

package "B.A.C." Building Analysis Code; manuale Utente

ing. Alberto Cucinella - Via Aniello Falcone 386 Napoli 80127
366 1982898 – ing.alberto@cucinella.org

1. Generalità.

Il package "B.A.C." (Building Analysis Code) per personal computer è un *sistema integrato* di procedure per l'analisi di strutture spaziali multipiano ad impalcato rigido, operante con il metodo delle *sottostrutture*.

La metodologia adottata consiste nell'individuazione di un sistema di *controventi unidirezionali e torsionali* nell'ambito della membratura spaziale, nell'analisi delle loro caratteristiche di comportamento (in termini di *matrici deformabilità e/o di rigidezza*), quindi nell'*assemblaggio* del sistema spaziale e nella costruzione della *matrice di rigidezza rototraslante*, determinando le azioni competenti a ciascuna *sottostruttura (ripartizione delle azioni orizzontali al livello d'impalcato)*.

Note queste ultime, è possibile *enucleare* il *controvento* dal contesto spaziale, calcolandone le sollecitazioni per le azioni ad esso competenti sullo schema *piano*.

Sinteticamente la metodologia può essere riassunta nelle seguenti fasi, ciascuna svolta da un *modulo* della procedura:

- Analisi delle caratteristiche di comportamento delle singole *sottostrutture* (matrici di *deformabilità e rigidezza*) [package "E.S.A.P."];
- Calcolo delle forze orizzontali sismiche [package "B.A.C." modulo "PESI"];
- Ripartizione delle azioni orizzontali al livello d'impalcato [package "B.A.C." *main program*];
- Calcolo dei singoli controventi sullo schema piano [package "E.S.A.P."].

Il *comportamento* delle *sottostrutture* facenti parte del complesso spaziale può essere ricondotto alle seguenti due tipologie:

- **Traslazionale unidirezionale**, che rappresenta un vincolo alla **traslazione**, nel piano di azione del *controvento*, per gli impalcati collegati;
- **Torsionale**, che rappresenta un vincolo alla **rotazione** per gli impalcati collegati.

Il package pertanto consente di descrivere in modo approfondito, per geometria e carichi, le caratteristiche della struttura, potendo tener conto di tetti, travi rampanti (a *ginocchio*), di *pannelli*, di pareti (piene o forate), d'impalcati *sfalsati* (cioè non collegati a *tutti* i *controventi*), dell'interazione (*suolo struttura*) con la fondazione (diretta o indiretta). Tale estrema flessibilità deriva dall'adozione del modulo package "E.S.A.P." [1] (cui si rimanda per ogni approfondimento) per la descrizione e l'analisi delle singole *sottostrutture*.

Sotto il profilo operativo, la gestione del *singolo controvento* costituente la struttura spaziale viene effettuata (a livello di input, di *analisi di deformabilità* ed infine di calcolo) dal modulo package "E.S.A.P.", potendo quindi godere di tutte le possibilità al livello di modellazione che tale procedura offre.

Il package "B.A.C." funge da *shell* (guscio), coordinando la gestione della struttura nel suo complesso, ed effettua la *ripartizione delle azioni orizzontali* fra i *controventi (main program)*, determinando i *centri di taglio* al livello d'impalcato ("*baricentri delle rigidzze*").

Grazie all'impostazione descritta, è pertanto possibile utilizzare il modulo package "E.S.A.P." tanto

nell'ambito di una struttura spaziale (per *modellarne i controventi*), che per il calcolo di strutture *isolate*, senza porre alcuna limitazione alla flessibilità della procedura.

Il package è inoltre corredato da routine grafiche estremamente utili alla descrizione della geometria della struttura (come per altro richiesto dalla vigente normativa tecnica [10]/[11]), che effettuano il disegno degli schemi statici delle sottostrutture (in scala unica), della pianta schematica degli impalcati (con indicazione dei controventi su essi incidenti), delle assonometrie schematiche della struttura spaziale.

Gli archivi gestiti dalla procedura sono inoltre strutturati in modo da consentire la realizzazione e l'adozione di *pre-processor* e *post-processor*, anche *esterni* al package, per lo studio di particolari applicazioni.

1.1. Note per gli Utenti del package SPACE.

La *ripartizione delle azioni orizzontali* venne analizzata dallo stesso autore nel 1981 nell'ambito della procedura PAS [2] nel modulo package "SPACE".

Tale procedura, pienamente valida ed attuale ancora oggi sia per impostazione che per utilizzazione, consente l'analisi di strutture complesse, avvalendosi degli *irrigidimenti generici*, definiti in modo esplicito attraverso le **matrici di comportamento** (di rigidità o di deformabilità).

Tali matrici potevano essere calcolate *esternamente* alla procedura "SPACE", per esempio avvalendosi del modulo "S.A.P.2.1" (*Analisi della Deformabilità del controvento*) contenuto nel medesimo package PAS, e quindi inserite quali elemento identificatore dell'*irrigidimento*.

Il package "BAC" non muta sostanzialmente la metodologia precedentemente adottata, ma realizza una reale **integrazione** fra i diversi moduli (*Analisi di Deformabilità - ripartizione delle forze sismiche - calcolo delle sottostrutture*), si avvale delle nuove possibilità di *modellazione* avanzata offerte dal modulo di calcolo ("E.S.A.P."), che introduce nuovi *elementi finiti* (*aste con conci eccentrici e pannelli*) e nuovi *operatori* (quali le *connessioni master - slave*), effettua il calcolo dei **centri di taglio** degli impalcati e la *ripartizione delle azioni orizzontali* nell'ipotesi di *rotazione impedita dei diaframmi*. Ne deriva un codice di calcolo particolarmente significativo per le strutture *spaziali ad impalcato rigido*, quali gli **edifici**, che supera le limitazioni *abituali* nella descrizione della geometria dell'opera, consentendo di tenere in conto, senza difficoltà, di scale, di sfalsamento in quota degli impalcati, di tetti (in base alla loro reale configurazione), della variazione di linea d'asse nell'ambito di una pilastrata (*riseghe*); il titolo del package sintetizza quanto descritto: **Building Analysis Code**.

Nel seguito vengono espone in modo sintetico le principali innovazioni introdotte:

- La **sezione grafica** del package consente una descrizione molto approfondita della struttura analizzata, fornendo le **piante schematiche** di tutti gli impalcati costituenti (ed evidenziando i *controventi* su essi *incidenti*), gli schemi delle *sottostrutture* descritte nel modulo "E.S.A.P." (in scala unica) e gli **schemi assonometrici** della struttura.

- A differenza del modulo "SPACE", non vi è distinzione fra *sottostrutture* per quanto attiene la *tipologia*: i controventi *traslanti* vengono liberamente descritti nel modulo "E.S.A.P.", senza limitazioni formali; nel caso di pareti (con *modellazione a pannelli* o ad aste con *deformazione a taglio*) o di telai a di geometria *regolare ortogonale* (tipo "TELORT") è possibile avvalersi delle routine di autogenerazione automatica (modulo **A.M.G. Auto Mesh Generator**); sono altresì disponibili delle routine di **trasformazione** (modulo **utility di sistema**) per modificare la *geometria di base*, introducendo nuovi elementi (quali *travi a ginocchio*), o eliminandone altri.

Viene pertanto a scomparire la distinzione dei *controventi* fra *telai ortogonali*, *pareti* ed *irrigidimenti generici* adottata nel package "SPACE", introducendo semplicemente il concetto di

sottostruttura.

Al modulo "E.S.A.P." è demandato il compito della completa gestione delle *matrici di comportamento*, effettuando in modo totalmente automatico l'*Analisi della Deformabilità* (calcolando la matrice $[D]$ e quindi invertendola ottenendo la $[K] = [D]^{-1}$); l'operazione può eventualmente essere effettuata operando *in serie*.

- Il package "SPACE" consentiva l'analisi delle strutture con *impalcati sfalsati* operando direttamente sulle *matrici di rigidezza (espansione della matrice)*. Tale operazione veniva demandata all'Utente. Il modulo "E.S.A.P." [1] (vedi par.7.1.1) effettua in modo automatico tale operazione, calcolando (ed archiviando) sia la *matrice di rigidezza propria* (cioè riferita al numero effettivo d'impalcati ai quali il controvento è collegato) che l'*espansa* (cioè riferita alla numerazione degli impalcati nell'ambito della struttura spaziale). Pertanto il caso delle strutture ad *impalcati sfalsati* viene totalmente *automatizzato*, senza richiedere interventi da parte dell'Utente.

- Il package "B.A.C." inoltre considera la *spazialità* della struttura sia per quanto attiene le azioni *orizzontali* (sisma o vento) che per quelle di tipo *permanente*, come nel seguito ampiamente descritto.

- Con riferimento ad un sistema di riferimento spaziale del tipo O X,Y,Z, la procedura analizza le seguenti quattro possibili condizioni di carico (*base*):

- 1) Carichi *permanenti*;
- 2) Forze F_X *ondulatorie* in direzione X;
- 3) Forze F_Y *ondulatorie* in direzione Y;
- 4) Coppie d'impalcato M_Z (vedi [1] punto 4.) per effetto delle forze orizzontali F_Y in posizione *eccentrica* (X_G +/- ecc_X), sotto forma di momento:

$$M_Z = F_Y * ecc_X$$

in modo da tener conto di eccitazioni torsionali, come suggerito dalla vigente normativa [9].

- La procedura determina il sistema di azioni orizzontali competenti a ciascuna *sottostruttura* nell'ipotesi di rotazione torsionale dei *diaframmi* impedita ($\dot{Y}_Z = 0$); tale condizione è particolarmente utile per confrontare le rigidezze dei singoli *controventi* senza considerare gli effetti derivanti dalla rotazione degli impalcati, cosa che talvolta impedisce una facile interpretazione dei risultati.

- Il package determina i *centri di taglio* degli impalcati (impropriamente denominati *baricentri delle rigidezze*, come nel seguito esposto) per le azioni orizzontali applicate.

Tali coordinate indicano i punti degli impalcati ove applicare (contemporaneamente) le forze orizzontali senza che si destino rotazioni dei medesimi ($\dot{Y}_Z = 0$).

- Effettuata la *ripartizione delle forze orizzontali* il package "B.A.C." (*main program*) provvede automaticamente all'archiviazione delle forze orizzontali competenti a ciascuna *sottostruttura*; in tal modo all'Utente non resta che richiamare il modulo "E.S.A.P." e far elaborare (eventualmente *in serie*) i *controventi*.

Da quanto esposto si evidenzia che il package "B.A.C.", pur conservando l'impostazione adottata dal suo capostipite "SPACE", costituisce una procedura di analisi del tutto innovativa, sia sul piano formale che su quello sostanziale, consentendo da un lato un'intima interrelazione fra i differenti moduli (riducendo così l'intervento da parte dell'Utente alle sole fasi *decisionali*) e dall'altro una notevole possibilità di *modellazione* che amplia le già vaste possibilità di calcolo.

Allo scopo di evidenziare le principali differenze rispetto al package "SPACE", si sono contrassegnati con il simbolo (#) i paragrafi che contengono delle innovazioni.

2. Metodologia di calcolo (#).

2.1. Ipotesi adottate (#).

Il package "B.A.C." (*main program*) provvede all'*assemblaggio* di tutte le *sottostrutture* componenti la membratura spaziale e alla costruzione in forma automatica della *matrice di rigidità rototraslante*.

I *controventi* costituenti la struttura possono distinguersi in due categorie:

- **Traslazionali unidirezionali**, che rappresentano un vincolo alla **traslazione**, nel proprio piano di azione, per gli impalcati collegati; a questa categoria appartengono le strutture analizzabili con il modulo "E.S.A.P.";
- **Torsionali**, che rappresentano un vincolo alla **rotazione** per gli impalcati collegati.

Si ricorda che talune strutture non sono riconducibili *soltanto* ad una delle due tipologie descritte, come il caso degli elementi *torsiorigidi* per i quali sono presenti *entrambe* le componenti di *comportamento*. In generale infatti un elemento irrigidente all'interno di una membratura spaziale esercita una triplice azione sugli impalcati sui quali incide, rappresentando infatti:

- un **vincolo** elastico alla **traslazione** in **due** direzioni fra loro ortogonali (assi *principali d'inerzia* della sezione retta) e passanti per il *centro di taglio*,

- un **vincolo** elastico alla **rotazione**;

quindi occorrono **tre** matrici ad esprimerne il *comportamento* (due **traslanti** ed una **torsionale**).

Tuttavia spesso due delle tre matrici risultano *irrilevanti*, in quanto la rigidità torsionale *propria* è trascurabile rispetto a quella *globale*, e quella *traslante*, nella direzione di minore rigidità, è modesta rispetto all'altra: è questo il caso dei *telai* e delle *mensole lamellari* (aventi inerzia predominante in una direzione). In tali casi una sola matrice (*traslante*) è sufficiente a definire in modo univoco il *comportamento* della sottostruttura; a tale categoria sono riconducibili gli *irrigidimenti* analizzabili con il package "E.S.A.P.". Per essi le *coordinate in pianta* della sottostruttura individuano il piano di *giacitura* del *controvento*. Per maggiori approfondimenti sulla definizione e sul calcolo delle matrici *traslanti* si rimanda al manuale Utente del modulo "E.S.A.P." [1] (vedi par. 7.1.1).

Assegnato un riferimento spaziale O, X, Y, Z (destrorso) le *sottostrutture* devono giacere in piani paralleli all'asse Z (genericamente orientati); non occorre cioè che la loro *traccia* nel piano X-Y sia parallela agli assi X o Y.

Ai fini del calcolo, non ha importanza la scelta delle coordinate rappresentanti la *giacitura* del *controvento*: basta infatti che esse corrispondano a due punti appartenenti alla *traccia* del piano di azione del *controvento*. Ai fini della **rappresentazione grafica** della *sottostruttura* tuttavia è opportuno scegliere come *punto iniziale* (X_{in}, Y_{in}) quello cui corrisponde l'**origine del riferimento locale** dell'elemento (o, x, y) [1] (Fig.3).

E' appena il caso di ricordare che l'*orientamento* del *controvento* (cioè il *verso* della *giacitura*) è rivolto dal *punto iniziale* verso quello *finale* e che le azioni orizzontali vanno lette in tale riferimento; ciò implica che se s'invertono le *coordinate in pianta* (X_{in}, Y_{in} con X_{fin}, Y_{fin}) la soluzione del problema è ovviamente la stessa (essa è *invariante* rispetto al riferimento assunto) ma cambiano i *segni* delle azioni orizzontali corrispondenti alla sottostruttura.

Le **ipotesi** adottate [4]/[5]/[6]/[7]/[8] sono le seguenti:

- **Infinita rigidezza dell'impalcato nel proprio piano** nei confronti dei *controventi* su esso incidenti; trattandosi di *moto rigido* sono sufficienti *tre gradi di libertà* (due traslazioni ed una rotazione) per descrivere in modo univoco la configurazione deformata;

- che **l'impalcato si comporti come un diaframma nei confronti degli elementi su esso incidenti**: viene cioè trascurata l'interazione flesso-torsionale che i *controventi* esercitano mutuamente.

2.2. Metodo di calcolo (#).

Il metodo di calcolo è quello dell'*Analisi agli elementi finiti*. Il problema viene ricondotto alla scrittura, in forma automatica, di un sistema di equazioni in $3 \cdot p$ incognite, essendo p il numero d'impalcato indipendenti costituenti la struttura spaziale.

Tale sistema di equazioni esprime le condizioni di equilibrio degli impalcato:

- 1) **equilibrio alla traslazione** in direzione **X**;
- 2) **equilibrio alla traslazione** in direzione **Y**;
- 3) **equilibrio alla rotazione** intorno ad una retta parallela all'asse **Z** e passante per il punto di applicazione della forza orizzontale *ondulatoria* d'impalcato (*baricentro delle masse* in caso di azione sismica).

Numerati gli impalcato dal basso verso l'alto, le incognite sono rappresentate dal vettore degli spostamenti generalizzati $\{ \underline{s} \}$ (di componenti $sX_1, sX_2, \dots, sX_p, sY_1, sY_2, \dots, sY_p, \dot{Y}Z_1, \dot{Y}Z_2, \dots, \dot{Y}Z_p$) e il sistema di equazioni può essere sinteticamente espresso con la notazione matriciale:

$$\{ \underline{F} \} = [\underline{K}] * \{ \underline{s} \}$$

avendo indicato con $\{ \underline{F} \}$ il vettore termine noto (di componenti $FX_1, FX_2, \dots, FX_p, FY_1, FY_2, \dots, FY_p, MZ_1, MZ_2, \dots, MZ_p$) rappresentante il sistema di carichi applicati ai p impalcato (forze FX_i, FY_i e coppie MZ_i); $[\underline{K}]$ è la matrice **di rigidezza rototraslante** della membratura spaziale rispetto alle azioni orizzontali.

Attraverso la metodologia dell'*Analisi agli elementi finiti* tale sistema di equazioni può essere costruito *in forma automatica* mediante l'*assemblaggio* delle matrici di rigidezza dei singoli elementi irrigidenti, tenendo conto della posizione dei medesimi.

Gli **spostamenti** incogniti degli impalcato *sono riferiti al punto di applicazione delle forze orizzontali ondulatorie* FX_i, FY_i (che rappresentano i *baricentri delle masse* nel caso si tratti di forze sismiche); ove tali azioni non siano definite (caso di soli carichi *permanenti*) essi saranno riferiti all'origine O del riferimento spaziale (O, X, Y, Z). Infatti nella scrittura del sistema di equazioni si sono assunti come *poli* per gli equilibri alla rotazione i punti di applicazione delle forze ondulatorie (che quindi hanno *braccio nullo*).

Secondo la metodologia ampiamente illustrata in [5]/[8], la matrice $[\underline{K}]$ (di ordine $3 \cdot p$) può essere scomposta in nove *sottomatrici* (di ordine p); il sistema di equazioni pertanto assume la *forma*:

$$\left\{ \begin{array}{l} \underline{FX} \\ \underline{FY} \\ \underline{MZ} \end{array} \right\} = \left[\begin{array}{ccc} \underline{K_{XX}} & \underline{K_{XY}} & \underline{K_{X\Phi}} \\ \underline{K_{YX}} & \underline{K_{YY}} & \underline{K_{Y\Phi}} \\ \underline{K_{\Phi X}} & \underline{K_{\Phi Y}} & \underline{K_{\Phi\Phi}} \end{array} \right] * \left\{ \begin{array}{l} s_X \\ s_Y \\ \Phi_Z \end{array} \right\}$$

La matrice $[\underline{K}]$ è simmetrica; nel caso in cui i *controventi* siano disposti esclusivamente in piani paralleli ai X-Z e Y-Z (*tracce* parallele agli assi X ed Y), la sottomatrice $\underline{K_{XY}}$ e la simmetrica $\underline{K_{YX}}$ sono

nulle (i prodotti $\sin(\alpha) * \cos(\alpha) = 0$).

E' inoltre opportuno ricordare che **occorrono almeno tre controventi (non concorrenti in uno stesso punto proprio o improprio) per impalcato** affinché ciascun diaframma sia in equilibrio. In mancanza di tale condizione *essenziale* la matrice delle rigidezze rototraslante [**K**] è *non positiva* (sintomo di *labilità* di una parte della struttura), risultando ovviamente una o più equazioni *identicamente nulle*. Il programma evidenzia tale circostanza con un messaggio di errore.

Per quanto attiene al concetto di *matrici di deformabilità* e di *rigidezza traslante* si rimanda a quanto ampiamente esposto in [1] (par. 7.1.1). Il *comportamento torsionale* [2] (vedi package "SPACE" par. 5.) può essere sintetizzato attraverso le matrici di:

- **Deformabilità Torcente**, il cui termine **Dtor(i,j)** rappresenta la rotazione [in radianti] che nasce al piano **i** per effetto di una coppia unitaria [pari ad 1 kgcm] agente al piano **j**;

- **Rigidezza Torcente**, il cui termine **Rtor(i,j)** rappresenta la coppia [in kgcm] che nasce al piano **i** per effetto di una rotazione [in radianti] agente al piano **j**.

2.2.1. Azioni orizzontali e risultati del calcolo (#).

Il programma prevede quattro possibili *distinte* distribuzioni di azioni agenti al livello d'impalcato:

- 1) Carichi *permanenti*;
- 2) Forze F_X *ondulatorie* in direzione X;
- 3) Forze F_Y *ondulatorie* in direzione Y;
- 4) Coppie d'impalcato M_Z (vedi [1] punto 4.) per effetto delle forze orizzontali F_Y poste in posizione *eccentrica* (X_G +/- *eccX*), sotto forma di momento:

$$M_Z = F_Y * eccX$$

in modo da tener conto di eccitazioni torsionali, come suggerito dalla vigente normativa [9].

Il programma determina per ciascuna condizione di carico:

- Le caratteristiche cinematiche { **s** } (s_{X_i} , s_{Y_i} , \dot{Y}_{Z_i}) dei p impalcati riferiti al punto di applicazione delle azioni ondulatorie (*baricentri delle masse*);

- Per ciascun elemento (lette nel *riferimento locale*), le caratteristiche cinematiche { **s_{loc}** } per i p impalcati (s_{X_i} per gli irrigidimenti traslanti e \dot{Y}_{Z_i} per i torcenti) e corrispondentemente le azioni ad essi competenti (analogamente F_{X_i} per traslanti e M_{Z_i} per i torcenti).

In particolare il sistema di spostamenti { **s_{loc}** } viene ottenuto *componendo vettorialmente* le caratteristiche *cinematiche* { **s** } (riferite al punto di applicazione delle forze *ondulatorie* nel riferimento *generale*), tenendo conto della posizione relativa del singolo *controvento*. Da { **s_{loc}** } è quindi possibile ricavare (sempre nel riferimento *locale*) le azioni competenti a ciascuna *sottostruttura* { **F_{loc}** }, avvalendosi della relazione matriciale:

$$\{ F_{loc} \} = [K_{loc}] * \{ s_{loc} \}$$

avendo indicato con [**K_{loc}**] la matrice di *rigidezza* (*traslante o torsionale*, in base alla natura del *controvento*).

Note le forze agenti su ciascuna *sottostruttura* { **F_{loc}** }, il programma effettua le verifiche alla traslazione ed alla rotazione dei p impalcati, lasciandone traccia sul tabulato.

E' opportuno richiamare l'attenzione sull'importanza di un'attenta lettura di entrambe le caratteristiche fornite (cinematiche e statiche): esse infatti consentono un'importante verifica sulla qualità dell'elaborazione, cosa attualmente richiesta a livello normativo [10]/[11].

La formulazione adottata, anche se in forma *automatica*, ricalca il classico metodo delle deformazioni: pertanto la *congruenza* è insita nel metodo stesso, ricavandosi le *sollecitazioni* a partire dalle deformazioni.

Il programma, effettua le verifiche alla traslazione ed alla rotazione per tutti gli impalcati. La soluzione è pertanto *equilibrata e congruente*.

E' quindi possibile *enucleare* il singolo elemento dal contesto spaziale e sottoporlo alle azioni ad esso relative, ottenendo così sullo *schema piano* la soluzione corretta del problema sia in termini di sollecitazioni che di deformazioni.

Una ulteriore possibile verifica (vedi *esempio*) consiste nel confrontare gli spostamenti $\{s_{loc}\}$ del controvento al livello d'impalcato (ottenuti sullo schema spaziale e leggibili sul tabulato della ripartizione delle azioni orizzontali) con quelli ottenuti sullo *schema piano* per effetto delle forze orizzontali determinate; tali caratteristiche cinematiche (a meno di lievi approssimazioni) devono coincidere.

Questo metodo consente quindi di effettuare una verifica di *congruenza* indiretta, ricavando dalle forze determinate gli spostamenti d'impalcato e confrontandoli con quelli relativi alla membratura spaziale nel suo complesso.

Le condizioni di carico (2 e 3) considerate sono rappresentate da un sistema di forze F_{X_i} ed F_{Y_i} agenti (non simultaneamente) in X_{G_i} e Y_{G_i} .

Assumendo il sistema di riferimento O X, Y, Z in modo tale che la dimensione *allungata* [D] sia parallela all'asse X e quella più corta [B] sia in direzione Y (sempre in conformità alla vigente normativa [9] punto C.6.1.2) è possibile definire una *eccentricità* ecc_X delle forze F_Y , tale che la coppia torcente applicata all'impalcato i risulti:

$$M_{z_i} = F_{Y_i} * ecc_X$$

con $ecc_X = \lambda * D$; la normativa [9] suggerisce i valori di λ da assumere in funzione del rapporto D/B.

In particolare, con riferimento al sistema di equazioni:

$$\{ \underline{F} \} = [\underline{K}] * \{ \underline{s} \}$$

il vettore termine noto $\{ \underline{F} \}$ assume, nelle varie condizioni di carico esaminate, i seguenti valori:

$$\begin{array}{ll} \text{cond. 2) solo } F_X: & \{ F_X, 0, 0 \} \\ \text{cond. 3) solo } F_Y: & \{ 0, F_Y, 0 \} \\ \text{cond. 4) solo } M_Z: & \{ 0, 0, M_Z \} \end{array}$$

Avendo adottato come *polo*, ai fini delle equazioni di equilibrio alla rotazione, proprio il punto di applicazione delle azioni F_X ed F_Y , nelle condizioni 2 e 3 il momento delle forze applicate è nullo (*braccio nullo*).

In conformità alla vigente normativa [9], si sono considerate le forze *ondulatorie* (F_X ed F_Y) *non simultaneamente* agenti (condizioni 2 e 3).

Nella condizione 4 (solo momento $F_{Y_i} * ecc_X$) non vi sono forze applicate (quindi le due componenti relative all'equilibrio alla traslazione sono nulle) ed il momento applicato vale appunto M_Z .

Le azioni orizzontali competenti ai *controventi*, nelle condizioni di carico esaminate, vengono

automaticamente archiviate in modo da poter fare eseguire la successiva fase di calcolo delle sottostrutture senza dover effettuare ulteriori operazioni di input. Le condizioni *base* di carico descritte (1, 2, 3 e 4) vengono automaticamente *combinare* fra loro dal package "E.S.A.P." (vedi [1] par. 4.).

Per l'analisi della condizione di carico n.1 si rimanda al successivo paragrafo.

2.2.2. Effetto dei carichi *permanenti* (#).

Di solito nella pratica tecnica viene considerata la struttura nella sua spazialità per quanto attiene al comportamento per azioni sismiche; difficilmente si adotta la medesima metodologia per quanto accade per effetto dei carichi *verticali* (*permanenti*).

Questo implica che viene considerata correttamente la congruenza del *controvento* nella condizione relativa alle azioni sismiche, operando diversamente per le azioni *permanenti*.

Nella *ripartizione delle azioni sismiche* si valutano quali siano le forze da applicare al singolo controvento affinché esso si possa calcolare in modo corretto *non* su uno schema spaziale (oneroso sotto il profilo computazionale), ma su uno schema *piano*, *enucleandolo* cioè dalla struttura *complessiva*; la soluzione trovata deve ovviamente soddisfare la *congruenza*, nel senso che il controvento, per effetto delle forze orizzontali determinate, deve subire gli stessi spostamenti al livello d'impalcato che gli competono sullo schema *spaziale*.

Prendiamo ora in considerazione il comportamento per effetto delle azioni *permanenti*: ciascun *controvento*, considerato *isolato*, tenderebbe ad assumere spostamenti orizzontali al livello d'impalcato *indipendenti* dagli altri; la presenza di un *diaframma rigido* non consente che ciò si verifichi e pertanto, anche per i carichi in questione, gli spostamenti delle *sottostrutture* devono rispettare la *congruenza* al livello di piano, essendo animate da moto rigido.

Ciò implica che, anche in tale condizione di carico, debbano nascere delle forze orizzontali che rappresentano le azioni che il *diaframma* esercita sul singolo *controvento* per ripristinare la *congruenza*.

L'effetto descritto è in molti casi irrilevante, ma può talvolta essere significativo: basti pensare a una struttura costituita da *controventi* fra loro paralleli rappresentati da telai di due campate (con luci fra loro molto differenti) e pareti molto rigide.

I telai, considerati isolati, per effetto di carichi verticali tenderebbero a spostarsi orizzontalmente; *assemblando* gli impalcati (e quindi ripristinando la congruenza) le pareti intervengono limitando l'entità di tali spostamenti.

Nasce pertanto un sistema di azioni orizzontali sui singoli *controventi* che rappresenta l'azione competente a ciascuno come parte della struttura nella sua spazialità. Note tali forze orizzontali (che si sommano ai carichi *permanenti*), è possibile calcolare correttamente ciascuna sottostruttura *enucleandola* da quella spaziale, sottoponendola alle azioni *permanenti proprie* (quelle inizialmente applicate) e *indotte* (dal *diaframma* per ripristinare la congruenza).

In sintesi l'applicazione di azioni *permanenti* ai *controventi* facenti parte di una struttura spaziale induce nei medesimi un sistema di *azioni orizzontali* al livello d'impalcato.

Il package "E.S.A.P." [1] (vedi 7.1.2.) nella fase di *analisi della deformabilità* oltre a determinare le *matrici di comportamento* [**D**] e [**K**] effettua anche il calcolo del *vettore laterale*. Esso rappresenta il sistema di reazioni (cambiate di segno) che nasce al livello d'impalcato sui *vincoli ausiliari* (carrelli ad asse orizzontale) ([1] Fig.8) per l'applicazione dei *carichi permanenti*. E' possibile comporre vettorialmente, impalcato per impalcato, il sistema di azioni così determinate e sommarle alle forze orizzontali *permanenti* direttamente applicate ai diaframmi (P_{Xi}, P_{Yi} in X_{Pi}, Y_{Pi}).

Fisicamente ciò corrisponde a tenere bloccati (mediante vincoli *ausiliari*) i p impalcati, determinando il sistema di forze che impediscono i cinatismi dei diaframmi, per azione dei carichi *permanenti*.

Con riferimento al punto di applicazione delle forze orizzontali *ondulatorie*, assunto come *polo* negli equilibri alla rotazione, è pertanto possibile determinare per ciascun impalcato il sistema risultante delle *azioni permanenti* R_{X_i} , R_{Y_i} ed MR_{Z_i} (che viene stampato nel tabulato), *ripartendolo* fra tutti i *controventi* costituenti la membratura spaziale.

Fisicamente ciò corrisponde a *rilasciare* i *diaframmi*, precedentemente vincolati fittiziamente, sottoponendoli al sistema di azioni *permanenti* risultante, *ripartendo* tali azioni fra i *controventi*. Le forze ottenute, sommate al *vettore laterale* (reazioni che bloccano al livello di piano il *controvento* sottoposto alle azioni *permanenti*), rappresentano il sistema di azioni che ripristina la *congruenza*.

Ciascuna *sottostruttura* pertanto sarà sottoposta ad una distribuzione di azioni orizzontali (*permanenti*) al livello d'impalcato (*indotte*) che occorre *sommare* a quelle *direttamente* applicate (*proprie*).

Come precedentemente descritto, si è ancora assunto come *polo* il punto di applicazione delle forze *ondulatorie*; pertanto la matrice di rigidezza *rototraslante* è la stessa che si è costruita per calcolare le condizioni n. 2, 3 e 4.

In analogia a quanto esposto nel precedente paragrafo, il vettore termine noto $\{ \underline{F} \}$ assume nella condizione esaminata la seguente *forma*:

cond. 1) azioni permanenti: $\{ R_{X_i}, R_{Y_i}, MR_{Z_i} \}$

presentando termini non nulli in tutte e tre i *sottovettori*.

Di solito la condizione di carichi *permanenti* (secondo la definizione adottata in [1] vedi par. 4.) è rappresentata da carichi *verticali* e quindi il *vettore laterale* risulta di modesta entità, dipendendo essenzialmente dalla *distribuzione* del carico e dalla *geometria* della struttura.

Vi sono tuttavia taluni casi nei quali la condizione *permanente* riveste particolare importanza, come nel caso di strutture seminterrate nelle quali la *spinta* esercitata dal terreno costituisce un'azione né *temporanea* né *ondulatoria*, gravando sull'opera per periodi di tempo prolungati e determinando diagrammi delle caratteristiche della sollecitazione ben differenti da quelli relativi ai carichi *verticali*.

2.2.3. Ripartizione delle forze ondulatorie nell'ipotesi di rotazione \dot{Y}_Z impedita degli impalcati (#).

Nei precedenti paragrafi si è descritta la modalità di calcolo adottata per la *ripartizione delle forze ondulatorie* fra i *controventi* costituenti la struttura spaziale.

Come è noto, l'applicazione di un sistema di azioni orizzontali determina traslazioni (s_{X_i} e s_{Y_i}) e rotazioni (\dot{Y}_{Z_i}) dei p diaframmi, dai quali derivano gli spostamenti (s_{loc}) del generico controvento.

L'interpretazione dei risultati della *ripartizione delle forze orizzontali* risulta talvolta non immediata in quanto le azioni sui controventi non derivano soltanto dai rapporti fra le rigidezze di questi ultimi, ma anche dagli effetti delle rotazioni degli impalcati. Allo scopo di eliminare tale effetto di *disturbo* e quindi di fornire delle informazione esclusivamente in merito ai rapporti fra le rigidezze, si è pensato di porre $\dot{Y}_Z = 0$, ipotizzando di vincolare fittiziamente gli impalcati alla rotazione. In tal modo le azioni orizzontali sui *controventi* non dipendono dai valori assunti dalle rotazioni \dot{Y}_{Z_i} (*poste=0*), nè dal punto di applicazione delle forze applicate, ma soltanto dal *valore* di queste ultime e dai rapporti fra le rigidezze dei *controventi*.

Esaminando i risultati di questa fase del calcolo è quindi facile *intuire* come *intervenire* sulla struttura per *ottimizzarne* il comportamento, agendo sulla disposizione e sulla rigidezza dei *controventi*.

La metodologia descritta non è pertanto un *ausilio* per il calcolo (la distribuzione delle azioni orizzontali ottenuta non è infatti significativa per la determinazione delle caratteristiche della sollecitazione, riferendosi ad una condizione di vincolo *fittizia* degli impalcati), ma rappresenta un interessante *strumento diagnostico* per una corretta interpretazione del comportamento dell'opera. Pertanto la distribuzione delle azioni orizzontali sui *controventi* ottenuta in questa fase del calcolo non viene archiviata.

Sotto il profilo metodologico, in analogia a quanto espresso nel paragrafo 2.2, viene costruito in forma automatica, un sistema di equazioni in $2 \cdot p$ incognite, essendo p il numero d'impalcati indipendenti costituenti la struttura spaziale.

Tale sistema di equazioni esprime le condizioni di equilibrio degli impalcati alla traslazione:

- 1) **equilibrio alla traslazione** in direzione **X**;
- 2) **equilibrio alla traslazione** in direzione **Y**.

Numerati gli impalcati dal basso verso l'alto, le incognite sono rappresentate dal vettore degli spostamenti generalizzati $\{ \underline{s}' \}$ (di componenti $sX_1', sX_2', \dots, sX_p', sY_1', sY_2', \dots, sY_p'$) e il sistema di equazioni può essere sinteticamente espresso con la notazione matriciale:

$$\{ \underline{F}' \} = [\underline{K}'] * \{ \underline{s}' \}$$

avendo indicato con $\{ \underline{F}' \}$ il vettore termine noto (di componenti $FX_1', FX_2', \dots, FX_p', FY_1', FY_2', \dots, FY_p'$) rappresentante il sistema di carichi applicati ai p impalcati (forze F_{x_i}, F_{y_i}); $[\underline{K}']$ è la matrice **di rigidezza traslante** della membratura spaziale rispetto alle azioni orizzontali.

Attraverso la metodologia dell'*Analisi agli elementi finiti* tale sistema di equazioni può essere costruito *in forma automatica* mediante l'*assemblaggio* delle matrici di rigidezza dei singoli elementi irrigidenti, tenendo conto della posizione dei medesimi.

E' opportuno mettere in evidenza che, avendo posto la condizione $\dot{Y}_Z = 0$, il sistema di *spostamenti generalizzati* $\{ \underline{s}' \}$ non comprende le rotazioni \dot{Y}_{Z_i} degli impalcati (già note in quanto nulle) e che analogamente nel vettore $\{ \underline{F}' \}$ non sono compresi i momenti M_{Z_i} ; in quanto non occorre scrivere gli equilibri alla rotazione, essendo sufficienti le $2 \cdot p$ equazioni alla traslazione per ricavare le $2 \cdot p$ incognite spostamenti.

Non comparendo nel sistema gli equilibri alla rotazione, la soluzione del problema non dipende dal punto di applicazione delle forze *ondulatorie*.

Secondo la metodologia ampiamente illustrata in [5]/[8], la matrice [**K**] (di ordine 2*p) può essere scomposta in quattro *sottomatrici* (di ordine p); il sistema di equazioni pertanto assume la *forma*:

$$\{ \underline{\mathbf{F}}' \} = [\underline{\mathbf{K}}'] * \{ \underline{\mathbf{s}}' \}$$

$$\begin{matrix} \dot{U} & \dot{U} & \dot{U} & \dot{U} \\ \mathbf{F}_X' & \mathbf{K}_{XX} & \mathbf{K}_{XY} & \mathbf{s}_X' \\ = & & * & \\ \mathbf{F}_Y' & \mathbf{K}_{YX} & \mathbf{K}_{YY} & \mathbf{s}_Y' \\ \dot{A} & \dot{U} & \dot{A} & \dot{U} \end{matrix}$$

La matrice *traslante* della struttura spaziale [**K**'] è simmetrica e può essere considerata come una *sottomatrice* della [**K**] (par. 2.2) , eliminando cioè i termini corrispondenti alle variabili \dot{Y}_Z .

Come premesso la metodologia in questione si propone come strumento *diagnostico* sul comportamento della struttura sotto azioni *ondulatorie*. Le condizioni esaminate sono due e corrispondono all'applicazione (non contemporanea) delle azioni \mathbf{F}_X e \mathbf{F}_Y . Il vettore termine noto { **F**' } assume, nelle due condizioni di carico analizzate, i seguenti valori:

$$\begin{aligned} \text{cond. 1')} \text{ solo } \mathbf{F}_X: & \quad \{ \mathbf{F}_X, \mathbf{0} \} \\ \text{cond. 2')} \text{ solo } \mathbf{F}_Y: & \quad \{ \mathbf{0}, \mathbf{F}_Y \} \end{aligned}$$

Nel caso in cui i *controventi* siano disposti esclusivamente in piani paralleli ai X-Z e Y-Z (*tracce* parallele agli assi X ed Y), anche in questo caso la sottomatrice \mathbf{K}_{XY} e la simmetrica \mathbf{K}_{YX} sono nulle (i prodotti $\sin(\acute{O}) * \cos(\acute{O}) = 0$). In tal caso il sistema di equazioni è *disaccoppiato*, cioè le forze \mathbf{F}_X determinano solo s_{X_i} (e $s_{Y_i}=0$) e le \mathbf{F}_Y solo s_{Y_i} (e $s_{X_i}=0$); viceversa nel caso più generale (\mathbf{K}_{XY} e \mathbf{K}_{YX} non nulli) l'applicazione di forze (\mathbf{F}_X e \mathbf{F}_Y) determina sistemi di spostamenti s_{X_i} e s_{Y_i} entrambi non nulli.

La soluzione del problema (nelle incognite { **s**' }) dipende *esclusivamente* dalla geometria del sistema (rigidezza e posizione dei *controventi*) e dall'entità dei carichi agenti \mathbf{F}_X ed \mathbf{F}_Y , ma non dal loro punto di applicazione. Se si moltiplicano per uno stesso coefficiente le forze applicate, corrispondentemente variano dello stesso fattore amplificativo gli spostamenti (s_{10c}) e le forze (F_{10c}) relative ai *controventi* (la soluzione è cioè *linearmente dipendente*). Viceversa se si adotta una *differente* distribuzione di forze ondulatorie si avrà una soluzione del tutto indipendente da quella precedentemente esaminata.

2.2.4. Ricerca dei centri di taglio degli impalcati (#).

Nel precedente paragrafo è stata descritta una metodologia avente scopo *diagnostico* per l'*ottimizzazione* della distribuzione dei *controventi*. Infatti la presenza di effetti *torsionali* determina spostamenti e forze aggiuntive sugli irrigidimenti che si sommano *algebricamente* a quelle indotte dalla traslazione.

Eliminare (o almeno *limitare*) tale effetto può determinare un miglioramento nel *comportamento* della struttura per effetto delle azioni orizzontali.

La vigente normativa [9] (in C.6.1.2) *nomina* il *baricentro delle rigidzze* a proposito dell'esigenza di tenere debitamente in conto gli effetti torsionali nell'*ambito della ripartizione delle azioni orizzontali*.

Vediamo come è possibile definire i *centri di taglio* degli impalcati e descriviamo una semplice metodologia per ricercarne le coordinate.

Immaginiamo di considerare non simultaneamente agenti le distribuzioni di forze \mathbf{F}_{X_i} e le \mathbf{F}_{Y_i} ; i *centri di taglio* possono essere definiti come *quei punti ove l'applicazione delle forze orizzontali, contemporaneamente su tutti gli impalcati, determina spostamenti ma non rotazioni dei medesimi*. La definizione *ricalca* quella relativa agli *omonimi* punti nelle strutture lineari.

La conoscenza della posizione di tali punti consente di *prevedere* se le forze, applicate nei *baricentri delle masse* (se si tratta di *eccitazioni sismiche*), indurranno effetti *traslatori* accompagnati da effetti *torsionali* più o meno *marcati*.

Ovviamente la mancata coincidenza fra i *centri di taglio* e i *baricentri delle masse* induce effetti *torsionali*.

La ricerca delle coordinate di tali punti è metodologicamente assai semplice e deriva da quanto affermato nel precedente paragrafo in relazione alla *ripartizione delle azioni ondulatorie nell'ipotesi di rotazione impedita degli impalcati*.

Abbiamo detto che quando le distribuzioni di forze \mathbf{F}_{X_i} e \mathbf{F}_{Y_i} agiscono nei *centri di taglio* si determinano *traslazioni*, ma non *rotazioni* negli impalcati; ebbene la soluzione cinematica del problema è a noi già nota, avendo determinato il sistema di spostamenti $\{\underline{\mathbf{s}}'\}$ (di componenti $sX_1', sX_2', \dots, sX_p', sY_1', sY_2', \dots, sY_p'$) che si genera nell'ipotesi di $\dot{Y}_Z = 0$.

Noto $\{\underline{\mathbf{s}}'\}$ degli impalcati abbiamo altresì determinato per ciascun *irrigidimento* il sistema $\{\underline{\mathbf{s}}_{loc}'\}$ di spostamenti nel *riferimento locale* e quindi le forze $\{\underline{\mathbf{F}}_{loc}'\}$ su esso agenti ($\{\underline{\mathbf{F}}_{loc}'\} = [\underline{\mathbf{K}}_{loc}] * \{\underline{\mathbf{s}}_{loc}'\}$, essendo $[\underline{\mathbf{K}}_{loc}]$ la *matrice di rigidzza traslante o torsionale* della *sottostruttura*).

Le rotazioni \dot{Y}_Z sono impedito dal *vincolo fittizio* che abbiamo applicato agli impalcati.

Noti pertanto per ciascun *controvento* i sistemi di forze $\{\underline{\mathbf{F}}_{loc}'\}$ su essi agenti, è possibile *comporli vettorialmente* e determinare il punto di applicazione del sistema risultante $\{\underline{\mathbf{R}}'\}$.

Ovviamente nella condizione di carico nella quale agiscono soltanto le \mathbf{F}_{X_i} , per l'equilibrio $\{\underline{\mathbf{R}}'\} = \{\mathbf{F}_{X_i}\}$ e analogamente nell'altra ipotesi di carico (solo le \mathbf{F}_{Y_i}) $\{\underline{\mathbf{R}}'\} = \{\mathbf{F}_{Y_i}\}$.

Fisicamente i punti di applicazione delle risultanti ($\{\underline{\mathbf{Y}}_{C_i}\}$ quando agiscono le $\{\mathbf{F}_{X_i}\}$ e $\{\underline{\mathbf{X}}_{C_i}\}$ con le $\{\mathbf{F}_{Y_i}\}$) rappresentano i punti ove applicare le forze orizzontali per avere le traslazioni ($\{\underline{\mathbf{s}}'\}$) ma $\dot{Y}_Z = 0$; essi sono pertanto i *centri di taglio* ricercati.

E' facile effettuare anche una verifica in tal senso: basta applicare sulla struttura le distribuzioni di forze $\{\mathbf{F}_{Y_i}\}$ in $\{\underline{\mathbf{X}}_{C_i}\}$ (ponendo $\{\mathbf{F}_{X_i}\} = 0$) e successivamente $\{\mathbf{F}_{X_i}\}$ in $\{\underline{\mathbf{Y}}_{C_i}\}$ (con $\{\mathbf{F}_{Y_i}\} = 0$), determinando il sistema di spostamenti; le traslazioni dovranno appunto coincidere con $\{\underline{\mathbf{s}}'\}$, mentre le rotazioni \dot{Y}_Z dovranno essere = 0 (o meglio molto piccole, per effetto di lievi approssimazioni). La soluzione dovrà soddisfare anche l'equilibrio, cosa che il programma effettua *autonomamente* anche nella condizione

$$\dot{Y}_Z = 0.$$

Vale la pena di effettuare una breve considerazione: a proposito della *ripartizione nell'ipotesi* $\dot{Y}_Z = 0$, abbiamo visto che se si moltiplica il sistema di forze $\{ \mathbf{F}_i \}$ per uno stesso fattore, il sistema $\{ \underline{s}' \}$ di spostamenti varia *proporzionalmente* (soluzioni *linearmente dipendenti*); in tali condizioni le coordinate dei *centri di taglio* non variano.

Viceversa se si applica una distribuzione $\{ \mathbf{F}_i'' \}$ non *dipendente* dalla precedente, si otterranno degli spostamenti $\{ \underline{s}'' \}$ che non avranno alcuna relazione con i $\{ \underline{s}' \}$ precedentemente trovati e i *centri di taglio* varieranno.

Quindi i *centri di taglio non dipendono soltanto dalla geometria del sistema (e dalla sua rigidità), ma anche dall'entità delle forze applicate*. La dizione di *centri di rigidità* è pertanto quantomeno *impropria*.

2.2.5. Strutture con impalcati sfalsati (#).

Nella pratica tecnica talvolta occorre analizzare strutture nelle quali taluni *controventi incidono* su impalcati *non numerati consecutivamente* (nell'esempio l'elemento **ESAP#2** è collegato a tre diaframmi: il n. 1, il 3 ed il 5). Convenzionalmente nel seguito verranno denominate come strutture ad *impalcati sfalsati*.

Preliminarmente occorre numerare tutti gli impalcati (come al solito *ordinatamente dal basso verso l'alto*) e coerentemente riportare sugli schemi strutturali dei *controventi* (insieme alla numerazione dei nodi e degli *elementi*) la *denominazione* adottata per i *diaframmi* nella descrizione della struttura *generale* precedentemente eseguita.

Nel modulo "E.S.A.P." [1] (vedi 7.1.1.) si è introdotto il concetto di *matrice di rigidità propria* ed *espansa*, che viene nel seguito richiamata.

La metodologia (ed il significato *fisico*) per la determinazione della matrice di rigidità (*traslante o torcente*) è stata ampiamente approfondita.

L'*ordine* della matrice di *rigidità propria* è pari al numero *complessivo degli impalcati ai quali il controvento è collegato* (e quindi prescinde dalla numerazione dei medesimi nell'ambito della struttura nel suo complesso).

La matrice di *rigidità propria* costituisce una caratteristica *intrinseca* del *controvento* e prescinde dalla struttura spaziale nel quale esso verrà inserito; nell'esempio proposto precedentemente l'*ordine* della *matrice di rigidità propria* è tre.

Tale matrice vale nel *riferimento locale* e quindi per essere associata (in fase di *assemblaggio*) a quelle degli altri *controventi* nel *riferimento generale* richiede una trasformazione.

La matrice di *rigidità espansa* caratterizza il *controvento* nei confronti della struttura nel suo *complesso*: è quindi valida nel *riferimento generale*. Essa ha ordine corrispondente al *massimo numero d'impalcato al quale è collegato l'elemento*. Nell'esempio l'impalcato di *ordine più elevato sul quale il controvento incide* è il n.5 e quindi la *matrice espansa ha ordine cinque*.

Vediamo di analizzare nel seguito il *significato fisico* della *matrice espansa* a partire da quella *propria*.

Il termine $\mathbf{K}(\mathbf{i}; \mathbf{j})$ della matrice di *rigidità propria* rappresenta la reazione che nasce al piano \mathbf{i} per effetto di un cedimento al piano \mathbf{j} , avendo semplicemente numerato nel *riferimento locale* gli impalcati in modo consecutivo, senza tener conto della denominazione che i diaframmi assumono nel contesto della struttura *generale*. Tale matrice può ottenersi dalla $[\underline{\mathbf{D}}]$ per *inversione* ($[\underline{\mathbf{K}}] = [\underline{\mathbf{D}}]^{-1}$), come effettua il modulo "E.S.A.P." [1] (vedi 7.1.1.).

Consideriamo adesso il *controvento* dell'esempio, come inserito nel contesto spaziale: esso non è

collegato agli impalcati n. 2 e 4. Imponendo pertanto a tali diaframmi i cedimenti unitari, l'elemento, a loro non collegato, non subirà alcuna deformazione rimanendo *inerte* e quindi *le reazioni dei vincoli fittizi saranno tutte nulle*.

Viceversa imponendo i cedimenti degli impalcati collegati al *controvento* (n. 1, 3 e 5 nell'esempio) nasceranno reazioni, non *nulle*, solo in corrispondenza dei *diaframmi controventati*, di intensità pari a quelle precedentemente trovate nella costruzione della matrice *propria*.

I vincoli corrispondenti agli impalcati non collegati infatti non intervengono in alcun modo e quindi *deformata e comportamento del controvento* sono gli stessi che si sono evidenziati nella costruzione della matrice *propria* (**Fig. 1**).

In conclusione la matrice *espansa* ha *ordine pari al massimo impalcato collegato* (5x5 nel caso in esame) e presenta termini *nulli relativamente alle righe e colonne corrispondenti ai diaframmi non controventati* (quindi sono *nulli i termini $\mathbf{K}_{(i,j)}$ con i e j pari a 2 e 4*). Dei 25 termini disponibili della matrice 5x5 ne rimangono *significativi* solo 9, pari cioè al numero degli elementi della matrice *propria*. Operativamente basta allora *espandere la matrice propria inserendo degli zeri nelle righe e colonne corrispondenti agli impalcati non collegati* (secondo la numerazione *generale*). Da tale procedimento deriva la denominazione di *matrice espansa*.

Quanto esposto a proposito della matrice di rigidezza ovviamente vale anche per il *vettore laterale*.

Ovviamente non compete alcuna azione ($F_{Ioci}=0$) in corrispondenza dell'impalcato (*i*) *non collegato*; in tale condizione il programma stampa $F_{xi}=0$ (oppure $M_{zi}=0$) nonché il valore dello spostamento che competerebbe al *controvento* al livello *i* in base alla *composizione del moto rigido*.

Appaiono immediate le possibilità che tale *modellazione* offre, potendo così in assoluta semplicità analizzare strutture che, per esempio, presentano *arretramenti* negli impalcati oppure più impalcati alla stessa quota ma fra loro non collegati, ampliando il campo applicativo a molti edifici (come quelli pubblici) che spesso *sfuggono* alle limitazioni imposte dai *codici di calcolo* correnti.

Nell'esempio accluso al presente manuale vi è una struttura che presenta la particolarità di avere gli impalcati non estesi a tutti i *controventi*. Pertanto ciascun *elemento* non *incide* su *tutti i diaframmi* ma solo su alcuni; inoltre la numerazione che essi assumono nel contesto *generale* è *non consecutiva*.

3. Grafica a supporto dell'analisi numerica (#).

Il package offre un supporto grafico che consente una completa visualizzazione della struttura; tale strumento, per altro esplicitamente richiesto dalla vigente normativa [10]/[11] e sollecitato dagli Organi di controllo *periferico*, consente all'Utente di effettuare un'azione *diagnostica*, in fase di *modellazione*, e di *documentazione*, nella redazione della *relazione di calcolo*.

Con riferimento ai *controventi* descritti nel modulo "E.S.A.P.", il package consente di effettuare *opzionalmente*:

- **disegno degli schemi strutturali** delle *sottostrutture* (in scala unica);
- **disegno delle piante schematiche** degli impalcati, che consente di evidenziare per ciascun *diaframma* ed in scala, gli irrigidimenti *collegati*, le sezioni dei *pilastri* e dei *pannelli* (rettangolari, a "T", circolari o *generiche*, indicate convenzionalmente con una croce) e gli assi delle *travi* presenti;
- **assonometrie schematiche** della struttura osservata nel verso positivo delle Y (*posteriormente*) e negativo (*anteriormente*), con due viste *dimetriche* ed una *isometrica*.

4. Gestione della procedura (#).

Il package "B.A.C." si comporta come un *guscio (shell)* che coordina le procedure svolte dai *moduli* componenti ("E.S.A.P.", "PESI", etc); inoltre provvede (*main program*) alla fase di *ripartizione* delle azioni orizzontali ed alla grafica di *supporto*.

Pertanto il menù di gestione si limita a consentire gli accessi ai singoli *moduli esterni* ed alle fasi di input e correzione, per le quali si sono adottate le stesse modalità descritte nel modulo "E.S.A.P." cui si rimanda per ogni ulteriore approfondimento [1] (vedi capitolo 10).

Per quanto attiene l'input, esso riguarda il testo identificatore, le azioni d'impalcato (permanenti ed ondulatorie) e i numeri di *file iniziale* e *finale* contenenti i dati dei *controventi*.

5. Garanzia.

La durata della garanzia del *supporto fisico* del programma è di sei mesi dalla data di consegna ed è limitata a danni indipendenti da uso scorretto da parte dell'Utente.

Entro tali condizioni, verrà fornita una nuova copia del package, dietro corresponsione delle spese di supporto magnetico e di spedizione; si consiglia comunque di effettuare una copia di backup dei programmi originali. La *chiave hardware*, fornita a corredo del package, resta di proprietà dell'autore del programma.

6. Assistenza.

Non è dovuta all'Utente alcuna forma di assistenza o di consulenza; è comunque possibile stipulare un contratto di assistenza telefonica e/o di manutenzione del software (che prevede l'automatica fornitura degli aggiornamenti e delle nuove versioni del package).

Salvo quanto precedentemente espresso, l'autore non è in alcun modo tenuto all'aggiornamento delle versioni precedentemente fornite.

7. Responsabilità.

L'autore *non rilascia alcuna garanzia*, neppure implicita, riguardo l'esattezza del programma e pertanto in nessun caso lo si potrà ritenere responsabile per danni diretti ed indiretti causati dalla eventuale inesattezza dei risultati ottenuti.

Appendice A package B.A.C.: Bibliografia.

- [1] **Package "E.S.A.P."** Manuale Utente
Alberto Cucinella

- [2] **PAS (Procedure di Analisi Strutturale)** Manuale Utente
Alberto Cucinella

- [3] **L'analisi agli Elementi Finiti (FEA) nell'ingegneria civile e problemi connessi alla modellazione strutturale**
Alberto Cucinella
Ingegneria con il computer (1987 n.7/8 pagg.10/19)
Edizioni di Scienza e Tecnica (Milano)

- [4] **Edifici soggetti a forze orizzontali: calcolo automatico**
Michele Capurso
Edizioni Cremonese

- [5] **Appunti delle lezioni di dinamica delle strutture ed Ingegneria Sismica**
Roberto Ramasco

- [6] **Elementi di costruzioni antisismiche**
Mario Como - Giorgio Lanni
Edizioni Cremonese

- [7] **T.A.B.S.77: Three dimensional Analysis of Building Systems**
E.L. Wilson - A. Habiballah
EERC report nr 72/8

- [8] **La progettazione delle strutture in cemento armato in zona sismica**
Roberto Ramasco
C.I.S.M. Udine

- [9] **D.M. Ministero Lavori Pubblici 24.01.1986: Norme tecniche relative alle costruzioni sismiche.**

- [10] **Legge Regione Campania 07.01.1983 N.9: Norme per l'esercizio delle funzioni regionali in materia di difesa del territorio dal rischio sismico.**

- [11] **Norme C.N.R. 10024/86: Analisi di strutture mediante elaboratore - impostazione e redazione delle relazioni di calcolo.**

Indice

1. Generalità.	1
1.1. Note per gli Utenti del package "SPACE".	2
2. Metodologia di calcolo (#).	5
2.1. Ipotesi adottate (#).	5
2.2. Metodo di calcolo (#).	6
2.2.1. Azioni orizzontali e risultati del calcolo (#).	8
2.2.2. Effetto dei carichi permanenti (#).	10
2.2.3. Ripartizione delle forze ondulatorie nell'ipotesi di rotazione $\dot{Y}Z$ impedita degli impalcati (#).	12
2.2.4. Ricerca dei centri di taglio degli impalcati (#).	15
2.2.5. Strutture con impalcati sfalsati (#).	16
3. Grafica a supporto dell'analisi numerica (#).	19
4. Gestione della procedura (#).	19
5. Garanzia.	19
6. Assistenza.	20
7. Responsabilità.	20
Appendice A package "B.A.C.": Bibliografia.	21