

ESCED - PROGRAMA PARA O ESTUDO COMPLETO DE EDIFÍCIOS

L.M.C. SIMÕES (1)

SUMARIO: Este programa de computador destina-se à análise linear de edifícios. As acções sísmicas podem ser tratadas quer através dos espectros de resposta, quer através da integração dos espectros de potência, para diversos acelerogramas.

As possibilidades deste sistema de maior realce são:

1. Capacidade para modelar o comportamento tridimensional dos edifícios;
2. Capacidade para representarem comportamentos de pavimentos de vários tipos: flexíveis, com aberturas ou actuando como diafragmas rígidos);
3. Capacidade para integrarem paredes resistentes (com aberturas) e outros tipos estruturais de contraventamento;
4. Capacidade para representarem fundações flexíveis.

Os espectros de resposta estrutura-pavimento podem ser gerados neste programa que também permite a utilização de pré e pós processadores, embora de momento o tratamento seja apenas numérico. Trata-se de um conjunto de subrotinas, que embora extensa (cerca de 15000 instruções em Fortran), permite que sejam elaborados estudos paramétricos capazes de fornecer orientações relativamente à concepção de edifícios.

1. INTRODUÇÃO

Um número crescente de edifícios tem sido construídos em zonas de elevado risco sísmico. A integridade estrutural desses edifícios durante ocorrências sísmicas severas é essencial de modo a minimizar perdas humanas nas proximidades do edifício e de funcionalidade do edifício depois do sismo, o que é bastante gravoso em equipamentos colectivos.

Para que um engenheiro possa assegurar uma eficiência satisfatória do projecto, é necessário utilizar simultaneamente os conhecimentos da análise estrutural e os resultados obtidos através dela para a partir daí se poder conceber a estrutura do edifício e estabelecer os detalhes construtivos com maior rigor. Há disponíveis no mercado de informática um grande número de programas bastante completos para análise de estruturas [WILSON, E.L. e DOVEY, H. H. (1975)], embora não tirem partido das características resistentes e geométricas dos edifícios correntes e sejam limitados por uma manipulação difícil exigindo grande trabalho por parte do operador.

(1) Eng. Civil, Professor Associado
Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra

Alguns dos programas de análise tridimensional de edifícios baseiam-se na hipótese de comportamento rígido dos pavimentos. O programa que aqui se apresenta (ESTudo Completo de EDifícios) permite que as estruturas tenham diafragmas flexíveis. Outra grande vantagem deste programa é a modelação numérica das paredes resistentes: Utiliza-se uma técnica de subestruturação automática que permite ao utilizador gerar uma malha de elementos finitos em cada uma das paredes resistentes do edifício, sendo portanto possível a definição das aberturas. Os graus de liberdade deste conjunto resistente são condensados num superelemento.

Além disso, é possível modelar explicitamente a flexibilidade da fundação. Considera-se em cada um dos apoios 6 graus da liberdade (três rotações e três deslocamentos) que podem servir de base aos pilares ou a um ensoleiramento. O tipo de acções que estão previstas são cargas verticais e horizontais com valores fixos, cargas horizontais geradas por sismos, cargas originadas por espectros de resposta e cargas dinâmicas.

Em síntese, o ESCED assenta num conjunto sofisticado de programas de análise estrutural, que permite a introdução dos dados numa forma bastante simplificada. Está neste momento a ser preparada a sua ligação a pós-processadores gráficos de modo a permitir uma interpretação mais imediata dos resultados.

2. IDEALIZAÇÃO DA ESTRUTURA

Neste parágrafo é abordada a formação e assemblagem da rigidez dos elementos tendo em vista a definição da rigidez que caracteriza a estrutura. Neste trabalho descrevem-se as transformações operadas pelo seu efeito específico, não sendo indicada a formulação matemática que utiliza para não o tornar demasiado extenso

2-1. Estrutura Genérica

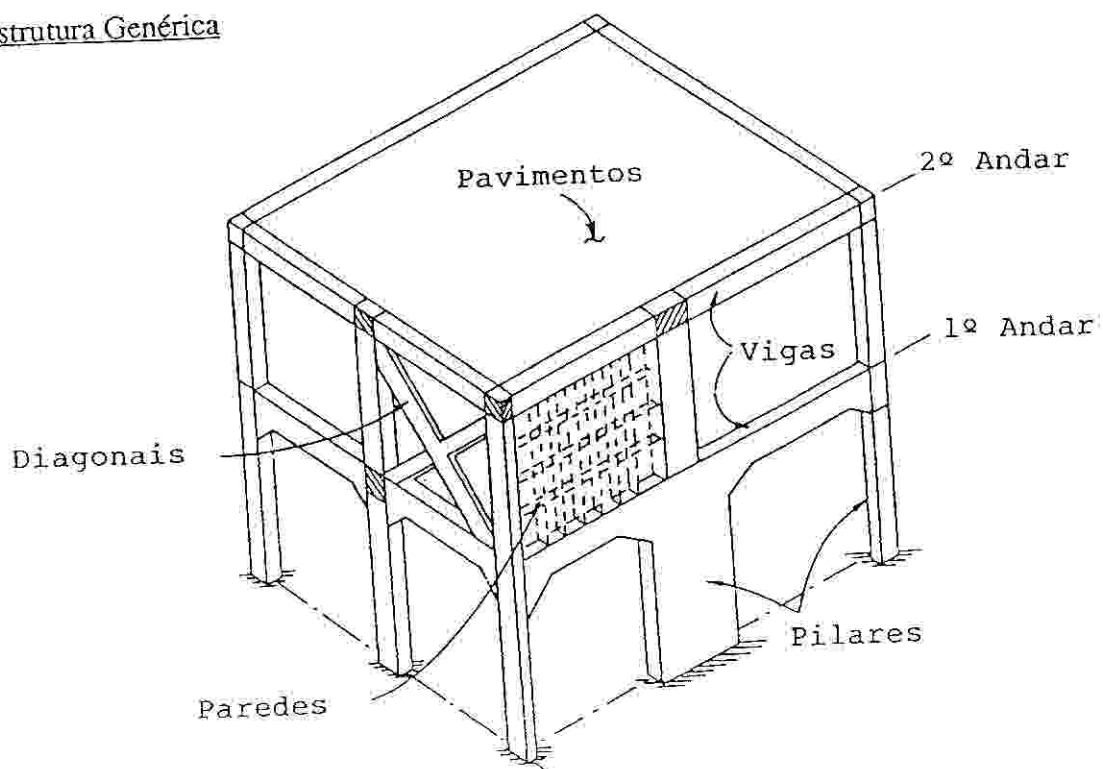


Figura 1

Os edifícios que podem ser resolvidos por este programa são descritos geometricamente pelo posicionamento dos pilares (localização em planta arbitrária), vãos (vão teórico entre dois pilares) e altura dos andares (distância vertical entre a superfície média dos andares). A rigidez do edifício é assemblada a partir de elementos estruturais que estão localizados no mesmo nível do piso ou entre pisos. Cada pilar, cruz de Santo André e parede resistente vai ligar nós pertencentes a dois andares adjacentes (figura 1).

Desde modo não é necessário que o utilizador especifique as coordenadas dos nós, sendo a localização dos elementos apenas definidas pelos andares e vãos. A assemblagem do conjunto da estrutura é executada andar a andar e de cima para baixo, sendo o sistema de equações resolvido por blocos.

2-2. Rigidez Lateral

Quando se considera o comportamento dinâmico dos edifícios, a resposta preponderante a acções sísmicas é lateral, ou seja: Os deslocamentos horizontais, forças de inércia e acelerações produzem efeitos mais importantes na estrutura que as acções verticais. Estes deslocamentos laterais são caracterizados por um número limitado de graus de liberdade em cada andar. A matriz de rigidez utilizada na resolução dos problemas dinâmicos é obtida por condensação da matriz de rigidez total tomando apenas os graus de liberdade laterais, e em que as incógnitas são os nós principais de cada andar.

Cada nó da estrutura está associado a seis graus de liberdade. Este número é reduzido se houver agrupamentos: Dois dos deslocamentos horizontais e a rotação em torno do eixo vertical são transformados em graus de liberdade laterais dos nós principais do andar (em número de 1 ou 2). O deslocamento vertical e as duas rotações restantes continuam a ser graus de liberdade locais. Os graus de liberdade locais são numerados em primeiro local, antecedendo os graus de liberdade laterais. A matriz de rigidez lateral é calculada a partir da condensação estática dos graus de liberdade locais. Calculam-se as soluções para todas as condições de carregamento que correspondem à matriz de rigidez total, e a partir dos deslocamentos obtidos determinam-se as forças nos membros por retrosubstituição.

2-3. Rigidez dos Elementos

A rigidez de cada elemento é em primeiro lugar formulada em termos das suas deformações. Expressam-se estas deformações em termo dos deslocamentos nas extremidades dos membros. Estes deslocamentos são por sua vez escritos em termos dos deslocamentos laterais dos pavimentos e deslocamentos locais.

2-3-1. Graus de Liberdade do Pavimento e Transformações

Relativamente ao número de graus de liberdade do pavimento, existem três tipos de nós (figura 2):

- (i) Nó livre, representando um pilar que não está ligada ao pavimento e que possui seis graus de liberdade;
- (ii) Nó ligado, representando um pilar que se comporta em conjunto com o pavimento, e que possui três graus de liberdade - translacção vertical e rotações em torno dos dois eixos horizontais;
- (iii) Nó principal, que serve essencialmente para estudar o comportamento de estrutura submetida a acções horizontais. Este tipo de nó possui três graus de liberdade: duas translacções horizontais e uma rotação em torno do eixo vertical.

As transformações do pavimento ligam as duas translacções horizontais e a rotação em torno do eixo vertical num ponto de um pilar aos graus de liberdade dos nós principais, permitindo exprimir

a rigidez dos elementos em termos dos deslocamentos globais.

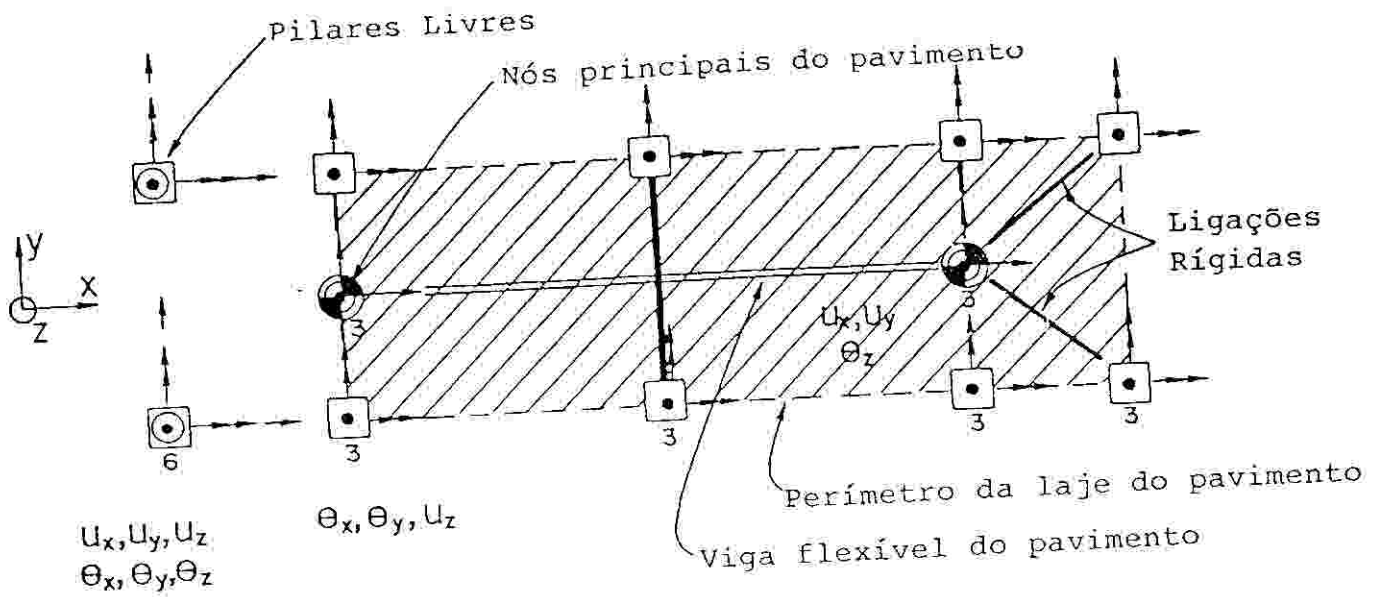


Figura 2

Num pavimento rígido, um pilar está directamente ligado a nós do pavimento. Para modelar o comportamento de pavimentos flexíveis, pode assumir-se que o pilar está ligado a uma viga de pavimento que liga dois nós principais do pavimento quaisquer. Quando esta viga se deforma sob a acção da carga aplicada, e supondo válida a hipótese de Navier-Bernoulli, calcula-se a posição em planta do pilar em termos dos deslocamentos laterais dos nós principais (figura 3). Deste modo, as deformações do eixo da viga de pavimento são obtidas a partir de funções de interpolação que são polinomiais cúbicos.

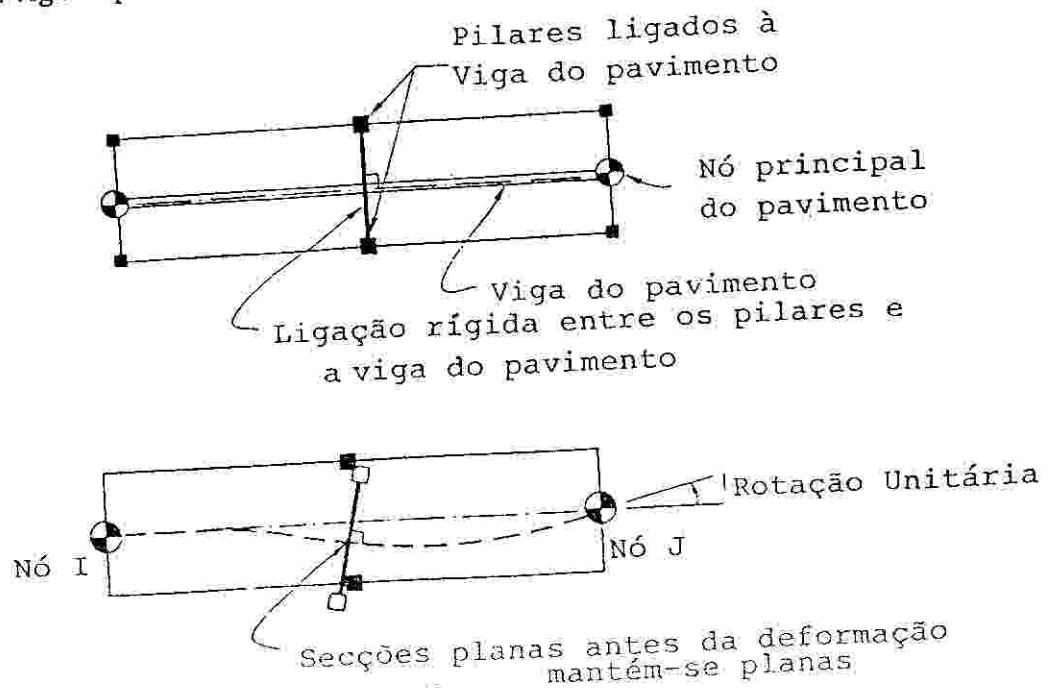


Figura 3

2-3-2. Rigidez das Vigas e dos Pilares

A rigidez das vigas e dos pilares é definida em termos do conjunto habitual de 6 deformações: as duas rotações que resultam da flexão nas extremidades dos membros, a deformação axial e por torção. A rigidez local inclui o efeito das deformações por esforço transversal. Supõe-se que os pilares são prismáticos, mas é possível introduzir coeficientes de rigidez para os membros do tipo viga, o que permite serem considerados com comportamento não prismático.

A rigidez à deformação local é transformada no conjunto de deslocamentos dos nós indicados na figura 4. Esta transformação inclui os efeitos de bloqueamentos nas extremidades das vigas e pilares. Por fim, a rigidez é expressa em termos dos graus de liberdade laterais nos nós principais e locais através da transformação do pavimento.

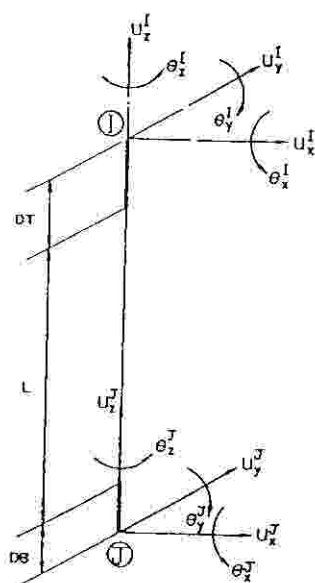


Figura 4

2-3-3. Rigidez Diagonal

As cruzes de Santo André tem só um tipo de deformação axial. A rigidez local é expressa em termos do encurtamento ou alongamento do membro, por sua vez transformada nas coordenadas locais de deslocamento nodais e em seguida em graus de liberdade laterais, tal como se tratasse de uma viga ou de um pilar.

2-3-4. Rigidez das Paredes Resistentes

Utiliza-se a técnica de subestruturação para considerar as paredes resistentes. O superelemento parede tem as dimensões físicas de um vão (na direcção horizontal) e de um andar (direcção vertical). O número de subelementos no superelemento é especificado pelo utilizador, sendo o número máximo cinco. Cada subelemento é um elemento isoparamétrico de quatro nós sujeito a um estado de tensão plano e está associado a uma espessura (que é nula no caso de aberturas).

A técnica de subestruturação consiste no seguinte: o utilizador identifica à partida todos os tipos de elementos na estrutura, definindo a geometria, configuração da malha e espessura. Cada um desses tipos de parede é assemblado num superelemento:

(1) A rigidez local de cada elemento isoparamétrico de quatro nós é directamente incluída no superelemento;

(2) As vigas rígidas são assembladas dentro da malha de modo a assegurar rigidez relativamente às rotações. Na figura 5 pode observar-se que as vigas ligam um nó de canto a um nó adjacente pertencente ao superelemento parede onde estão articuladas. Nesse ponto o momento é transferido à parede através de um binário nas duas extremidades da viga;

(3) O grau de liberdade interiores são condensados e o superelemento fica apenas com os graus de liberdade associados aos nós na periferia da parede.

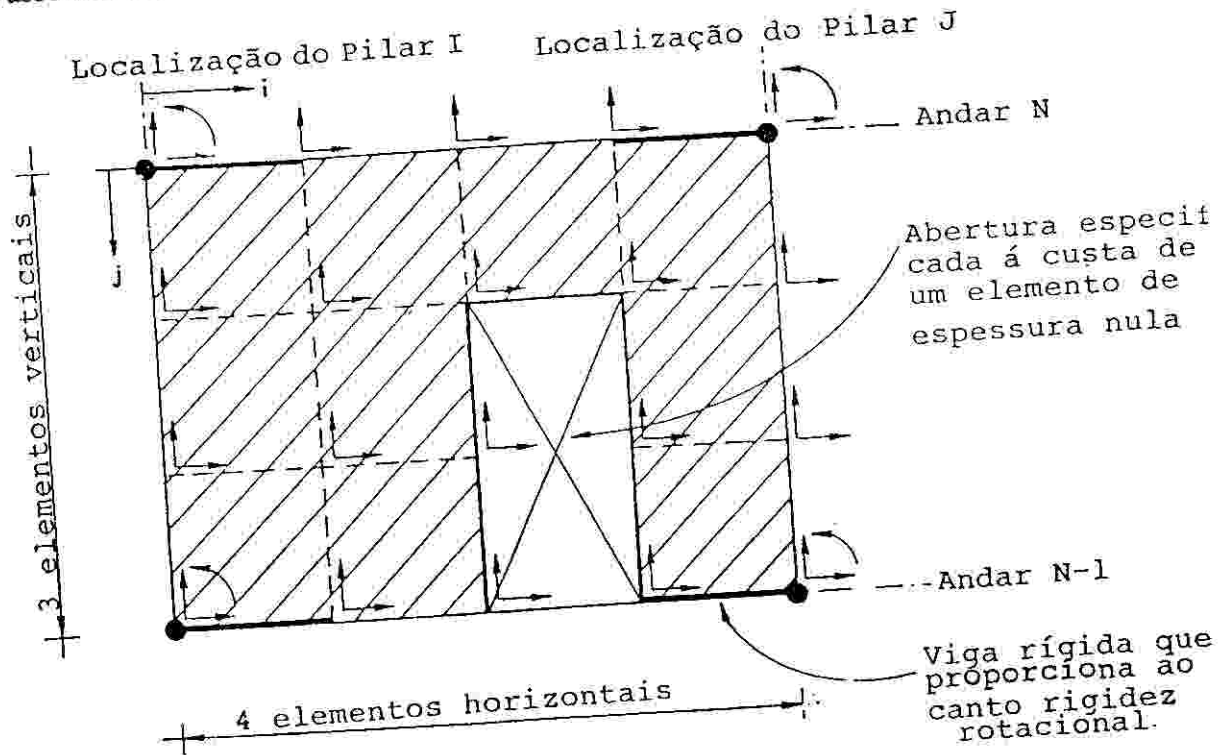


Figura 5

Depois de se ter formado o superelemento parede, este é transformado (tal como os elementos dos outros tipos) em termos da rigidez associada aos graus de liberdade lateral. Além destes consideram-se graus de liberdade locais em nós da periferia da parede resistente. Nos nós de canto adjacente - pilar. Além disso é imposta compatibilidade entre superelementos adjacentes e as malhas respectivas tem de ser geometricamente compatíveis.

2-3-5. Rigidez do Pavimento

O elemento rígido pavimento é uma viga com resistência em duas direcções perpendiculares, deformando-se apenas na perpendicular à sua superfície média. O elemento roda por flexão em cada extremidade e possui um grau de liberdade axial. As extremidades podem ser encastradas e inclui-se na formulação as deformações provocadas pelo esforço transversal (figura 6).

A rigidez à deformação é transformada numa rigidez discretizada nos graus de liberdade lateral dos dois nós a que o pavimento está ligado.

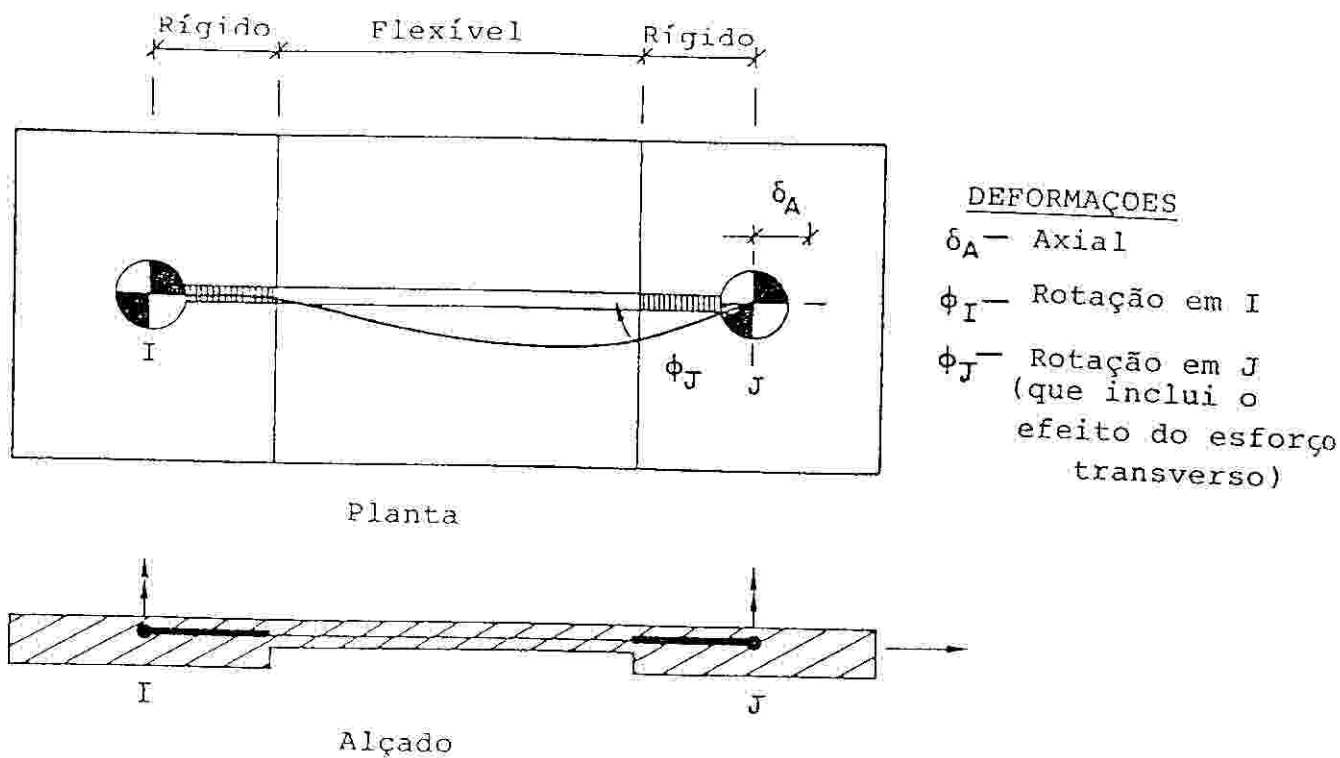


Figura 6

2-3-6. Rigidez da Fundação

A rigidez da fundação é introduzida no modelo através de apoios elásticos. Caso as flexibilidades dos apoios não sejam indicadas, considera-se o edifício encastrado na base. Existem três tipos de apoios:

- (i) Mola individual com seis valores de rigidez separadas que se coloca na base de cada um dos pilares;
- (ii) Conjunto de pilares ligados a uma mola com seis valores de rigidez;
- (iii) Combinação de (i) e (ii).

A rigidez destes elementos é assemblada directamente, sendo associada aos graus de liberdade na base do modelo. Pilares articulados na fundação são modelados atribuindo aos apoios elásticos valores de rigidez rotacional nula e supondo que a rigidez transversal é elevada.

2-4. Propriedades da matriz das massas

Os edifícios respondem dinamicamente aos sismos através de deslocamentos horizontais nos nós principais dos andares. Por esse motivo, as massas são discretizadas nesses nós dos pavimentos. A matriz das massas é diagonal e pode ser gerada de uma das duas maneiras seguintes:

- (i) Especificar directamente a massa rotacional e transversal em cada nó principal;
- (ii) Geração automática dessas propriedades a partir de valores discretos da massa definidos pelo utilizador na intersecção de cada pilar e pavimento. Apesar de em (ii) a distribuição de massa transversal ser correcta, a inércia rotacional é sobreestimada, podendo afectar as características dinâmicas à torção do modelo.

3. TIPOS DE ACÇÕES

3-1. Cargas Verticais Estáticas

Há disponível uma biblioteca com diferentes padrões de carregamento, a que se junta informação relativa ao posicionamento e intensidade das cargas. O padrão de carga contém o tipo de carga vertical: força concentrada ou momento, carga uniformemente distribuída ou distribuída com variação linear e a distância que permite localizar a carga na viga.

3-2. Cargas Laterais Estáticas

As cargas laterais estáticas só podem ser aplicadas aos nós principais dos pavimentos.

3-3. Análise por Espectros de Resposta

Podem-se utilizar dois espectros de resposta do solo, que são introduzidos com qualquer ângulo relativamente ao edifício. Em primeiro lugar é efectuada a análise dos valores próprios que corresponde a matriz de rigidez lateral e das massas. As respostas máximas dos modos são adicionadas utilizando a técnica de combinação quadrática completa [WILSON, DER KIUREGHIAN, A. e BAYO, E. P. (1981)]. A principal vantagem deste método relativamente à raiz quadrada da soma dos quadrados é que entra em linha de conta com a interacção entre os modos de vibração, que é significativa se as frequências estiverem próximas.

3-4-2. Análise das Duas Componentes do Espectro do Solo

Uma estrutura bem projectada deve resistir da mesma maneira a sismos com qualquer direcção. Normalmente na análise dinâmica de estruturas consideram-se duas análises espectrais perpendiculares entre si. Os resultados obtidos são combinados de uma forma arbitrária de modo a produzir estimativas dos esforços máximos nas secções críticas da estrutura. Quando as estruturas são rectangulares e tem grande regularidade, estes resultados são razoáveis.

Contudo em estruturas complexas com comportamento tridimensional, como é o caso dos edifícios a direcção dos sismos que produz os esforços máximos tem de ser determinada. Para ultrapassar a dificuldade desse cálculo ser efectuado por tentativas, utiliza-se um método aproximado que consiste em efectuar duas análises unidireccionais dos espectros de resposta com o espectro máximo aplicado nas duas direcções ortogonais. As intensidades obtidas a partir de cada uma dessas análises são utilizadas como coeficientes de influência para o cálculo das tensões principais. Estes resultados dão a resposta máxima do edifício submetido simultaneamente ao espectro maior numa direcção e a um espectro proporcional a este (em todas as frequências) na direcção perpendicular [WILSON, E.L. e BUTTON, M.R. (1982)].

3-4. Análise Temporal da Resposta Dinâmica de Estrutura

Efectua-se a análise temporal da resposta dinâmica da estrutura a um acelerograma do solo, transformando as equações matriciais de equilíbrio dinâmico na forma não acoplada. Em cada um dos modos é efectuada uma integração explícita que se baseia na hipótese de que a aceleração do solo é linear entre dois valores discretos. Uma vez obtidas as soluções para cada um dos modos, realiza-se a transformação inversa de coordenada modais para unidades físicas. Adicionam-se os resultados obtidos, chegando-se a uma solução exacta.

3-4-1. Espectro de Resposta do Pavimento

Quando se efectua a análise temporal da resposta dinâmica da estrutura, pode gerar-se o espectro de resposta de cada um dos pavimentos nas duas direcções perpendiculares, utilizando para isso os valores das acelerações.

BIBLIOGRAFIA

1. WILSON, E.L. e DOVEY, H. H., "Three Dimensional Analysis of Building Systems - (Extended Version)", Report EERC 75-13 (1975) University of California, Berkely, USA.
2. WILSON, E.L., DER KIUREGHIAN, A. e BAYO, E. P., "A Replacement for the SRSS Method in Seismic Analysis", Earthquake Engineering and Structural Dynamics Vol. 9 (1981) 187-194.
3. WILSON, E.L. e BUTTON, M.R. "Three Dimensional Dynamic Analysis for multicomponent Earthquake Spectra", Earthquake Engineering and Structural Dynamics Vol. 10 (1982) 471-476.