4)

Differenze finite (Metodo delle -) (2.2)

Diffusione di luce (scattering) da fluidi (attraversati da un fascio laser) (14.1)

- Diffusività termica (Determinazione della - dei calcstruzzi e delle rocce stratificate) (17.4)
- Diffrattonometria a raggi X (per indagini metallografiche) (10.1)
- Diffrattonometria X (per analisi chimica) (15.2)
- Diodi ad effetto Gunn (11.3)
- Dispositivi elettronici (Attrezzature per la costruzione di -) (11.7)
- Distanze topografiche e geodetiche (Misura di - con laser ad impulsi) (14.4)
- Elaborazione dei dati (Strumenti per l'-) (12.1)**
- Elementi finiti (Metodo degli -) (2.2)
- Elemento a fascio di barre (per la simulazione dell'elemento CIRENE) (5.6)
- Elettrocardiografo a 240 sonde (12.1)
- Elettronica quantistica (13.1)
- Elettronica (Strumentazione -) (12.1)
- Emettitori di radiazione incoerente (LED) (11.4)
- Emissione acustica (di campioni di materiali metallici sotto sforzo) (10.4)
- Emissione acustica (Rivelazione dell'- nei recipienti a pressione sotto prova ed in esercizio) (9.4)
- Epitattica (Crescita -) (di arseniuro di gallio, arseniuro di gallio ed alluminio, fosfuro di gallio) (11.1)
- Fibra ottica (Trasmissione di segnali in -) (12.2)**
- Fisica atomica (Competenze nel campo della -) (17.1)
- Fissione nucleare (4.1)
- Fluido termovettore (di un reattore nucleare) (5.1)
- Fosfuro di gallio (Monocristalli di -) (11.1)
- Frattura (Meccanica della - di campioni di materiali metallici) (10.4)
- Fretting corrosion (corrosione da sfregamento) (dovuta al regime vibrazionale dell'elemento di combustibile CIRENE) (6.3)
- Funzione di merito (Ottimizzazione della -) (2.2)
- Giunti mandrinati acciaio inox/Zircaloy-2 (Tecnologia di fabbricazione dei -) (per i canali del CIRENE) (10.6)**
- Guaine in Zircaloy (Deposizione di prodotti di corrosione sulle -) (6.3)
- Guaine in Zircaloy (Influenza del gradiente termico sul comportamento chimico-fisico delle -) (6.3)
- Guaine in Zircaloy (Interazione meccanica tra - e pastiglie di combustibile) (6.3)
- IDRA (impianto termoidraulico sperimentale) (5.5)**
- IETI-1 (impianto termoidraulico sperimentale) (5.5)**
- IETI-4 (impianto termoidraulico sperimentale) (5.5)**
- Impiantazione di ioni (11.5)
- Impianti termoidraulici sperimentali (5.5)
- Inquinanti (Determinazione della diffusione nell'ambiente di sostanze -, in particolare ioni metallici) (16.2)
- Inquinanti radioattivi  $\beta$  e  $\gamma$  (Determinazione della diffusione nell'ambiente di -) (16.3)
- Interferometria elettronica a luce diffusa (con metodi di speckle pattern) (per la misura di spostamenti e vibrazioni della superficie di un oggetto) (14.3)
- Interferometria olografica a doppia esposizione (per la misura di spostamenti e vibrazioni della superficie di un oggetto) (14.3)
- Interferometria su lunga distanza (con l'impiego dei laser) (per misure di distanze e spostamenti) (14.2)
- IRA (impianto per irraggiamento di combustibile per reattori ad acqua) (7.2)
- Irraggiamento (Impianti per - di combustibili e materiali) (7.2)
- Laser accordabili in frequenza nell'infrarosso (Sviluppo di -, in particolare a coloranti e a niobato di litio) (13.5)**
- Laser a coloranti (Sviluppo di -) (13.5)**
- Laser a gas (Sviluppo di -, in particolare ad elio-neo, ad argo, a cripto, a xeno, ad elio-cadmio, ad elio-selenio, a mercurio-xeno, ad anidride carbonica, ad azoto, ad acido fluoridrico) (13.4)**
- Laser a raggi X (Studio di fattibilità di un -) (13.5)**
- Laser a semiconduttore (11.4)**
- Laser a stato solido (Sviluppo di -, in particolare a rubino, a neodimio in granato di ittrio ed alluminio) (13.5)**
- Laser di potenza ad anidride carbonica (Sviluppo di -) (per impiego in lavorazioni meccaniche) (13.4)**
- Laser oscillatori parametrici (Sviluppo di - a niobato di litio) (13.5)**
- Laser (Proprietà statistiche del campo e.m. emesso da un -) (13.2)**
- Laser (Sviluppo di sorgenti -) (13.3)**
- LED (emettitori di radiazione incoerente) (11.4)**
- LOCA (Loss-Of-Coolant-Accident) (incidente di perdita di refrigerante) (6.3)**
- Materiali metallici avanzati (a composizione eutettica, ad es. leghe nichel-tantalio-cromo) (10.2)**
- Materiali metallici (Morfologia dei -) (10.1)**
- Materiali superconduttori (Rilievo delle caratteristiche elettriche dei -) (17.3)**

- Tellururo di piombo e stagno (Monocristalli di -) (11.1)
- Termoidraulica (Generalità sulla - di un impianto nucleare) (5.1)
- Termoidraulica (Esperienze di - relative al CIRENE) (5.2)
- Traccianti radioattivi (Tecniche dei -) (15.4)
- Transistori ad effetto di campo ad arseniuro di gallio (MESFET) (11.3)
- Trasduttori (di spostamento, di inflessione, di accelerazione e di pressione) (per misure in reattore) (6.4)
- Trino Vercellese (Sorveglianza vibrazionale ed acustica del reattore di -) (9.4)
- Tubi a pressione in Zircaloy-2 (Caratterizzazione dei -) (9.5)
- Tubi di isolamento in Zircaloy-2 (Caratterizzazione dei -) (10.5)
- Tubi per regolazione ed arresto rapido in Zircaloy-2 (per il CIRENE) (Caratterizzazione dei -) (10.5)
- UMOR (dispositivo per controlli non distruttivi in reattore) (7.4)
- Uranio (Morfologia di ossidi di - sinterizzati) (10.1)
- Valvola rapida (per sperimentazione termoidraulica) (5.6)
- Velocimetria Doppler (Tecniche di -, per la misura di spostamenti e vibrazioni in strutture di grandi dimensioni) (14.2)
- Vibrazioni meccaniche (di macchine rotanti, ad es. turboalternatori) (9.3)
- Vibrazioni meccaniche (di strutture statiche, ad es. noccioli dei reattori) (9.3)
- Visibilità attraverso la nebbia (Strumento per il miglioramento della -) (12.2)
- Zircaloy-2 (Corrosione dello -) (10.3)
- Zircaloy-2 (Giunti mandrinati acciaio inox/-) (10.6)
- Zircaloy-2 (Guaine in -) (6.3)
- Zircaloy-2 (Infragilimento dello -) (10.1)
- Zircaloy-2 (Morfologia dello -) (10.1)
- Zircaloy-2 (Tubi a pressione, di isolamento, per regolazione ed arresto rapido del CIRENE in -) (10.5)