



# METALLICHE

# COSTRUZIONI

RIVISTA BIMESTRALE  
DEI TECNICI  
DELL'ACCIAIO

numero 4 anno XLIV  
LUGLIO-AGOSTO 1992  
ISSN: 0010-9673

Post - C:\PROGIARCO

Sez xy    Sez x-z    Sez y-z    Sez 3-P    Box 3-D    Ric. Geo.    Ridiseg.    Archivio

N Max 2282.58    N Min -2319.58

InfoPad - [Info]

File Edit Tools Window

Sommatoria squilibri solaio : 0

	Ass. Pilastri	Ass. Setti	Totale
Fx	-0.7	0.0	-0.7
Fy	0.3	0.0	0.3
Fz	277316.4	0.0	277316.4
Mx	0.0	0.0	0.0

En.Ex.Sys. - View Point

210    331

50    OK    Cancel

En.Ex.Sys. - PostProcessor - Settings

Fattori di Scala

Deformate	500.0000
Travi-Pil.	0.001000
Tr. Fondazione	0.001000
Setti	0.001000
El. Equiv.	0.001000

Comb. Carico

1    Colors    Fonts    OK    Cancel

X-Y    X-Z    Y-Z    Ass.X-Z    Ass.Y-Z    Prospettiva    Pt Vista    Stop

Tools

Info Line

Settings

Off Comando

Comando

Stop

UN SISTEMA SOFTWARE INTERATTIVO GRAFICO  
INDIRIZZATO ALLA PROGETTAZIONE ED ANALISI  
DI MODELLI STRUTTURALI

A GRAPHIC INTERACTIVE SOFTWARE FOR  
STRUCTURAL MODELING ANALYSIS AND DESIGN

M. Majowiecki, R. Trevisan

## Un sistema software interattivo grafico indirizzato alla progettazione ed analisi di modelli strutturali

M. Majowiecki, R. Trevisan

Dopo una breve introduzione storica sullo stato dell'arte, vengono illustrate le principali caratteristiche di un nuovo sistema di programmi interattivi grafici dedicati alla modellazione di sistemi strutturali propri dell'ingegneria civile. Il sistema nominato STRAND (STructural ANalysis & Design), scritto completamente in linguaggio C, è stato strutturato secondo la tecnologia applicativa CAD. Mediante un nuovo «linguaggio interattivo grafico» è possibile elaborare i dati ed esaminare i risultati in modo da minimizzare gli errori del processo di progettazione ed analisi strutturale e, conseguentemente, aumentare l'affidabilità del sistema hardware-software-user.

### L'IMPOSTAZIONE UNITARIA DELLE TEORIE DELLA MECCANICA STRUTTURALE E L'ANALISI AUTOMATICA

A partire dagli anni '50-'60 la metodologia progettuale dell'ingegnere strutturista è stata notevolmente influenzata da due importanti avvenimenti: l'impostazione unitaria delle diverse teorie della meccanica strutturale e l'introduzione degli elaboratori elettronici accompagnati dai linguaggi simbolici, matriciali e dei metodi agli elementi finiti. Nei classici trattati sulla storia della scienza e tecnica delle costruzioni [1, 2] del 1886 e 1953, rispettivamente, non si accennava ancora ad una possibilità di sintesi delle teorie relative alla meccanica dei corpi elastici in modo da poter contare su metodi generali che evitassero di dover affrontare ogni problema a sé stante (metodi approssimati di calcolo). In [3, 5] del 1977, 1979 e 1981 rispettivamente, si fa già ampio cenno al «delineamento di un'unica struttura concettuale che enuclea l'energia, l'equilibrio, la congruenza, il legame costitutivo del materiale, come i concetti base su cui sviluppare ogni teoria». È interessante notare che, osservando lo sviluppo storico della scienza delle costruzioni, il processo di sintesi unitaria delle diverse teorie della meccanica dei corpi elastici, ottenuta solo nell'ultima metà di questo secolo, a merito principalmente dei metodi energetici, era già possibile molto prima, giacché i procedimenti risolutivi hanno conservato l'impianto generale che gli scienziati dell'Ottocento avevano già compiutamente immaginato: infatti, il modello fisico è rimasto invariato dal tempo di Cauchy (1828); il metodo delle forze impostato da Navier (1826) fu definitivamente sviluppato da Maxwell (1864), Müller-Breslau (1886) e O. Mohr (1892); il metodo dell'equilibrio viene applicato da

Prof. dr. ing. Massimo Majowiecki - Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Università di Bologna.

Dr. ing. Roberto Trevisan - Enexsys, Bologna.

## A graphic interactive software for structural modeling analysis and design

After a brief historical introduction on the state of the art, the main features of a new package dedicated to civil structural modelling are illustrated. The package, named STRAND (STructural ANalysis & Design), written in C language, is organized in accordance with CAD technology. With a WYSIWYG interface it is possible to manage data in order to minimize the errors in the design process and increase the reliability of the User-Software-Hardware system.

### THE UNITARY DEFINITION OF THE THEORIES OF STRUCTURAL MECHANICS AND AUTOMATIC ANALYSIS

Starting from the 50's and the 60's, project methodology in the structural engineering field has been considerably influenced by two important events: the unitary definition of the different theories regarding structural mechanics and the introduction of electronic processors, accompanied by symbolic and matrix language and finite element methods. In the classic treatises on the history of construction science and technique [1, 2] in 1886 and 1953 respectively, no mention was yet made of the possibility of synthesizing the theories relative to the mechanics of elastic bodies in such a way as to be able to count on general methods, thus avoiding having to face each single problem (approximate calculation methods). In [3, 5] of 1977, 1979 and 1981 respectively, wide mention was already made of the «delineation of a unique conceptual structure that enucleates energy, equilibrium, compatibility, and the constitutive laws of materials as the basis concepts on which to develop all theories». When we observe the historical development of the science of construction, it is interesting to note that the process of unitary synthesis of the various theories of the mechanics of elastic bodies, obtained only during the second half of this century and due principally to the energy methods, was possible much earlier, since the resolutive procedures have conserved the general system that the scientists of the 19th century had already completed by imagined: in fact, the physical model has remained unchanged since the time of Cauchy (1828); the method of the forces defined by Navier (1826) was definitive by developed by Maxwell (1864), Müller-Breslau (1866) and O. Mohr (1892); the displace-

Prof. dr. ing. Massimo Majowiecki - Department of Structural Engineering, University of Bologna.

Dr. ing. Roberto Trevisan - Enexsys, Bologna.

In copertina: Analisi interattiva dei risultati sullo stato deformativo della struttura metallica spaziale di copertura del Palazzo dello Sport di Pesaro.

Cover : Interactive post-processing of the deformative state of the steel framed arch for the covering of the Pesaro new Sport Hall.

A. Clebsh (1862) su problemi particolari e la sua grande potenzialità viene riscoperta, dopo circa novant'anni dalla segnalazione di Navier e dopo venti dalla nota di Mohr, da A. Bendixen (1914) e A. Ostfeld (1926), i quali introdussero il metodo dell'equilibrio nella pratica corrente degli ingegneri; i metodi basati su valutazioni di carattere energetico che, per loro comune fondamento vengono di solito detti «del lavoro di deformazione», sono apparsi con Menabrea (1875), Castigliano (1873) e Maxwell (1864).

La causa del ritardo di più di mezzo secolo, nell'impostazione teorica unitaria, è imputabile alla mancanza degli elementi di analisi del linguaggio simbolico e del calcolo automatico, indispensabili per permettere la risoluzione di numerose equazioni lineari. L'ingegnere, che in questo periodo disponeva dei metodi di determinanti di Leibnitz (1678) e Cramer (1750) e del metodo iterativo di Seidel (1874), basato sul metodo di eliminazione di Gauss (1810), è indotto all'impiego di schemi strutturali semplificati più semplici di quelli che la teoria disponibile gli avrebbe permesso di risolvere, in modo da diminuire il numero delle incognite e rendere il problema risolvibile per via manuale. Nascono in questo periodo i «metodi approssimati di calcolo» quali procedimenti escogitati per risparmiare tempo nell'esecuzione manuale dei calcoli. I metodi di H. Cross, Kani (1930) e di Grinter (1937), basati sulle «slope-deflection equations» di Bendixen, sono tipici esempi di metodi approssimati di calcolo manuale.

Lo sviluppo dei metodi approssimati di calcolo è stato permesso dalla possibilità di risolvere, per via iterativa, il problema numerico associato al problema fisico.

Nel caso del metodo di Cross, il notevole successo avuto nella pratica corrente dell'ingegnere strutturale fino all'avvento degli elaboratori elettronici è dovuto all'identificazione della tecnica di rilassamento per fasi successive con la risoluzione di un sistema di equazioni per via iterativa. Questi procedimenti di calcolo numerico, associati ai problemi strutturali, hanno la massima espressione con R.V. Southwell (1946).

Il ricongiungimento con quanto predisposto nell'Ottocento e l'impostazione unitaria delle diverse teorie è stata tuttavia una conquista laboriosa consentita, oltre che dall'apporto sempre più massiccio del linguaggio simbolico, soprattutto dalle enormi capacità degli elaboratori, avvalendosi del linguaggio matriciale e dei metodi di discretizzazione, specialmente quello agli elementi finiti.

Lo sviluppo dell'analisi numerica del metodo degli elementi finiti e del calcolo automatico permette la scrittura di programmi di analisi strutturale generale, dove le differenze tra uno schema strutturale ed un altro si registreranno soltanto nei risultati, ma non nei metodi per affrontare l'esame.

Siamo nell'era della «metamorfosi del linguaggio», come viene denominata da E. Benvenuto nella sua recente storia della scienza delle costruzioni, dove il linguaggio simbolico e il formalismo matematico hanno attraversato la meccanica delle strutture per tradurla a servizio del calcolo automatico. È così mutata la «mentalità», alle radici dell'empirismo scientifico.

J.T. Oden e K.J. Bathe [6] ravvisano in questa svolta l'inizio di «un'era di empirismo computazionale». In un loro interessante articolo si legge: «La comunità degli ingegneri di 20 anni fa era consapevole che l'uso dei metodi analitici classici offriva limitatissimi strumenti per lo stu-

ment methods is applied by A. Clebsh (1862) to particular problems and its great potential was rediscovered after about ninety years from Navier's indication and twenty years from Mohr's note, by A. Bendixen (1914) and A. Ostfeld (1926), who introduced the displacement method in common engineering practices; the methods based on evaluations of an energy which, due to their common foundation, are usually said to pertain to «deformation work», appeared with Menabrea (1875), Castigliano (1873) and Maxwell (1864).

The cause for this half century delay of the unitary theory definition can be attributed to the lack of numerical analysis procedures, symbolic language and automatic calculation necessary for the solution of numerous linear equations. The engineer who, during this period had at his disposal the determinant methods of Leibnitz (1678) and Cramer (1750) and the iterative method of Seidel (1874), based on the elimination method by Gauss (1810), was forced to use methods which are more simple than those which the available theory would have allowed him to solve, in such a manner as to reduce the number of unknowns and succeed in solving the problem manually.

In this period the «approximate calculation methods» were founded. These are procedures devised to save time in the manual execution of calculations. The method developed by H. Cross, Kani (1930) and Grinter (1937), based on the «slope-deflection equations» by Bendixen, are typical examples of approximate manual calculation methods.

The development of approximate calculation methods was allowed by the possibility of solving the numeric problem associated with the physical problem by iterative means. In the case the Cross method, the considerable success obtained in the common practice of structural engineering up to the arrival of the electronic processor, is due to the identification of the relaxation technique for later phases with the resolution of an equation system by iterative means. The association of these numerical calculation procedures with structural problems has its maximum expression with R.V. Southwell (1946).

The reconjunction with that which was predisposed in the 19th century and the unitary determination of the different theories was, however, a difficult conquest which was made possible both by the increasingly massive contribution of symbolic language and above all by the enormous capacities of the computers, which made use of matrix language and discrete methods, especially with regard to finite elements.

The development of the numerical analysis of finite elements and automatic calculation makes it possible to write programs for general structural analysis, where the differences between one structural diagram and another are only recorded in the results, but not in the methods used to approach the test.

We are in the era of «language metamorphosis», as E. Benvenuto called it in his recent history of the science of construction, where symbolic language and mathematical formalism have gone beyond the mechanics of the structures in order to translate this into a service for automatic calculation. The «mentality» at the basis of scientific empiricism is thus modified.

J.T. Oden and K.J. Bathe [6] place this change at the beginning of «an area of computational empiricism». In an interesting article by them, we read: «The community of Engineers 20 years ago was aware that the use of classical analytical methods offered very few instruments for the stu-

dio del comportamento meccanico e, conseguentemente era necessario che l'ingegnere arricchisse le sue analisi con il soccorso di molto giudizio e intuizione accumulati in molti anni di esperienza. L'empirismo giocava un grande ruolo nella progettazione; benché fossero disponibili alcune teorie generali, i metodi per applicarle erano ancora in fase di sviluppo ed era inevitabile ricadere in schemi approssimati e far appello a indicazioni provenienti da numerose prove e conferme. Oggi è diffusa l'opinione che l'avvento del calcolo automatico abbia posto fine a tale epoca semiempirica dell'ingegneria: ormai, possono essere costruiti modelli matematici raffinati su alcuni dei più complessi fenomeni fisici e, se la potenza del calcolatore è sufficiente, si possono produrre risultati numerici credibili sulla risposta del sistema esaminato».

Questi avvenimenti hanno reso di colpo vecchi e superati la maggior parte dei tradizionali metodi approssimati di calcolo, permettendo di esaminare schemi teorici più rigorosi per mezzo di potenti strumenti di calcolo in tempi incommensurabilmente minori evitando, da un lato, che eccessive semplificazioni rendano il modello teorico, quale riduzione schematica della realtà costruttiva non più significativo e, dall'altro, che calcoli estenuanti facciano perdere di vista fatti veramente influenti tendendo a far diminuire gli sforzi del progettista di saggiare diverse soluzioni strutturali.

I vantaggi offerti dagli elaboratori elettronici possono, d'altro canto, creare un'esaltazione incontrollata del calcolo automatico e dare l'illusione che l'uomo venga superato dalla macchina e la logica dell'automatismo.

A questo punto assistiamo ad una inversione di tendenza nella velocità di sviluppo della scienza e delle tecnologie associative. Quando la tecnologia presenta un'alta velocità di sviluppo, la storia della scienza lo insegna, si cominciano a intravedere periodi di «pollution tecnologica» e si rende, pertanto, necessario un controllo del processo.

#### IL LINGUAGGIO INTERATTIVO GRAFICO QUALE MEZZO DI CONTROLLO DEL PROCESSO DI PROGETTAZIONE ED ANALISI STRUTTURALE

Alcuni organi internazionali quali lo IABSE hanno previsto speciali gruppi di lavoro e commissioni [7, 8, 9] per il controllo dello sviluppo dell'automazione.

In Italia, recentemente, una commissione del C.N.R. per le norme sulle costruzioni in acciaio, CA/CAP, ha elaborato una bozza di normativa relativa all'«analisi di strutture mediante elaboratore: impostazione e redazione delle relazioni di calcolo (C.N.R.-UNI 10024, 16/10/1986).

Preoccupazione comune delle due commissioni è il grado di affidabilità dei codici di calcolo.

Si richiede una valutazione del grado di affidabilità del programma di calcolo sulla base:

«— dell'esistenza di una documentazione esauriente sulle premesse teoriche, sulla impostazione generale e sui limiti di applicabilità del codice;

— di controlli e riscontri con soluzioni note o con risultati ottenuti con procedimenti indipendenti;

— della presenza nel codice di un'autodiagnostica atta a segnalare eventuali incompatibilità nei dati e difficoltà numeriche in fase di elaborazione;

— della capacità del codice di fornire sintetiche rappresentazioni dei risultati salienti, anche intermedi, per consentire un rapido controllo dell'output»

assicurando inoltre:

dy of mechanical behaviour and, consequently, it was necessary for engineering to enrich its analyses with the help of the considerable wisdom and intuition accumulated through the years. Empiricism played a significant role in planning; although some general theories were available, the methods for applying them were still in a developing phase and it was inevitable to fall into approximate designs and appeal to indications coming from numerous trials and confirmations. Today, it is a widespread opinion that the coming of automatic calculation put an end to this semi-empiric epoch of engineering: nowadays, refined mathematical models can be constructed on the basis of some of the most complex physical phenomena and, if the computer is powerful enough, reliable numerical results can be produced on the basis of the response of the system examined. These events suddenly outdated and surpassed most of the traditional approximate methods of calculation, making it possible to examine more rigorous theoretical schemes by means of powerful calculation instruments very much more rapidly while avoiding, on the one hand, excessive simplifications that deprive the theoretical model which is a schematic reduction of the real situation — of all significance and, on the other, exhausting calculations that lead to the loss of facts with a true influence, with the consequent discouragement of the designer from making efforts towards trying out different structural solutions.

The advantages offered by computers calculator can, on the one hand, create the uncontrolled escalation of automatic calculation and give the illusion that man has been replaced by the automatic machines and by the logic of automatism. At this point, we are dealing with a tendency towards reversal in the development speed of science and the associated technology. When technology shows a high speed of development, the history of science teaches this and periods of «technological pollution» appear, thus making it necessary to control the process.

#### INTERACTIVE GRAPHIC LANGUAGE AS A CONTROL SYSTEM OF THE DESIGN PROCESS AND STRUCTURAL ANALYSIS

Some international organizations such as the IABSE have set up special workshop groups and commissions [7, 8, 9] for the control of the development of automation.

Recently in Italy, a commission of the C.N.R. for the regulation of steel construction drew up a normative draft relative to «Computer Aided Structural Analysis: definition and writing-up of technical reports (C.N.R.-UNI 10024, 16/10/86)».

The preoccupation of the two commissions is the level of reliability of the analysis codes. An assessment on the reliability level of the software code is required on the basis of:

— the existence of a thorough documentation on the theoretical premises, the general definition and applicable limits of the code;

— controls and comparisons with known solutions or results obtained with independent procedures;

— the presence in the code of self-diagnostics aimed towards signalling any incompatibilities in data and numerical difficulties during the processing phase;

— the capacities of the code to supply summaries of the important results, including the intermediate ones for fast output control

also guaranteeing:

- una unificazione formale nella presentazione delle relazioni;
- una sufficiente leggibilità;
- la ripetibilità dell'elaborazione da parte di terzi;
- la sussistenza di una adeguata documentazione teorica del codice di calcolo.

Il progettista delle strutture resta, giuridicamente «unico responsabile dell'intera relazione di calcolo» e, pertanto, è suo interesse e diritto-dovere di ottenere una sufficiente informazione e controllo del codice di calcolo in modo da potere motivare la scelta del codice «dichiarando la compatibilità del modello matematico in esso previsto con le scelte di modellazione strutturale».

Molte volte si è potuto osservare, infatti, che la modellazione strutturale sia stata condizionata più in funzione della capacità della macchina che delle reali necessità di analisi. A questo scopo, è importante che i codici di calcolo descrivano dettagliatamente:

- la modellazione matematica elementare, generale e/o indirizzata per tipologie strutturali (schemi strutturali);
- la modellazione dei vincoli;
- la modellazione delle azioni;
- la modellazione dei materiali;
- il metodo e tipo di analisi;
- l'elaborazione dei risultati;

in modo da proteggere l'utente dalla costrizione di accettare risultati di cui non facilmente può effettuare controlli, abituandosi spesso a considerare inappellabili i risultati e, contemporaneamente, ad obbligarlo ad un'analisi critica dei risultati.

Per evitare una sotto/sopra-valutazione del problema, è necessario ricercare, nello stato attuale dello sviluppo scientifico-tecnologico, un equilibrato rapporto uomo-macchina in modo da permettere un «dialogo» di mutuo controllo. È possibile ottenere un rapporto equilibrato modificando opportunamente i «linguaggi simbolici» di «comunicazione» tra uomo ed elaboratore elettronico in modo che questo linguaggio sia il più prossimo possibile a quello naturale dell'uomo-progettista. Tutto ciò che può essere ottenuto, come vedremo, con il «linguaggio interattivo grafico», indirizzato all'analisi automatica delle strutture.

Il linguaggio interattivo grafico è reso possibile da opportuni interfaccia hardware e software.

#### TECNICHE INTERATTIVE NELLA PROGETTAZIONE STRUTTURALE

Nell'attuale situazione di sviluppo di sofisticate macchine automatiche e di generali programmi di calcolo strutturale, il rapporto ottimale tra uomo e macchina sembra essere raggiunto mediante le moderne tecniche di «interazione» tra progettista ed elaboratore elettronico che, nel campo dell'applicazione che ci interessa, sono definite da varie sigle sempre più conosciute quali: CG (computer graphics); CAD (computer aided design); CAAD (computer aided architectural design); CASD (computer aided structural design); CAM (computer aided structural manufacturing).

La tecnica interattiva tra uomo e macchina mette in rilievo i contributi più salienti delle parti permettendo di raggiungere simultaneamente i seguenti obiettivi:

- ottimo rapporto per la fase di ANALISI (operazione affidata alla macchina utilizzandone la potenza, capacità e velocità nel calcolo automatico delle strutture);

- uniformity in the presentation of the reports;
- clearly legible documents;
- processes that can be repeated by third parties;
- the maintenance of suitable theoretical documentation of the calculation code.

The designer of the structures has sole legal responsibility for the entire structural analysis and, therefore, it is in his interests and rights/duty to obtain sufficient information and control of the calculation code in order to be able to motivate the choice of the code by «declaring the compatibility of the mathematical model included in it with the choices of structural modelling».

It has, in fact, often been observed that structural modelling has been conditioned more in line with the capacity of the machine than the real analytical necessities. For this purpose, it is important that the calculation codes describe in detail:

- the elementary mathematical modelling, whether general or directed towards structural types (structural schemes);
- the modeling of boundaries;
- the modeling of actions;
- the modeling of materials;
- the method and type of analysis;
- the processing of the results;

in order to protect the user from being forced to accept results that cannot easily be checked, often with no choice, but to accept the results and, at the same time, obliging him to make a critical analysis of the results.

In order to avoid an under/over estimate of the problem, it is necessary, in the current state of scientific-technological development, to look for, a balanced man-machine relationship in order to permit a «dialogue» of mutual control. It is possible to obtain a balanced relationship by suitably modifying the «symbolic communication language» between man and the electronic computer in such a way that this language will be as close as possible to the natural language of man-designer. All this can be obtained, as we will see, with the «interactive graphics language», aimed at the automatic analysis of the structures.

Interactive graphic language is made possible by appropriate hardware and software interfacing.

#### INTERACTIVE TECHNIQUES IN STRUCTURAL DESIGNING

In the present situation, with the development of sophisticated automatic machinery and general structural analysis programs, the optimal relationship between man and machine seems to be achieved by means of modern techniques of «interaction» which, in the field of application that interests us, are defined by various abbreviations that are increasingly familiar such as: CG (computer graphics); CAD (computer aided design); CAAD (computer aided architectural design); CASD (computer aided structural design); CAM (computer aided manufacturing).

The interactive technique between man and machine emphasizes the more important contributions of the parties by permitting them to simultaneously fulfill the following objectives:

- optimal relationship for the ANALYSIS phase (an operation assigned to the machine by using its power, capacity and speed in the automatic calculation of the structures);

- ottimo rapporto per la fase di SINTESI (operazione affidata all'uomo responsabile del controllo della validità dei dati, della critica dei risultati e degli ordini di grandezza, ottenibili, questi ultimi, mediante la non sostitutiva ma integrativa validità dei menzionati metodi di calcolo approssimati).

Le tecniche di comunicazione interattive grafiche (IG) ottenute mediante opportuni interfaccia hardware + software permettono di attivare un ciclo progettuale assistito da elaboratore (CAD) indirizzato agli aspetti strutturali.

L'assistenza è da integrarsi nei seguenti termini:

- la metodologia progettuale interattiva non è sostitutiva ma integrativa degli aspetti creativi del processo progettuale tradizionale che restano necessariamente e giustamente demandati agli operatori progettuali. Per mezzo dell'interazione l'elaboratore elettronico diventa l'utile prolungamento mentale ed operativo del progettista, aumentandone notevolmente la capacità, velocità e qualità decisionali;

- gli strumenti si assumono tutti i compiti di routine (operazioni di calcolo, disegno, di archiviazione, di parametrizzazione, ecc.) che operano sul processo progettuale permettendo all'operatore di essere sollevato da pesanti oneri computazionali e ponendolo al centro del processo di sintesi progettuale;

- la comunicazione-operatore macchina avviene in «tempi reali» per mezzo dei terminali interattivi (interfaccia hardware) e del linguaggio interattivo (interfaccia software): generazione dei dati, correzioni, modifiche, controllo di processo, verifiche, disegni, ecc., avvengono in tempi confrontabili con quelli dell'elaborazione mentale dell'operatore, che, di conseguenza, può procedere con continuità operativa;

- la grande potenzialità operativa in fase analitica dell'elaboratore consente di attivare una sequenza di ottimizzazione progettuale per via interattiva come conseguenza logica del ciclo interattivo di progetto, che permette con estrema facilità e rapidità di modificare i dati e saggiarne le conseguenze mediante successive, iterative verifiche secondo la classica procedura di tentativo, verifica e correzione progettuale fondata sull'esperienza del progettista, il quale ha la capacità di sintetizzare una notevole massa di dati difficilmente esprimibile come problema matematico.

Ciò è possibile costruendo un'apposita interfaccia fra elaboratore ed operatore (fig. 1) che si interponga, in questo caso, fra l'ingegnere ed il programma strutturale installato sull'elaboratore e che abbia praticamente il compito di «tradurre» i messaggi scambiati dalle parti.

L'interfaccia sarà logicamente/fisicamente costituita da tre moduli distinti:

- strumentazione hardware, ovvero le periferiche che costituiscono il legame fisico tra operatore ed elaboratore;
- software di base e procedure operative per il migliore sfruttamento delle capacità di questa strumentazione;
- pre-processor e post-processor, cioè routine di pre-elaborazione dei dati per adattarli all'input richiesto dal programma di calcolo e di post-elaborazione dei risultati per adattarli alle esigenze del singolo tipo di operatore.

Fra interfaccia e programma di calcolo vero e proprio occorrerà poi disporre di un ulteriore filtro costituito da una procedura di smistamento delle direttive decise dall'operatore e dei messaggi inviati dall'elaboratore.

- optimal relationship for the SYNTHESIS phase (an operation assigned to the man responsible for the control of the data validity, the criticism of the results and the order of magnitude, the latter by means of the non-substitutive but integrative validity of the approximate calculation methods) we have already mentioned.

The graphic interactive communication techniques (IG) obtained through suitable hardware and software interfacing, permit the activation of a design cycle aided by a computer (CAD) and geared towards structural aspects.

The assistance can be summed up in the following terms:

- the interactive design methodology is not substitutive but rather integrates the creative aspects of the traditional design process which remain necessary and which are rightly required from the design operators. By means of interaction, the electronic computer becomes the useful mental and operating extension of the designer, while considerably increasing his capacity, speed and decision-making abilities;

- the instruments deal with all the routine tasks (calculation operations, storage, plotting, parameterization, etc.) which involve the design process, while relieving the operator from heavy computation tasks and putting him at the centre of the design synthesis process;

- the operator-machine communication occurs in «real time» by means of interactive terminals (hardware interfacing) and interactive language (software interfacing): data generation, corrections, modifications, process control, verifications, designs, etc., occur at speeds that are comparable to that of the mental processes of the operator, who can consequently proceed with operative continuity;

- the high operating potential during the analytical phase allows design optimization as a logical consequence of the interactive design sequence, permitting the modification of data with extreme ease and speed and the testing of the consequences through successive, interactive checks in accordance with the classical procedure of trial and error based on the experience of the designer, who is able to synthesize a considerable mass of data that is difficult to express as a mathematical problem.

This is possible by the construction of a special interface between the computer and the operator (fig. 1) which in this case is set between, the engineer and the structural program created in the computer and which in practice «translates» the messages exchanged between the two parties. The interface will be logically/physically composed of three distinct modules:

- peripheral hardware equipment forming a physical link between the operator and the computer;
- basic software and operative procedures for the best possible performance of the capacities of this equipment;
- pre-processor and post-processor, i.e. pre-processing routine of the data in order to adapt these to the input required by the calculation program and post-processing program of the results in order to adapt these to the requirements of each individual type of operator.

Between the interface and the actual calculation program, it will be necessary to introduce an additional filter for the sorting procedure of the instructions decided on by the operator and the messages sent from the computer.

Occorre però aggiungere che se si lascia all'operatore la possibilità di indirizzare l'elaborazione, sarà necessario fornirgli tutte le informazioni atte ad evitargli possibili errori e capaci di aiutarlo nella scelta, tenendo sempre presente il tipo di operatore che interagisce con la macchina, il quale, di norma, non conosce la struttura logica del programma in esecuzione.

L'operatore dovrà quindi sapere quali sono le direttive che può impartire in ogni momento al programma, tenendo presente l'ultimo comando eseguito. In tal modo potrà non solo pilotare l'esecuzione vera e propria del programma, ma anche richiedere una serie di controlli sui dati di input o sui risultati parziali o finali dell'elaborazione.

Ecco quindi che la struttura del filtro si evidenzia come una entità logica che essenzialmente compie le operazioni illustrate in fig. 2.

However should add that if the operator is left with the possibility of directing the computer, he must be supplied with all the information necessary to avoid possible errors and assist him in his choices, while always bearing in mind the type of operator who is interacting with the machine, and who is usually unfamiliar with the logical structure of the program being used.

The operator must therefore know what instructions he can give to the program at any particular time, while bearing in mind the last command issued. In this way, he will be able not only to drive the actual performance of the program, but will also be able to request a series of controls on the input data or the partial or final computer results.

This is how the structure of the «filter» stands out as a logical entity which essentially carries out the operations shown in fig. 2.

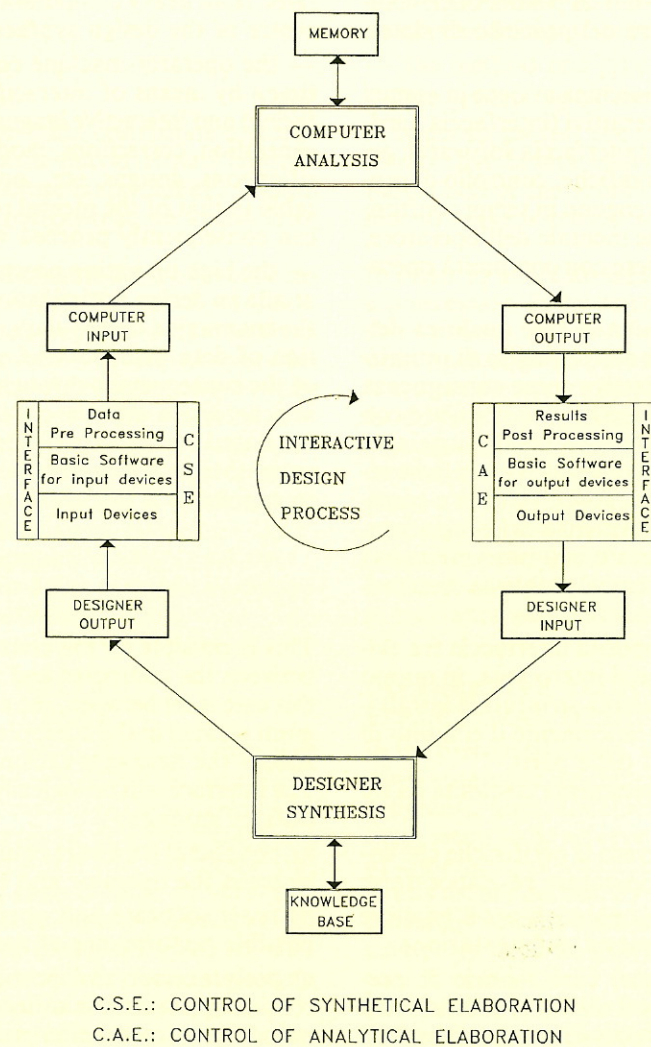


Fig. 1 - Ciclo interattivo di progetto.

Fig. 1 - Interactive design process.

**IL LINGUAGGIO INTERATTIVO GRAFICO INDIRIZZATO AL PROCESSO PROGETTUALE STRUTTURALE**

Nell'ambito dell'analisi strutturale mediante elaboratore elettronico si assiste attualmente ad uno sviluppo di «software indirizzato» per i campi applicativi (civile, meccanico, aeronautico o, ancora più specializzati, per tipologie costruttive (edifici multipiano, ponti, strutture leggere, ecc.). Questo sviluppo si è basato sulle passate esperienze relative ai programmi «general purpose», nati principalmente in campo di costruzioni aeronautiche (SAP, ADINA, NASTRAN, MARC, ecc.). Agli inizi degli anni '60 sono state fatte le prime modellazioni «batch» indirizzate ad edifici civili da Clough ed al. [10] con i programmi FRMSTC e FRMDYN, TABS da Wilson e Dovey a partire dal 1972 [11], ETABS di Wilson ed al. [12] scritto nel 1975.

Una nuova generazione di programmi indirizzati alla ricerca della forma di membrane pre-sollecitate ed all'analisi di edifici 3-D, di tipo interattivo grafico è stata sviluppata presso il laboratorio di Computer Graphics dell'Università di Cornell (USA) presentati alla letteratura tecnica, a partire dalla fine degli anni '70 [13-15].

**IL PROGRAMMA STRAND (STRUCTURAL ANALYSIS AND DESIGN)**

Il programma presentato in questo articolo rappresenta lo stato più avanzato della estensiva ricerca sull'uso delle tec-

**INTERACTIVE GRAPHIC LANGUAGE ADDRESSED TO THE STRUCTURAL DESIGNING PROCESS**

As far as structural analysis by means of an electronic computer is concerned, we are presently witnessing the development of «specialized software» for applied fields (civil, mechanical, aeronautic) or even more specialized ones for construction types (buildings, skyscrapers, bridges, lightweight structures, etc.). This development is based on past experiences relative to «general purpose» programs, originating principally in the field of aeronautic construction (SAP, ADINA, NASTRAN, MARC, etc.). At the beginning of the 60's, the first «batch» modellings, aimed at civil buildings, were made by Clough et al. [10] with the FRMSTC and FRMDYN programs, TABS by Wilson and Dovey starting from 1972 [11], ETABS by Wilson et al. [12], written in 1975.

A new generation of programs directed towards research into the pre-stressed membrane form and the analysis of 3-D buildings of the interactive graphic type has been developed at the Computer Graphics Laboratory of the University of Cornell (U.S.A.) and introduced into the technical literature at the end of the 70's [13-15].

**THE STRAND PROGRAM (STRUCTURAL ANALYSIS AND DESIGN)**

The program presented in this paper represents the most advanced state of the extensive research on the use of inte-

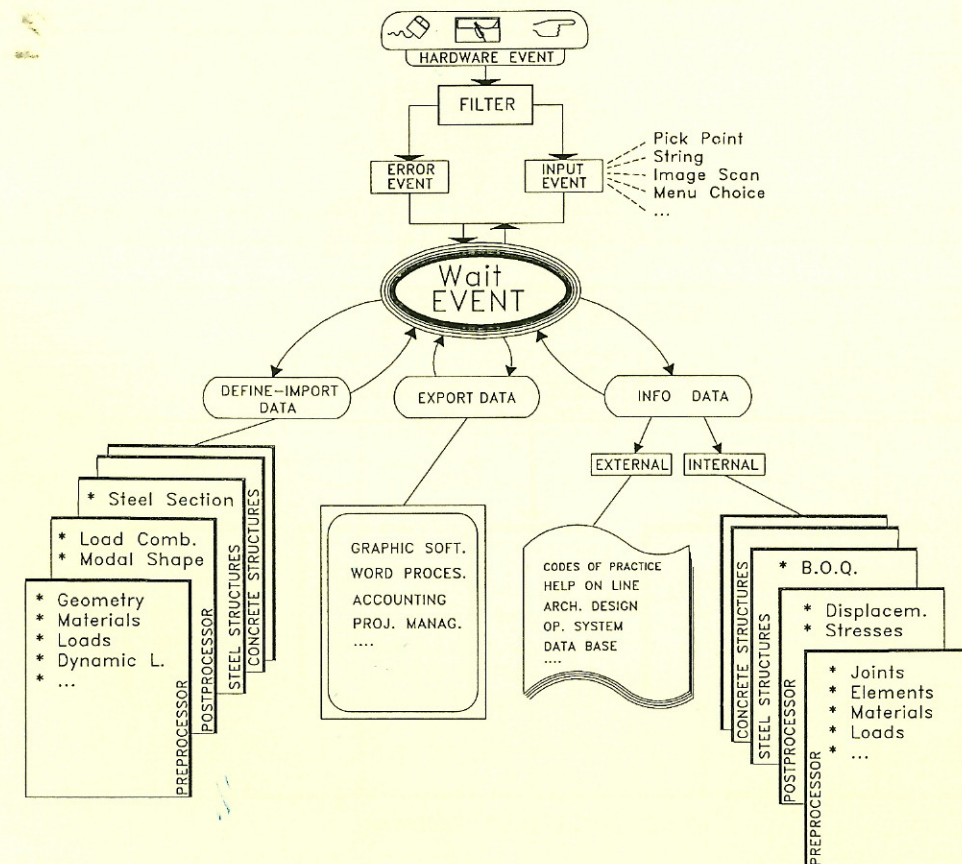


Fig. 2 - Filtro dei comandi interattivi.

Fig. 2 - Command filter.

niche interattive grafiche (I.G.) nel campo dell'ingegneria strutturale svolta dal 1970 presso il Dipartimento di Ingegneria Strutturale dell'Università di Bologna con la collaborazione di software-house specializzate in tecniche CAD [16-21].

Lo sviluppo della ricerca è stato indirizzato principalmente sul campo delle strutture leggere (tensostrutture, membrane pre-sollecitate e pneumatiche) e sistemi intelaiati tridimensionali in c.a. e acciaio soggetti ad azioni sismiche.

Il programma di seguito illustrato è operativo al secondo livello (CAD), mentre è in fase di ricerca e collaudo per quanto riguarda l'implementazione degli algoritmi di simulazione dell'intelligenza artificiale (EXPERT SYSTEM) (fig. 3) [22].

ractive graphic techniques (I.G.) in the field of structural engineering, carried out beginning in 1970 in the Department of Structural Engineering of the University of Bologna, with the assistance of software houses specialized in CAD techniques [16-21].

The research development was carried out principally on the field of lightweight structures (tensile structures, prestressed and pneumatic membranes) and three-dimensional framed systems in reinforced concrete and steel, subject to seismic activity.

The following illustrated program operates at the second level (CAD), while it is in a research and testing phase as far as the implementation of the semantic simulation of artificial intelligence is concerned (EXPERT SYSTEM) (fig. 3) [22].

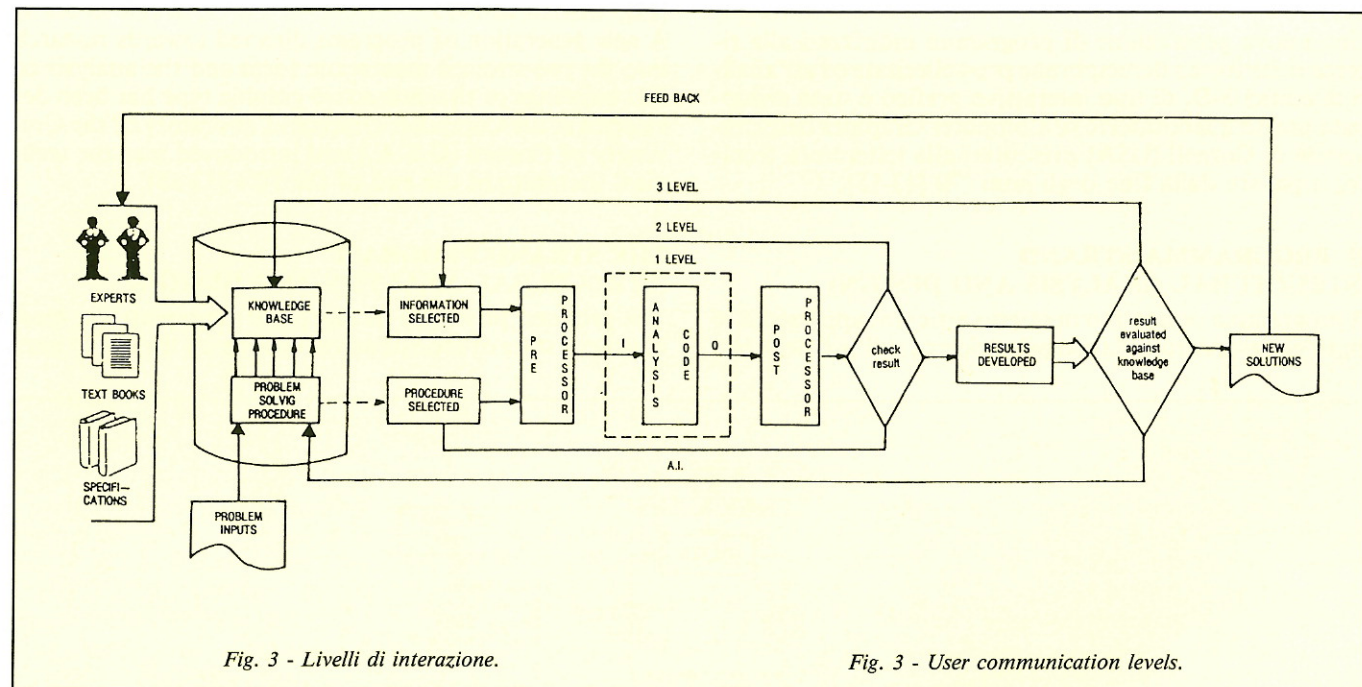


Fig. 3 - Livelli di interazione.

Fig. 3 - User communication levels.

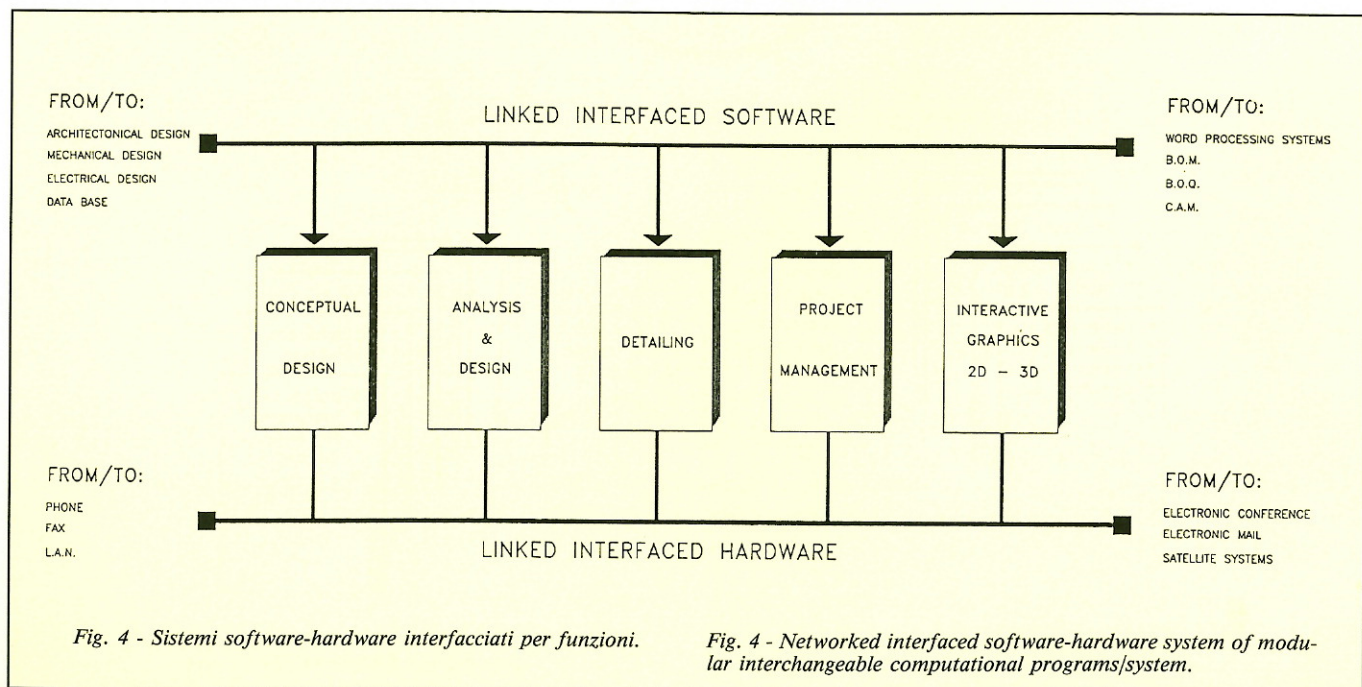


Fig. 4 - Sistemi software-hardware interfacciati per funzioni.

Fig. 4 - Networked interfaced software-hardware system of modular interchangeable computational programs/system.

Rispetto alla prima versione operativa scritta in Fortran [21], ed in funzione della profonda trasformazione avvenuta nei sistemi hardware tecnico-scientifici, il programma è stato riscritto in linguaggio C e completamente ristrutturato nell'operatività interattiva in modo da ottimizzare il suo impiego su work-station a 32 bit UNIX, PC-DOS e ultimamente su 386 DOS EXTENDER (PHAR-LAP).

Il sistema hardware + software è organizzato come un NETWORKED INTERFACED SYSTEM (fig. 4) come suggerito nella «Second International Conference on Computing in Civil Engineering, Hangzhou, 1985, Cina» [23]. La FLOW CHART delle attività principali del programma è illustrata in fig. 5.

With respect to the first operative version written in Fortran [21] and in accordance with the profound transformation taking place in the technical-scientific hardware systems, the program was rewritten in C language and its interactive functions were completely restructured in order to optimize its use on the 32 bit UNIX work-station, the PC-DOS and, more recently, the 386 DOS EXTENDER (PHAR-LAP).

The hardware and software system is organized as an INTERFACED NETWORKED SYSTEM (fig. 4), as suggested in the «Second International Conference on Computing in Civil Engineering, Hangzhou, China, 1985» [23]. The FLOW CHART of the general and addressed functions of the program is illustrated in fig. 5.

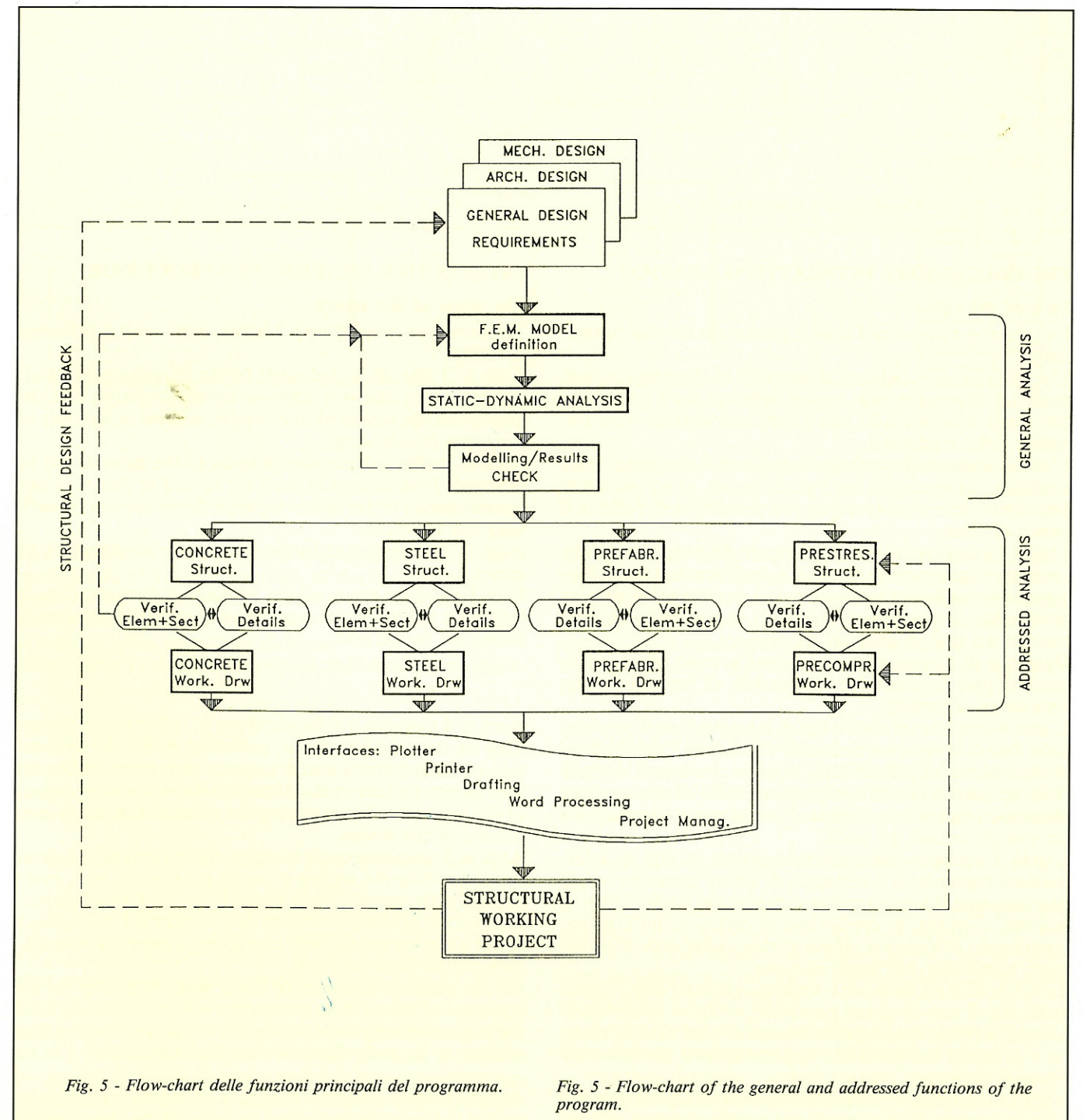


Fig. 5 - Flow-chart delle funzioni principali del programma.

Fig. 5 - Flow-chart of the general and addressed functions of the program.

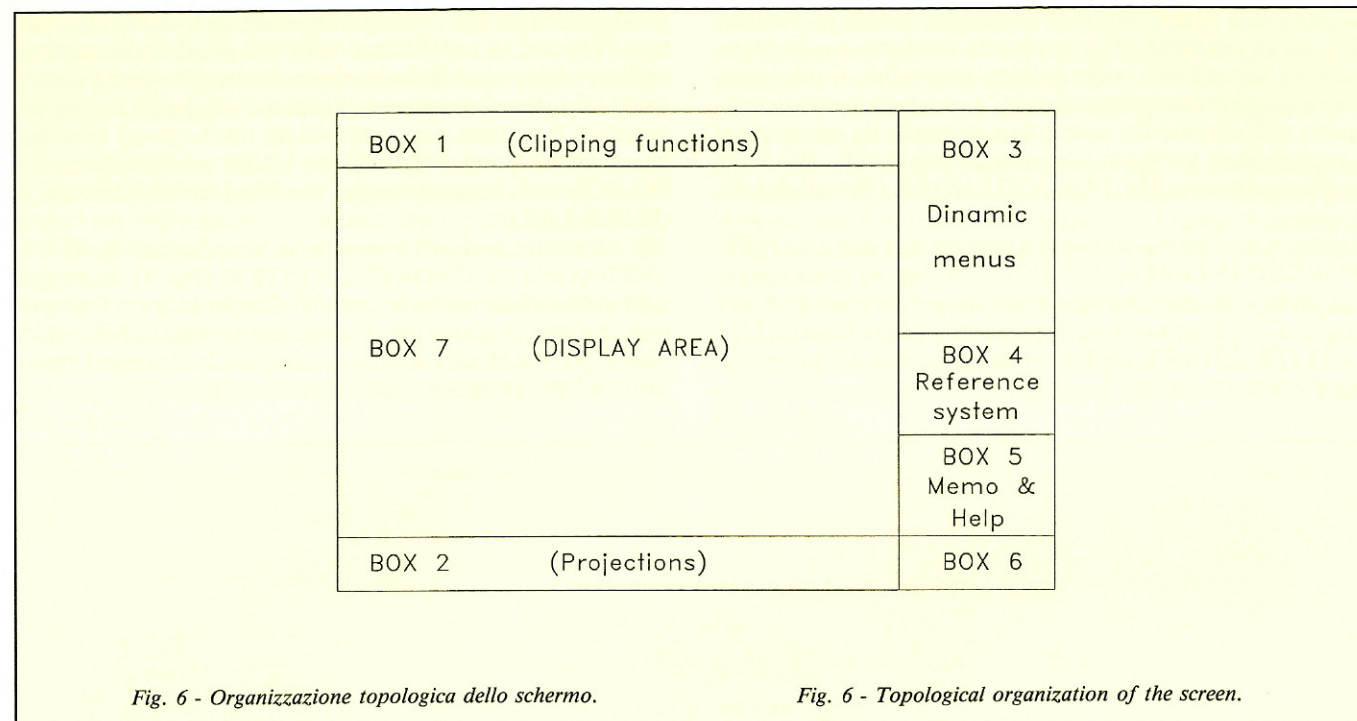


Fig. 6 - Organizzazione topologica dello schermo.

Fig. 6 - Topological organization of the screen.

**PRE-PROCESSORE INTERATTIVO GRAFICO**

**Le aree del video**

Lo schermo è diviso in 7 aree, ognuna con diversa funzionalità.

L'area 1 (fig. 6) è dedicata ai comandi di clipping e quindi consente di eseguire degli zoom della struttura e visualizzare sullo schermo solo una parte, una sezione o un elemento della medesima.

L'area 2 consente di cambiare il tipo di visualizzazione della struttura, da immagini nei 3 piani xy, xz, yz ad immagini assonometriche e prospettiche con possibilità di definire il punto di vista.

L'area 3 è dedicata al menu principale del programma, che consente la generazione dei modi e degli elementi finiti, l'assegnazione delle sezioni e materiali costituenti il sistema strutturale, il caricamento dei modi ed elementi e la definizione del tipo di ausiliari da eseguire.

Ogni riga di questo menu consente l'accesso ad un sottomenu di tipo dinamico (sovrapponibile all'immagine preesistente su schermo).

L'area 4 contiene tre diversi tipi di informazione dipendenti dalla fase di lavoro: normalmente vi compare l'orientamento del sistema di riferimento, oppure contiene il disegno della sezione in fase di assegnazione delle dimensioni agli elementi, oppure è la mappa di input per l'assegnazione dei vincoli esterni dei nodi.

L'area 5 contiene contemporaneamente tre tipi di informazioni riguardanti il settaggio di alcuni parametri e più precisamente il vincolamento corrente dei nodi, il tipo di sezione, corrente, la condizione di carico ed un'area per il passaggio alla pagina alfanumerica contenente informazioni numeriche sull'input eseguito.

Tutti i nodi o gli elementi o i carichi generati dopo l'assegnazione di uno di questi parametri avranno automaticamente l'attribuzione rispettivamente di quel vincolo esterno o di quella sezione o dell'appartenenza a quella condizione di carico.

L'area 6 ha 3 diverse funzionalità: consente di retrocedere nella procedura di input mediante posizionamento del cur-

**INTERACTIVE GRAPHIC PRE-PROCESSOR**

**The areas of the screen**

The screen is divided into 7 areas, each with a different function.

Area n. 1 (fig. 6) is dedicated to the clipping commands and therefore allows a zoom-in on the structure and the display on the screen of only a part, section or element of the same (windowing).

Area n. 2 allows the type of display of the structure to be changed, from images in the 3 xy, xz and yz planes to isometric images or perspectives, with the possibility of defining the viewpoint.

Area n. 3 is dedicated to the main program directory or menu.

Each line of the menu allows access to a dynamic (fig. 7) sub-menu (which can be superimposed on the image already found on the screen).

Area n. 4 contains 3 different types of information depending on the working phase: normally, either the orientation of the reference system appears or it contains the design of the section in the element size assignment phase, or the input map for assigning the external boundary conditions of the nodes.

Area n. 5 simultaneously contains three kinds of information regarding the setting of some parameters and, more precisely, the current node boundaries, the type of current section, the loading condition and an area for the passage to the alphanumeric page containing numerical information on the inserted input.

All the nodes or elements or loads generated after the assignment of one of these parameters will automatically have the respective assignment of that external boundary or that section or its assignment to that load condition.

Area n. 6 has 3 different functions: it makes it possible to return to the input procedure by positioning the cursor in

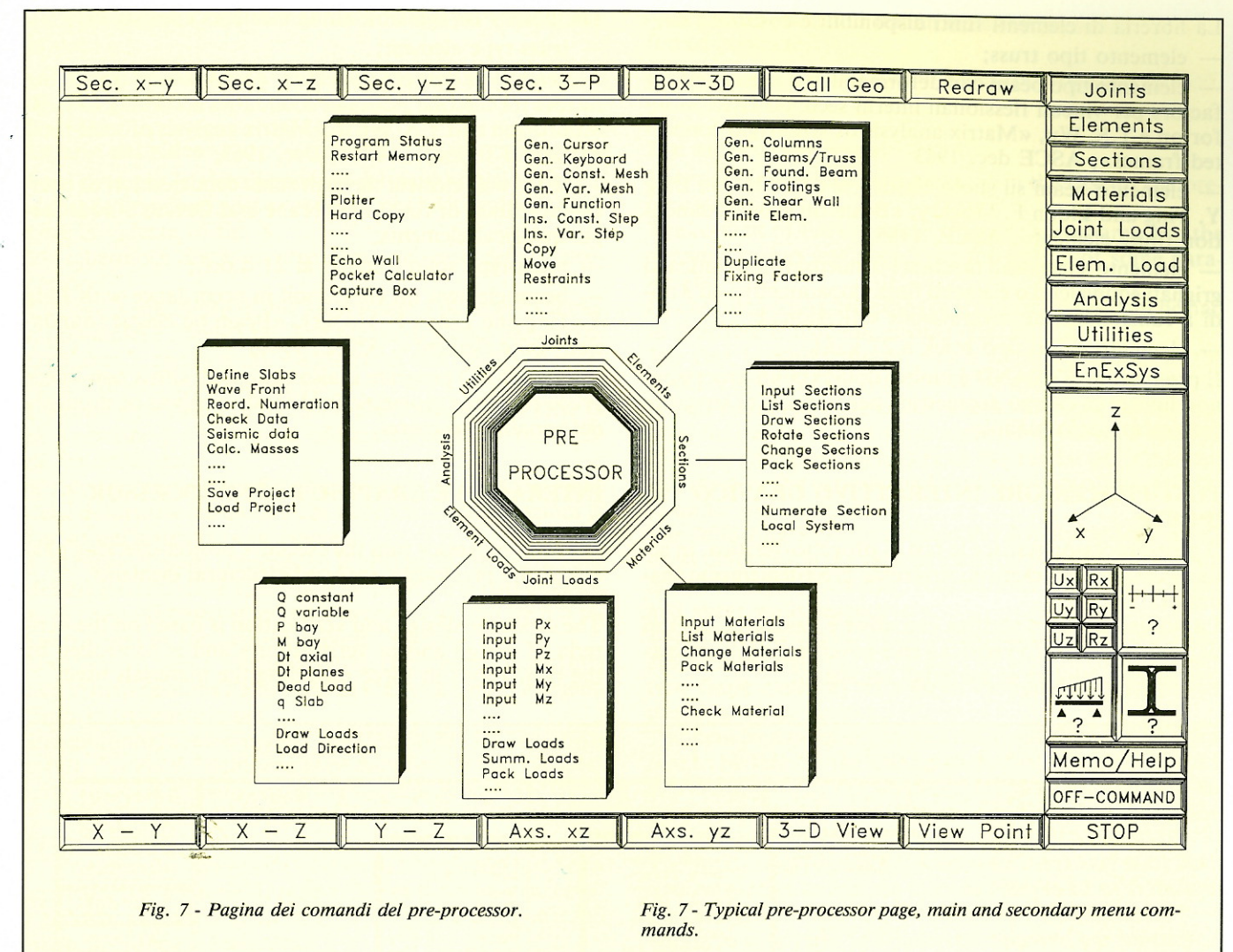


Fig. 7 - Pagina dei comandi del pre-processor.

Fig. 7 - Typical pre-processor page, main and secondary menu commands.

sore sull'area «OFF COMANDO», di uscire dal modulo mediante lo «STOP» e ritornare al menu dei moduli o di leggere il tipo di comando richiesto (area intermedia). La casella intermedia ricorda, istante per istante, a che step si è giunti nella procedura di input. Infine l'area 7 è dedicata alla visualizzazione della struttura.

**CENTRAL PROCESSOR**

Il modello matematico, programmato interamente in linguaggio C, del codice STRAND permette di eseguire i seguenti tipi di analisi:

- analisi statica generale con 6 gradi di libertà per nodo;
- analisi dinamica-statica equivalente;
- analisi dinamica modale mediante sovrapposizione modale con spettro di risposta in accordo con l'Eurocode n. 8 e normativa italiana. Nel caso di edifici multipiano è possibile eseguire una condensazione di piano del g.d.l. (3 per nodo + 3 per piano);
- analisi dinamica per integrazione nel dominio del tempo alla Newmark di time histories;
- analisi dinamica aleatoria in dominio di frequenza mediante sovrapposizione modale con spettri di potenza per input sismico o del vento.

the «OFF COMMAND» area, to exit from the module by means of the «STOP» and return to the module menu or read the type of command required (intermediate area). The intermediate box reminds us, instant by instant, of the step we have reached in the input procedure. Finally, Area n. 7 is dedicated to the display of the structure.

**CENTRAL PROCESSOR**

The mathematical model of the STRAND code, programmed entirely in C language, allows the following types of analyses to be carried out according to the displacement method:

- general static analysis with 6 degrees of freedom per node;
- modal dynamic analysis by means of modal superposition with a response spectrum in accordance with Eurocode n. 8 and Italian regulations. In the case of multi-level buildings, a d.o.f. floor condensation can be made (3 per node + 3 per floor);
- dynamic analysis by integration of time histories in the time-domain according to the Newmark method;
- random dynamic analysis in the frequency-domain through modal superposition with density power spectra for seismic or wind input.

La libreria di elementi finiti disponibili è costituita da:

- elemento tipo truss;
- elemento tipo beam con deformabilità a taglio e fixing factors per vincoli flessionali interni secondo G.R. Monforton e T.S. Wu, «Matrix analysis of semi-rigid connected frames», ASCE dec. 1963;
- elemento beam su suolo elastico in accordo con Bing Y. Ting and Eldon F. Mockry, «Beam on elastic foundation finite element», ASCE, 1985;
- elemento shear-wall mediante condensazione statica di grigliati equivalenti o elementi finiti isoparametrici ad 8 nodi a funzionamento membranale e flessionale;
- elemento solito tipo brick a 21 g.d.l.

Il programma STRAND è inoltre dotato di un processore non lineare in campo geometrico per l'analisi di strutture fortemente deformabili.

**POST-PROCESSORE INTERATTIVO GRAFICO (POST)**

Il post-processor gestisce le fasi di progetto-verifica, in sede esecutiva, degli elementi strutturali precedentemente analizzati.

La progettazione e verifica esecutiva è basata su «criteri di progettazione e/o verifica» ed è governata dalle normative vigenti relative ai materiali impiegati:

The library of available finite elements consists of:

- truss-type element;
- beam-type element with shear deformability and fixing factors for internal flexional boundaries according to G.R. Monforton and T.S. Wu in «Matrix analysis of semi-rigid connected frames», ASCE Dec. 1963;
- shear-wall element through static condensation of equivalent frames or finite membrane and flexure 8-node isoparametrical elements;
- brick-type solid element at 21 d.o.f.;
- beam element on elastic soil in accordance with Bing Y. Ting and Eldon F. Hockry, «Beam on elastic foundation finite element», ASCE, 1985;

The STRAND program is also equipped with a non-linear processor in the geometric field for the analysis of strongly deformable structures.

**INTERACTIVE GRAPHIC POST-PROCESSOR**

The post-processor runs the executive project-checking phases of the previously analyzed structural elements.

The executive design and verification is based on the «criteria of design and/or verification» and is controlled by the regulations in force regarding the materials used:

- Eurocodice n. 2 e Normative Italiane per le strutture in c.a.;
- Eurocode n. 3 e Normativa Italiana per le strutture in acciaio.

**Le aree del video**

Se si opta per la visualizzazione dei risultati del calcolo e si sceglie l'opzione post-processore per i dati output, compare la videata di fig. 8.

Lo schermo è diviso in aree come nel caso del pre-processore.

Cambia il contenuto di due aree: l'area 3 di accesso ai menu dinamici e l'area 5 per il settaggio di alcuni parametri. Dall'area 3, con la scelta via mouse di una casella, si accede a 8 diversi menu dinamici.

Il primo è un menu di Archivio che contiene una serie di utili opzioni di supporto da utilizzare durante le varie fasi di controllo dati.

Il secondo menu è quello che consente la visualizzazione delle deformate sia modali che nelle varie combinazioni di carico della struttura in esame.

I successivi 3 menu contengono le opzioni di visualizzazione dei diagrammi delle sollecitazioni nelle varie combinazioni di carico rispettivamente per elementi di tipo travi o pilastri, travi di fondazione o plinti, e setti.

Il successivo menu, Elementi Finiti, contiene le opzioni atte alla visualizzazione dello stato di tensione per gli elementi finiti bi-tridimensionali.

Il penultimo menu consente il settaggio dei fili fissi della struttura cioè il disallineamento dal proprio asse baricentrico dei vari elementi strutturali ai fini della carpenteria di piano e delle verifiche dei momenti nelle travi a filo pilastro.

L'ultimo menu fornisce su video o su file, un disegno schematico di carpenteria di piano; disegno che può successivamente essere completato con i programmi di grafica ai quali il sistema è integrato.

Per quanto riguarda le strutture in c.a. il post-processore fornisce:

- il progetto dell'armatura con due possibili alternative:
  - ferri piegati e staffe,
  - ferri correnti dritti e staffe;
- il disegno esecutivo delle carpenterie per piano con disegno tabellare delle armature;
- disegno tabellare esecutivo per i pilastri;
- computo metrico cls. e acciaio distinto per elemento;
- specifiche tecniche-capitolato strutturale;
- relazione di calcolo.

Per quanto riguarda le strutture metalliche il post-processore gestisce:

- elaborazione dei disegni d'assieme;
- progetto e verifica dei particolari standard e particolari tipi definiti parametricamente;
- disegni di officina mediante programma separato (STEEL-DRAFTER);
- lista dei materiali (B.O.Q.);
- specifiche tecniche-capitolato strutturale;
- computo metrico;
- relazione di calcolo.

- Eurocode n. 2 and Italian Rules for structures in reinforced concrete;
- Eurocode n. 3 and Italian Rules for structures in steel.

**The areas of the screen**

The screen is divided into areas, as in the case of the pre-processor.

The content of the two areas changes: access area 3 to the dynamic menus and area 5 for the setting of some parameters.

By choosing a box by means of a mouse, access can be had to 8 different dynamic menus (fig. 8).

The first is the File menu which contains, as well as the CALL GEOMETRY (the first to be selected to display the project required on the video), a series of useful support options for use during the various phases of the data control.

The second menu displays both the modal deformations and those in the various load combinations of the structure under examination.

The following 3 menus contain the display options of the stress diagrams in the various load combinations for beams or column-type elements, foundations beams or plinths, and shear walls respectively.

The following menu, «Finite Element», contains options used for the display of the state of tension for the mesh-type finite elements with stress coloured distribution or principal stress arrows.

The penultimate menu allows the fixed files of the structure to be set, i.e. the disalignment from their own centre of volume axis of the various structural elements for the purpose of steel floor structures and spot-check of beams in line with columns.

The final menu supplies a schematic design of steel floor structures; this design can later be completed with the graphic programs with which the system is integrated.

As far as structures in reinforced concrete are concerned, the post-processor manages:

- the reinforcement design with two possible alternatives:
  - bent reinforcing bars and stirrups;
  - straight running reinforcing bars and stirrups;
- the executive drawing of the steel floor structure with a tabulated drawing of the reinforcements;
- executive tabulated drawings for columns;
- metric computation for concrete and steel, distinct for each element;
- structural technical-specification characteristics;
- calculation relation (technical report).

As far as the metallic structures are concerned, the post-processor manages:

- processing of drawings as a whole;
- design and control of standard details and parametrically defined type details;
- shop drawings by means of a separate program (STEEL-DRAFTER);
- list of materials and B.O.Q.;
- structural technical-specification characteristics;
- technical report.

Some output results are shown in fig. 9, illustrating the synthetic graphic diagrams obtained a HP 9000 UNIX-XWINDOWS minicomputer and a Compaq 386 DOS-EXTENDER PC.

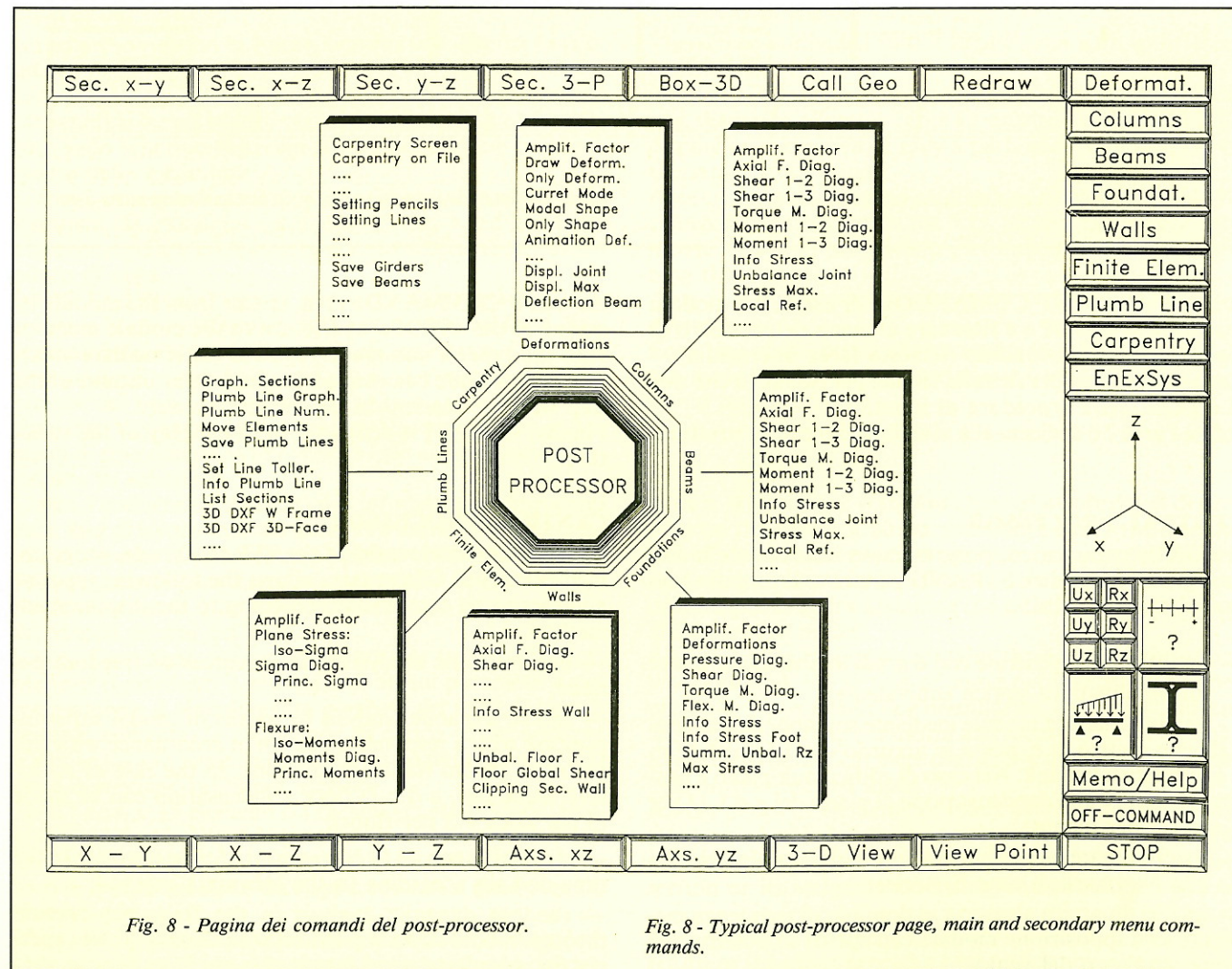


Fig. 8 - Pagina dei comandi del post-processor.

Fig. 8 - Typical post-processor page, main and secondary menu commands.



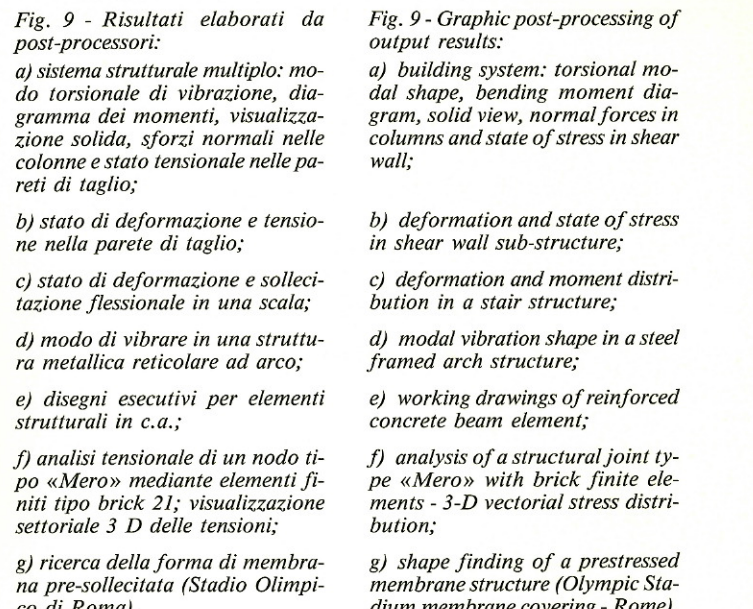
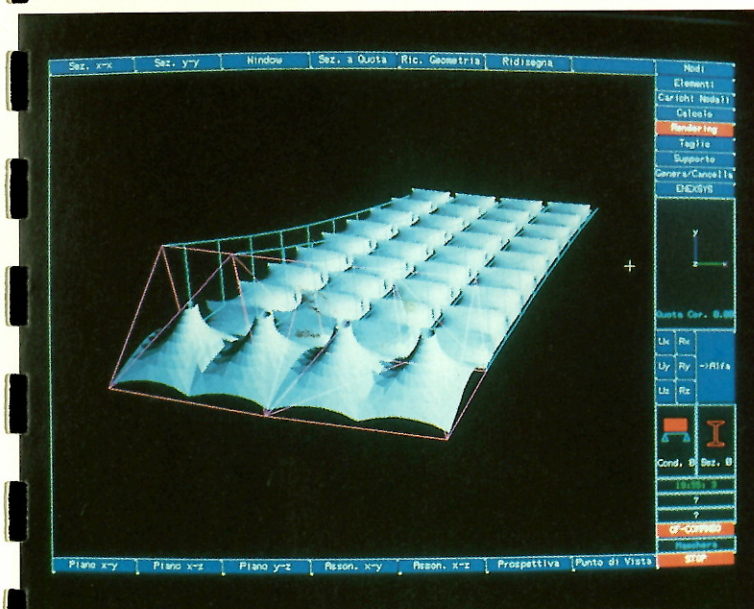
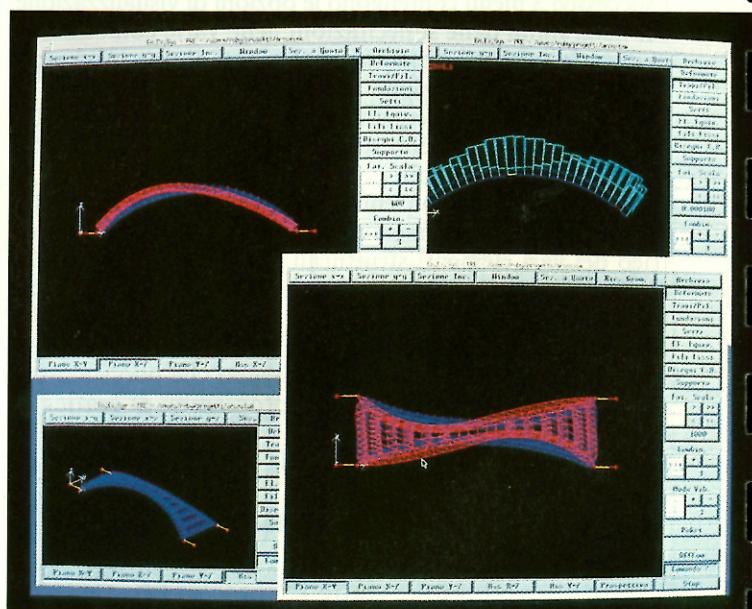
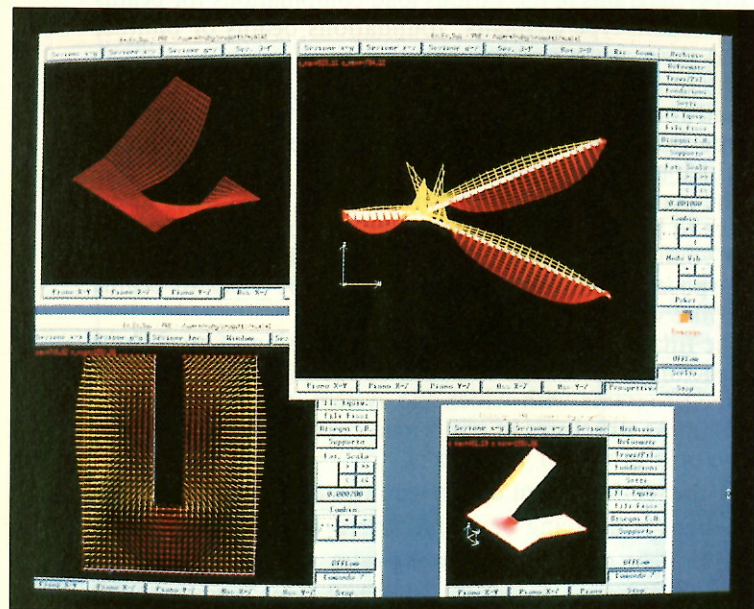
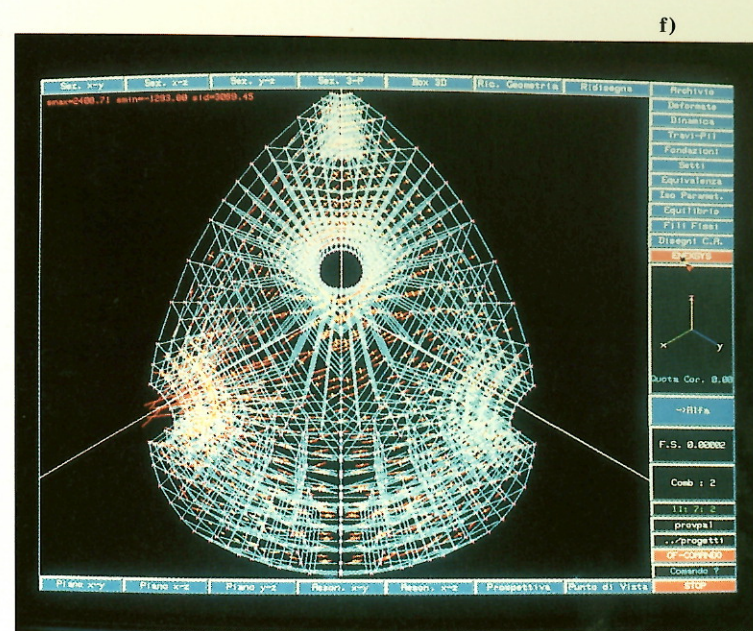
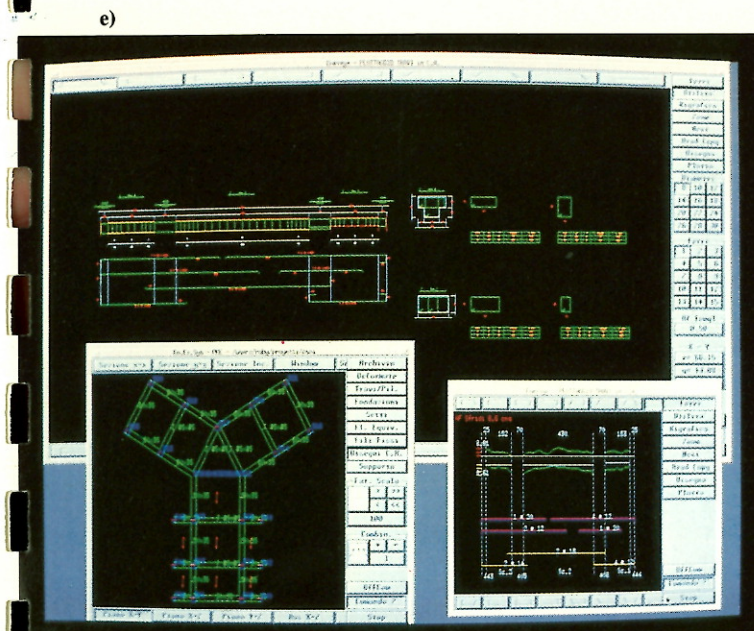
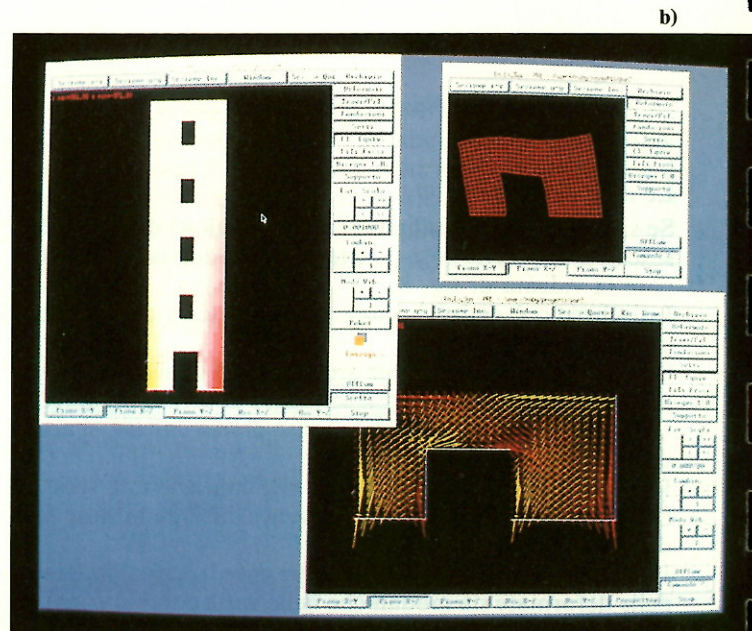
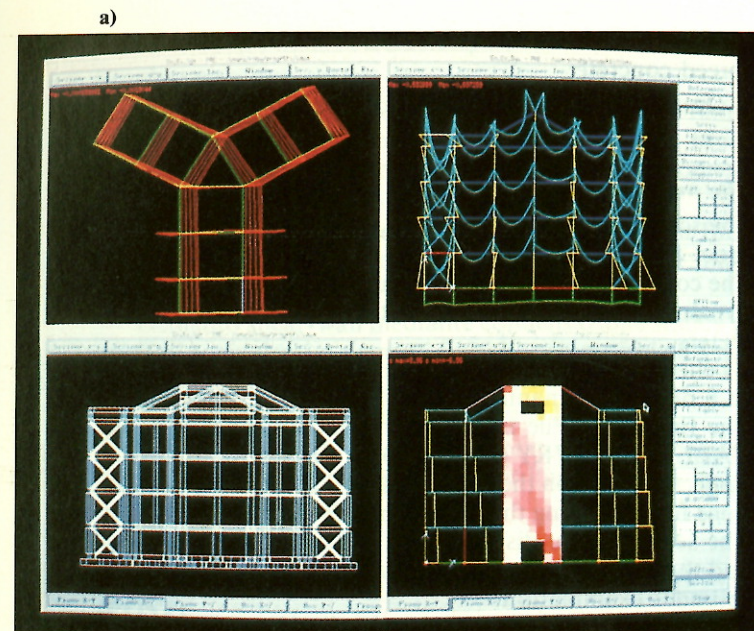


Fig. 9 - Risultati elaborati da post-processor:

- a) sistema strutturale multiplo: modo torsionale di vibrazione, diagramma dei momenti, visualizzazione solida, sforzi normali nelle colonne e stato tensionale nelle pareti di taglio;
- b) stato di deformazione e tensione nella parete di taglio;
- c) stato di deformazione e sollecitazione flessionale in una scala;
- d) modo di vibrare in una struttura metallica reticolare ad arco;
- e) disegni esecutivi per elementi strutturali in c.a.;
- f) analisi tensoriale di un nodo tipo «Mero» mediante elementi finiti tipo brick 21; visualizzazione settoriale 3 D delle tensioni;
- g) ricerca della forma di membrana pre-sollecitata (Stadio Olimpico di Roma).

Fig. 9 - Graphic post-processing of output results:

- a) building system: torsional modal shape, bending moment diagram, solid view, normal forces in columns and state of stress in shear wall;
- b) deformation and state of stress in shear wall sub-structure;
- c) deformation and moment distribution in a stair structure;
- d) modal vibration shape in a steel framed arch structure;
- e) working drawings of reinforced concrete beam element;
- f) analysis of a structural joint type «Mero» with brick finite elements - 3-D vectorial stress distribution;
- g) shape finding of a prestressed membrane structure (Olympic Stadium membrane covering - Rome).

**BIBLIOGRAFIA - BIBLIOGRAPHY**

[1] Pearson K., Todhunter I.: «A history of the theory of elasticity» - Cambridge Univ. Press, 1886.  
 [2] Timoshenko S.: «History of strength of materials» - McGraw Hill, New York, 1953.  
 [3] Benvenuto E.: «La scienza delle costruzioni e il suo sviluppo storico» - Sansoni, 1981.  
 [4] Croci G.: «La scienza delle costruzioni tra teoria e realtà» - Nota III: L'industria delle costruzioni, 1979.  
 [5] Pozzati P.: «Teoria e tecnica delle strutture» - UTET, 1977.  
 [6] Oden J.T., Bathe K.J.: «A commentary of computational mechanics» - Appl. Mech. Rev., 31, 1978.  
 [7] Fanelli M., Giuseppetti G.: «Mathematical analysis of structures: usefulness and risk» - IABSE, 11th Congress, Vienna, 1980.  
 [8] Fanelli M.: «Informatics and the use of computers in structural engineering» - IABSE, Periodica, 1, 1983.

[9] Working Commission V: «Using computers in the design of structures» - IABSE Proceedings, P-80/84.  
 [10] Clough R.W., King I.P., Wilson E.L.: «Structural analysis of multistory buildings» - J. Structural Div. ASCE, 90 (ST3), 19-34, 1964.  
 [11] Wilson E.L., Dovey H.H.: «Three-dimensional analysis of buildings system-TABS. Earthquake Engineering Research Center» - Rep. EERC 72-8, University of California, Berkeley, dec. 1972.  
 [12] Wilson E.L., Dovey H.G., Habibullah A.: «Three-dimensional analysis of building systems-TABS 80» - Vol. I: Theoretical Manual; vol. II: Users Manual. A report to the U.S. Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg MS, June 1980.  
 [13] McGuire W.: «Interactive computer graphics and the design of steel frames» presented at the First Symposium on Metal Structures, Mexical Society of Structural Engineers, Queretaro, Mexico, July 1978.

[14] Abel J.F., Greenberg D.P., McGuire W., Gallagher R.H.: «Interactive graphics for finite element analysis» - Proceedings of Seventh Conference on Electron Computation, ASCE, St. Louis, Mo., 1979.  
 [15] Pesquera C., McGuire W., Abel J.: Interactive graphical pre-processing of three-dimensional framed structures» - Computer & Structures, vol. 17, 1983.  
 [16] Majowiecki M.: «Membrane coverings in steel and high strength textiles: aspects of interactive design and construction» - Acier, Stahl, Steel, no. 12, 1975.  
 [17] Majowiecki M., Tironi G.: «Geometrical configuration of pneumatic and tent structures obtained with interactive computer aided design» - IASS, World Congress on Space Enclosures (W-Code), Montreal, 1976.  
 [18] Majowiecki M., Tironi G.: «Alcune applicazioni di progettazione interattiva mediante calcolatore nello studio di strutture fortemente deformabili» - INAR-COS, Bologna, aprile 1978.

[19] Majowiecki M., Montanari M.: «Sulla progettazione interattiva di telai metallici» - Acciaio, 1980.  
 [20] Majowiecki M.: «Tecniche interattive nella moderna metodologia della progettazione strutturale» - Acciaio, 1980.  
 [21] Majowiecki M., Zuccarello F.: «Static and dynamic analysis for multilevel buildings: a computer aided building design methodology» - Third International Conference on Space Structure, Guilford, U.K., 1984.  
 [22] Fenves S.J., Maher M.L., Sriram D.: «Knowledge-based expert system in civil engineering» - IABSE Periodica, 4, 1985.  
 [23] Lount A.M.: «Practical development and use of interfaced systems for engineering design, detailing and project management» - Second International Conference on Computing in Civil Engineering, Hangzhou, China, 1985.