

ANALISE APROXIMADA DE EDIFICIOS ALTOS
EM MICROCOMPUTADORES

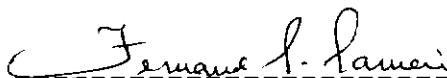
JORGE LUIZ SILVA

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS PROGRAMAS DE
PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE
JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSARIOS PARA A OBTENÇÃO
DO GRAU DE MESTRE EM CIENCIAS (M. Sc.) EM ENGENHARIA CIVIL.

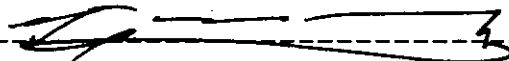
Aprovada por:



HUMBERTO LIMA SORIANO
(Presidente)



FERNANDO LUIZ LOBO B. CARNEIRO



FERNANDO VENANCIO FILHO



MARCELO GATTASS

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

JUNHO DE 1986

SILVA, JORGE LUIZ

Análise Aproximada de Edifícios Altos em
Microcomputadores (Rio de Janeiro) 1986.

xi, 91 p., 29,7 cm (COPPE/UFRJ, M.Sc.,
Engenharia Civil, 1986)

Tese - Universidade Federal do Rio de Janeiro,
COPPE.

1. Estruturas

I. COPPE/UFRJ

II. Título (série)

Aos meus pais

João Baptista Silva e

Maria Aparecida Bertolaci Silva

AGRADECIMENTOS

Aos professores da COPPE/UFRJ, e em especial ao Prof. Humberto Lima Soriano pelos conhecimentos transmitidos e orientação ao longo de todo o trabalho.

Aos meus pais e irmãos, pela confiança, incentivo e apoio durante a minha permanência nesta cidade.

Aos meus tios João Amaral e Maria do Carmo (Lili) e primos pelo sincero acolhimento, proporcionando um convívio alegre e saudável.

A Liliana, pelo apoio e incentivo.

A CAPES, pelo apoio financeiro.

Aos funcionários da Biblioteca, da Secretaria do Programa COPPE/CIVIL e do NCE pelos valiosos serviços prestados.

Aos colegas Fernando Amorim, José Antonio, Luiz Antonio, Pedro Sá, Julian, Minoro, Adolfo, Miguel, Tereza, Raimundo Calixto, Carlos, Eduardo Rizzati, Fernando Luiz, Emil, Lygia, Sebastião, João Haas, Milek, entre outros, pelo agradável convívio, pelas sugestões e colaboração.

Ao Prof. Landau, pelo apoio, incentivo e integração junto ao corpo discente.

Ao Gilberto, pela valiosa colaboração.

RESUMO DA TESE APRESENTADA A COPPE/UFRJ COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSARIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE
MESTRE EM CIENCIAS (M.Sc.)

ANALISE APROXIMADA DE EDIFICIOS ALTOS
EM MICROCOMPUTADORES

JORGE LUIZ SILVA

Junho de 1986

Orientador: Humberto Lima Soriano

Programa: Engenharia Civil

O presente trabalho objetiva a análise de esforços em estruturas de edificios altos por meio de microcomputadores de pouca quantidade de memória RAM. A análise automática é relevante no caso de carregamento lateral de vento, quando então os processos normais de cálculo não conduzem a resultados confiáveis.

Para um microcomputador compatível com o APPLE II, de 48 Kbytes de memória RAM, foi utilizado neste trabalho, o modelo estrutural formado de painéis (pórtico, pilares-parede e/ou suas associações) com as lajes trabalhando como diafragmas, compatibilizando os deslocamentos horizontais. Foram considerados nós excêntricos, elementos de contraventamento, apoios elásticos, deslocamentos diferenciais de apoio e a possibilidade de qualquer variação de elementos estruturais ao longo da altura.

A programação foi desenvolvida em BASIC, com um pré-processador que permite amplas facilidades ao usuário, e um processador que faz um aproveitamento máximo de memória RAM com o mínimo de transferências com as memórias auxiliares. O pós-processador oferece uma boa formatação para o relatório dos resultados obtidos.

Os exemplos analisados permitiram concluir da validade do modelo adotado para o projeto da maior parte dos edificios altos correntes e a programação desenvolvida mostrou-se ser uma excelente ferramenta para este objetivo.

ABSTRACT OF THESIS PRESENTED TO COPPE/UFRJ AS PARTIAL
FULFILLMENT OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF
MASTER OF SCIENCE (M.Sc.)

APPROXIMATED ANALYSIS OF TALL BUILDINGS
IN MICROCOMPUTERS

JORGE LUIZ SILVA

June, 1986

Chairman: Humberto Lima Soriano
Department: Civil Engineering

This work deals with the structural analysis in microcomputer with little RAM memory. For wind loads the manual methods yield bad results and therefore the computer analysis is very important.

A microcomputer with 48 Kbytes of RAM memory compatible with the APPLE II was used. A group of plane components (plane frames, shear walls and their combinations) with compatible horizontal displacements by the action of horizontal rigid slabs forms the structural model. Offset and bracing members, elastic supports, prescribed displacements and a random variation of the structural elements may be considered in this model.

The code was developed in BASIC language. It has a powerful pre processor and a processor which deals efficiently with the RAM memory and auxiliary memories. The post processor offers good reports of results.

The examples analyzed have shown the good performance of the adopted model for the most usual tall buildings and the computer program has shown to be a very good tool for their analyses.

INDICE

CAPITULO I - INTRODUÇÃO.....	01
CAPITULO II - MODELO ESTRUTURAL.....	05
II.1 - Características e hipóteses do modelo...	05
II.2 - Sistemas de referências.....	07
II.2.1 - Sistema de referência global.....	07
II.2.2 - Sistema de referência de painel.....	08
II.3 - Paineis.....	08
II.3.1 - Graus de liberdade dos paineis.....	09
II.4 - Vigas.....	10
II.5 - Pilares.....	11
II.6 - Elementos de contraventamento.....	12
CAPITULO III - PROPRIEDADES DOS ELEMENTOS ESTRUTURAIS E MUDANÇA DE EIXOS.....	13
III.1 - Propriedades dos elementos vigas.....	13
III.1.1 - Sistema de referência local e graus de liberdade.....	13
III.1.2 - Matriz de rigidez.....	13

IV.2.4 - Deslocamentos horizontais de painel.....	45
IV.2.5 - Cargas horizontais de painel...	46
IV.3 - Análise de deslocamentos e esforços nos elementos estruturais.....	47
IV.3.1 - Matriz de rigidez de painel para um andar i.....	48
IV.3.2 - Resolução do sistema de equações.....	48
IV.3.3 - Esforços nas extremidades dos elementos.....	49
IV.3.3.1 - Elemento viga.....	49
IV.3.3.2 - Elemento pilar.....	49
IV.4 - Considerações gerais.....	50
IV.4.1 - Pontos nodais.....	50
IV.4.1.1 - Acrescimento de pontos nodais.....	51
IV.4.1.2 - Eliminação de pontos nodais.....	51
IV.4.2 - Montagem da matriz de rigidez reduzida de painel para um andar i, Sr_{pi}	52
IV.4.3 - Montagem da matriz de rigidez de painel para um andar i, Sp_i	53
IV.4.4 - Reordenação da matriz Sr_{pi} para inclusão de pontos nodais.....	53

IV.4.5 - Reordenação da matriz Sr_{pi} para exclusão de pontos nodais.....	54
IV.4.6 - Reordenação da matriz S_{pi} para inclusão e exclusão de pontos nodais.....	55
CAPITULO V - PROGRAMAÇÃO AUTOMÁTICA.....	56
V.1 - Generalidades.....	56
V.2 - Programas.....	57
V.2.1 - MENU.....	57
V.2.2 - DADOS1.....	58
V.2.3 - DADOS2.....	60
V.2.4 - RELAT1.....	61
V.2.5 - RELAT2.....	61
V.2.6 - RIG1.....	61
V.2.7 - RIG2.....	62
V.2.8 - GAUSS.....	62
V.2.9 - FORCA.....	62
V.2.10 - ESF1.....	63
V.2.11 - ESF2.....	63
V.2.12 - ESF3.....	64
V.2.13 - RESULT.....	64
CAPITULO VI - EXEMPLOS E CONCLUSÕES.....	65
VI.1 - Exemplos.....	65
VI.1.1 - Exemplo 1.....	65

VI.1.1.1 - Planta baixa.....	65
VI.1.1.2 - Especificações.....	65
VI.1.1.3 - Resultados.....	66
VI.1.2 - Exemplo 2.....	68
VI.1.2.1 - Planta baixa.....	68
VI.1.2.2 - Especificações.....	68
VI.1.2.3 - Resultados.....	70
VI.1.2.4 - Considerações gerais.....	76
VI.1.3 - Exemplo 3.....	77
VI.1.3.1 - Planta baixa.....	77
VI.1.3.2 - Especificações.....	79
VI.1.3.3 - Resultados.....	79
VI.1.3.4 - Considerações gerais.....	84
VI.2 - Conclusões.....	84
APENDICE 1.....	87
APENDICE 2.....	88
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	89

I - INTRODUÇÃO

A análise de esforços em estruturas de edifícios altos deve ser feita através de modelos que traduzam de maneira satisfatória o problema físico real.

Com o advento do computador, passou-se a utilizar modelos estruturais mais sofisticados, fornecendo resultados mais precisos para a análise estrutural. A princípio, a pouca memória central que dispunha o computador era um fator limitante em uma análise estrutural. Este problema praticamente foi contornado, devido ao desenvolvimento de computadores mais sofisticados, permitindo a implementação de modelos que exigem uma grande capacidade de memória. Diante disto, o fator limitante para uma análise estrutural em computador passa a ser o tempo de processamento, que apresenta um custo relativamente alto. Para o profissional analisar uma estrutura mais complexa, este fator limitante pode influir na sua decisão e fazê-lo optar por um outro tipo de análise que apresente um custo menor.

Com o surgimento do microcomputador e as vantagens oferecidas pelo seu uso, tornou-se importante a implementação de modelos estruturais adequados a estes equipamentos. Com este objetivo o presente trabalho foi idealizado, utilizando um modelo que se ajusta às limitações de um equipamento de baixo custo e permitindo ao profissional da área fazer uma análise de estruturas de edifícios altos com maior precisão em relação aos processos mais comuns utilizados em escritórios de cálculo.

Os modelos usuais de análise de estruturas de edifícios altos consideram as lajes com efeito diafragma, ou seja, possuindo rigidez "infinita" no seu próprio plano e rigidez transversal nula. O modelo apresentado por Stamato-Stafford (1), em 1968, considera a estrutura formada por painéis dispostos em planos ortogonais e oblíquos. São compatibilizados os 3 deslocamentos horizontais de laje e os verticais nas interseções de painéis ortogonais. A análise é feita pelo método dos deslocamentos e tem como importante característica a utilização do conceito de deslocamento relativo de andar. Soriano (2), em 1971, desenvolveu uma programação automática para análise de estruturas submetidas à ação do vento. No seu modelo a estrutura é formada por painéis ortogonais e permite uma análise com deformação por cortante e trechos rígidos nas extremidades dos elementos vigas. Câmara Jr. (3), em 1978, adotou um modelo que permite a análise tridimensional de edifícios altos, onde se compatibiliza além dos deslocamentos horizontais de laje, os deslocamentos verticais e as rotações nos pontos nodais. Pode-se utilizar vigas e pilares com eixos longitudinais e seções transversais de várias formas e com disposições quaisquer em planta, pilares inclinados, apoios elásticos na base da estrutura e/ou lateralmente em cada andar, recalques de apoios etc. O sistema de equações é subdividido em "blocos" correspondentes aos elementos estruturais de um andar.

No presente trabalho buscou-se a adoção de um modelo que pudesse ser implementado em um microcomputador de pouca memória central e que os resultados provenientes da análise

estrutural fossem satisfatórios em termo de engenharia. O modelo admite a estrutura como sendo formada por painéis de contraventamento interligados entre si ao nível das lajes. Faz-se a análise tridimensional visando a compatibilização dos deslocamentos horizontais de laje e procedente à distribuição dos quinhões de carga horizontal aos painéis. O efeito de torção devido à não simetria da estrutura e/ou carregamento é considerado no modelo, mesmo quando o sistema de eixos relacionado com a estrutura não passe pelo seu "centro de torção". A resolução do sistema de equações é feita via método de Gauss e para esta análise faz-se uma partição do sistema de equações em "blocos" correspondentes aos elementos estruturais de cada andar.

A seguir apresenta-se uma breve descrição dos próximos capítulos:

Capítulo II - Modelo estrutural: Descrevem-se as características do modelo estrutural, hipóteses simplificadoras e sistemas de referências.

Capítulo III - Propriedades dos elementos estruturais e mudança de eixos: Descrevem-se as propriedades dos elementos estruturais, seus sistemas de eixos e considerações acerca de mudança de eixos.

Capítulo IV - Técnicas computacionais: Dá-se um enfoque sobre as técnicas computacionais adotadas na implementação do modelo estrutural ao

microcomputador. Este capítulo apresenta o aspecto mais original do trabalho, visto que, buscou-se a utilização de técnicas computacionais mais adequadas, possibilitando a análise de estruturas de edifícios altos de grande porte.

Capítulo V - Programação automática: Descreve-se a programação automática desenvolvida neste trabalho, detalhando-se as funções de cada programa no processamento de dados de uma análise estrutural.

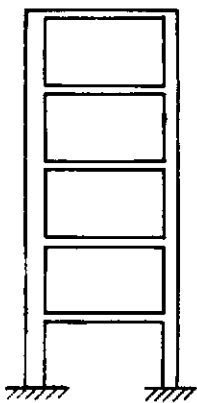
Capítulo VI - Exemplos e conclusões: Apresentam-se os exemplos processados, comparação dos resultados com os do modelo tridimensional utilizado por Câmara Jr. (3) e as conclusões.

Utilizou-se um equipamento microcomputador compatível com o APPLE II de 48 Kbytes de memória RAM, financiado pelo CNPq - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico.

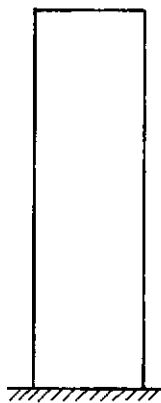
II - M O D E L O E S T R U T U R A L

II.1 - Características e hipóteses do modelo

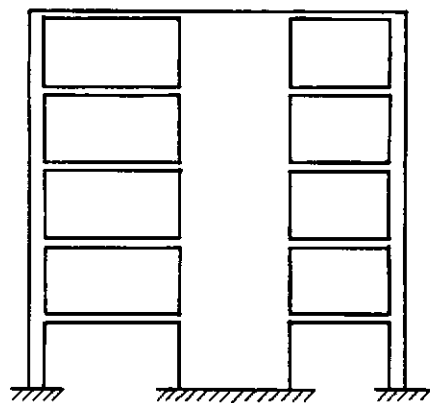
O modelo admite a estrutura como sendo formada por painéis de contraventamento, que podem ser pórticos planos, pilares-parede e/ou suas associações (Fig. II.1). Estes painéis podem ser ortogonais ou oblíquos e estão interligados ao nível das lajes. Faz-se a análise utilizando o método da rigidez, admitindo os elementos estruturais como reticulados e com a presença de lajes tipo "diafragma" ao nível de todos os andares. Esta consideração objetiva uma análise mais real do comportamento da estrutura com a presença das lajes, compatibilizando seus deslocamentos de corpo rígido em todos os painéis ao nível de todos os andares. Outra vantagem na utilização desta hipótese, é a diminuição dos graus de liberdade dos painéis. Para um determinado painel com "n" pontos nodais e "a" andares, o número de graus de liberdade passa de " $3n$ " para " $2n+a$ ".



a) Pórtico



b) Pilar-parede

c) Associação de pórtico
com pilar-parede

II.1 - Tipos de painéis

O método de análise supõe a estrutura com comportamento linear físico e geométrico, ou seja, materiais com comportamento elástico-linear e elementos estruturais sujeitos a pequenos deslocamentos e deformações.

Pode-se considerar nos elementos estruturais, além da deformação por flexão, a deformação por cortante. Isto se faz necessário em pilares-parede ou quando este tipo de deformação não deve ser desprezado.

O efeito de torção devido à não simetria da estrutura e/ou carregamento é considerado no modelo, pois cada painel absorve parte deste efeito, quando o seu plano de ação não contém o "centro de torção" da estrutura.

Faz-se uma análise admitindo um determinado painel subdividido em "blocos de andar". Cada "bloco de andar" contém os elementos estruturais deste andar, ou seja, o conjunto formado pelas vigas situadas ao nível da laje e os pilares logo abaixo da mesma. O sistema de equações fica então particionado em função do número de andares. Emprega-se a técnica do número muito grande para introduzir as condições de contorno nos apoios da base da estrutura e o método de Gauss para a resolução do sistema de equações.

Utiliza-se o conceito de deslocamento relativo de andar, que considera os deslocamentos horizontais relacionados com um referencial fixo no andar imediatamente inferior, enquanto o conceito de deslocamento absoluto de andar considera

os deslocamentos horizontais relacionados com um referencial fixo na base da estrutura. O uso de deslocamento relativo de andar, possibilita uma melhor distribuição dos coeficientes da matriz de rigidez do painel, com um melhor aproveitamento da memória do microcomputador. Com o uso deste método, o acoplamento da matriz de rigidez de um andar com o andar seguinte se faz com um menor número de termos quando comparado com o uso de deslocamento absoluto de andar.

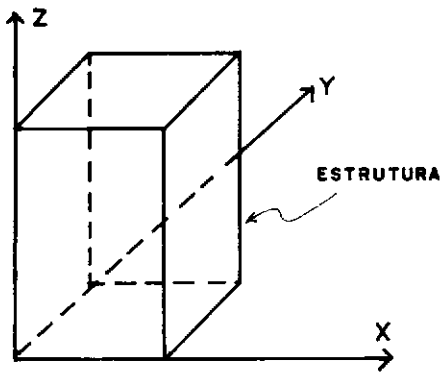
O modelo considera a estrutura submetida a carregamentos estáticos horizontais e/ou verticais. As cargas horizontais são aplicadas ao nível das lajes, nas suas interseções com o eixo global Z (Fig. II.2). As cargas verticais devem ser aplicadas diretamente aos nós e/ou vigas dos painéis, sendo que as provenientes do peso próprio dos elementos estruturais podem ser acessadas automaticamente pela programação automática. Estes tipos de carregamentos podem atuar isoladamente ou em conjunto.

II.2 - Sistemas de referências

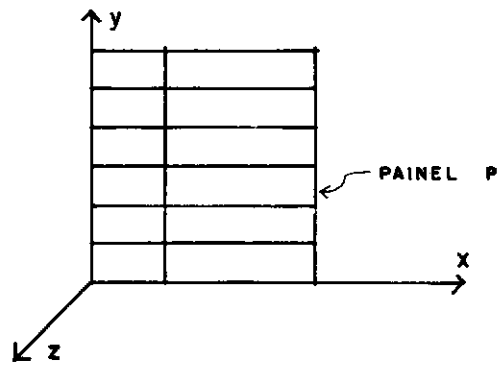
II.2.1 - Sistema de referência global

Utiliza-se este sistema de referência triortogonal direto XYZ, para relacionar-se com a posição relativa da estrutura em planta. A origem do sistema pode ficar em uma posição aleatória (não necessariamente no "centro de torção" da estrutura), porém o plano formado pelos eixos X e Y deve ser

paralelo aos planos das lajes. (Fig. II.2.a).



a) Sistema de referência global



b) Sistema de referência de painel

II.2 - Sistemas de referências

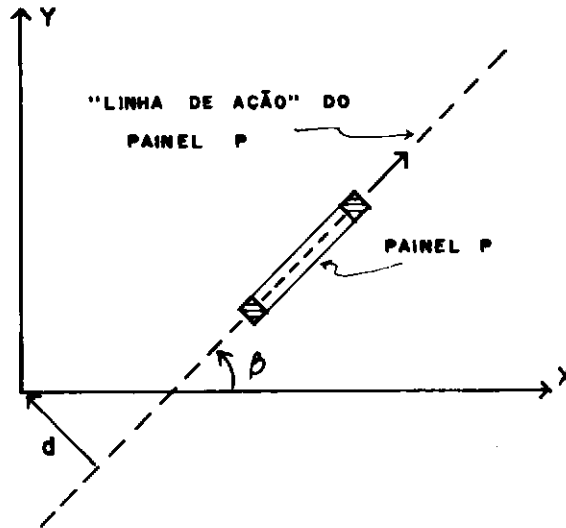
II.2.2 - Sistema de referência de painel

Este sistema de referência triortogonal direto xyz está relacionado com o painel em análise. A origem do sistema pode ter uma localização aleatória e o plano formado pelos eixos x e y deve coincidir com o plano que contém o painel. (Fig. II.2.b).

II.3 - Paineis

Os painéis de contraventamento devem estar situados em planos paralelos ao eixo global Z e podem ter direções quaisquer em planta. A localização de um determinado painel fica perfeitamente definida pela menor distância entre sua "linha de ação" e a origem do sistema de eixos global e pelo ângulo formado por esta linha e o eixo global X . A "linha de ação" de um painel é formada pela interseção do plano que

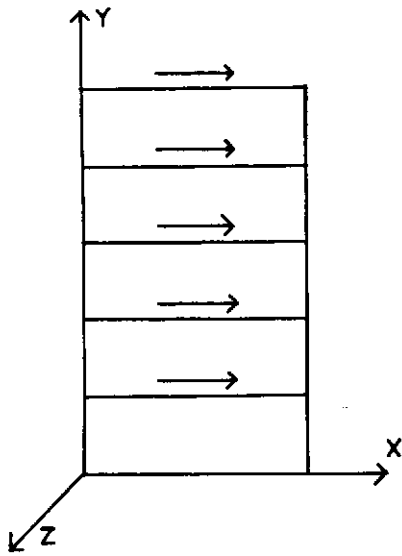
contêm o painel e o plano formado pelos eixos globais X e Y. (Fig. II.3).



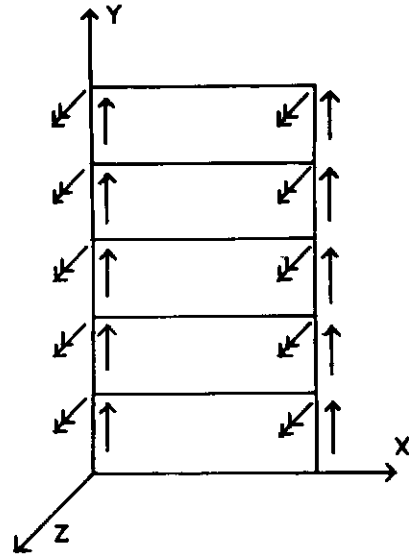
II.3 - Localização de painel

II.3.1 - Graus de liberdade dos painéis

Cada painel possui dois tipos de graus de liberdade: graus de liberdade correspondentes aos deslocamentos horizontais de lajes (Fig. II.4.a) e graus de liberdade correspondentes aos deslocamentos de nós (Fig. II.4.b). Ao primeiro tipo designa-se graus de liberdade de andar e ao segundo, graus de liberdade independentes de nó.



a) Graus de liberdade de andar

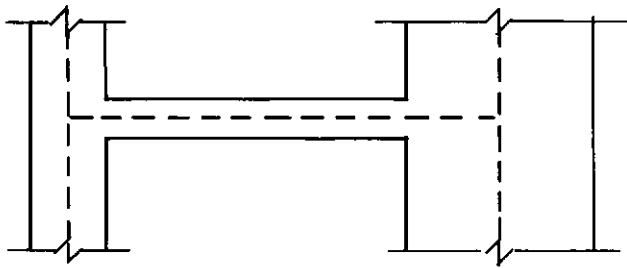


b) Graus de liberdade independentes de nó

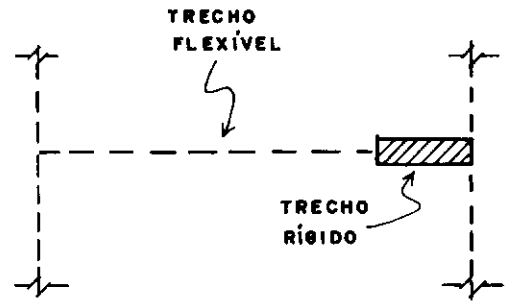
II.4 - Graus de liberdade de painel

II.4 - Vigas

As vigas de um determinado andar devem ter eixo reto e seção transversal constante. Suas extremidades podem estar diretamente ligadas aos pontos nodais ou podem ficar excêntricas aos mesmos, com a utilização de trechos rígidos. (Fig. II.5). Esta consideração permite simular o comportamento de uma viga conectada a um pilar de grande dimensão.



a) Elemento viga

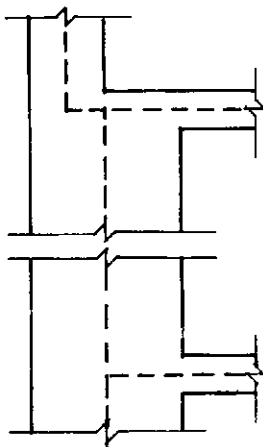


b) Idealização estrutural

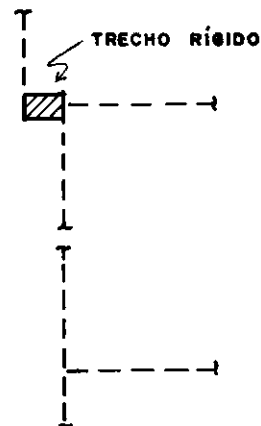
II.5 - Viga

II.5 - Pilares

Os pilares de um determinado andar devem ter também eixo reto e seção transversal constante. Suas extremidades podem ficar excêntricas aos pontos nodais com a utilização de trechos rígidos. (Fig. II.6). Isto permite simular o comportamento de um pilar que sofre mudança de eixo na passagem de um andar para o andar seguinte.



a) Elemento pilar



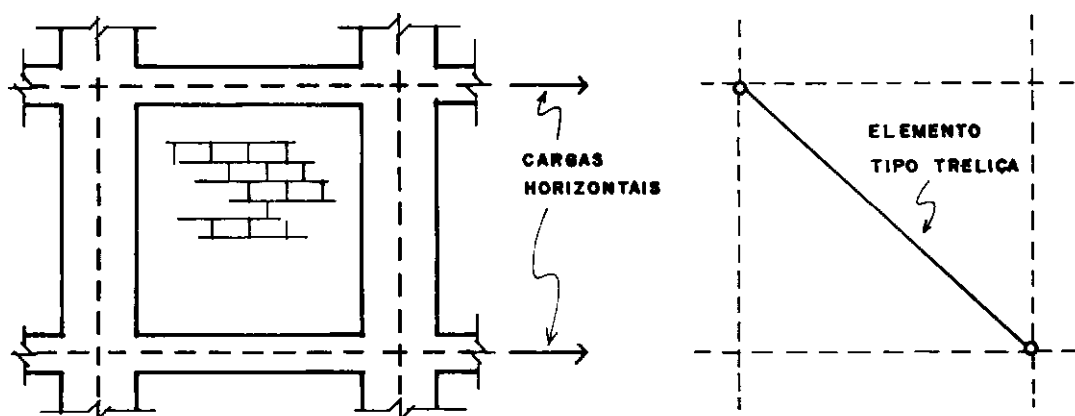
b) Idealização estrutural

II.6 - Mudança de eixo de pilar

II.6 - Elementos de contraventamento

Pode-se simular o efeito da resistência da alvenaria quando um painel está submetido a cargas horizontais. Neste caso utiliza-se elementos "tipo treliça" que são obtidos dos elementos pilares pela consideração de rigidez nula à flexão e parâmetros elásticos apropriados. (Fig. II.7)

Neste texto não se estimula o uso de elemento de contraventamento com o objetivo de simular o efeito enrijecedor da parede de alvenaria. Chama-se apenas a atenção para esta opção de uso.



a) Parede de alvenaria

b) Idealização estrutural

II.7 - Contraventamento de parede de alvenaria

Este tipo de elemento pode também ser utilizado em estruturas de aço, de forma a enrijecer os painéis de contraventamento, como mostrado no terceiro exemplo deste trabalho.

III - PROPRIEDADES DOS ELEMENTOS ESTRUTURAIS E MUDANÇA DE EIXOS

III.1 - Propriedades dos elementos vigas

III.1.1 - Sistema de referência local e graus de liberdade

O sistema de referência triortogonal $X_v Y_v Z_v$ que contém o elemento viga deve ter a origem na sua extremidade esquerda e o eixo X_v deve coincidir com o seu eixo longitudinal. Cada extremo do elemento possui dois graus de liberdade, quais sejam: Translação na direção Y_v e rotação na direção Z_v (Fig. III.1)

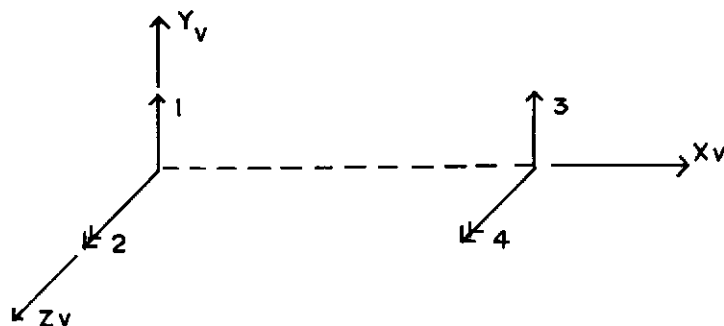


Fig. III.1 - Sistema de referência do elemento viga e graus de liberdade

III.1.2 - Matriz de rigidez

Com a utilização do método dos deslocamentos, a relação entre esforços e deslocamentos para o elemento viga no sistema de referência local se dá de acordo com a seguinte expressão matricial:

$$S_v \quad D_v = F_v$$

(3.1)

Onde $Dv1$ e $Fv1$ são respectivamente os deslocamentos e esforços, representados em forma de vetor de ordem 4, segundo as direções dos graus de liberdade do elemento viga, e $Sv1$ é a matriz de rigidez quadrada de ordem 4 deste elemento. Esta matriz de rigidez para elemento viga com deformação por cortante é dada pela seguinte expressão matricial:

$$Sv1 = \begin{bmatrix} \frac{12EI}{L^3(1+2g)} & \frac{6EI}{L^2(1+2g)} & -\frac{12EI}{L^3(1+2g)} & \frac{6EI}{L^2(1+2g)} \\ & \frac{4(1+g/2)EI}{L(1+2g)} & -\frac{6EI}{L^2(1+2g)} & \frac{2(1-g)EI}{L(1+2g)} \\ & & \frac{12EI}{L^3(1+2g)} & -\frac{6EI}{L^2(1+2g)} \\ & & & \frac{4(1+g/2)EI}{L(1+2g)} \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

SIMETRIA

Ou ainda

$$Sv1 = \frac{EI}{L^3(1+2g)} \begin{bmatrix} 12 & 6 & -12 & 6 \\ & 2 & 3 & 2 \\ & \frac{4(1+g/2)}{L} & -6 & 2(1-g) \\ & & \frac{2}{L} & L \\ & & & \frac{12}{L} & -6 \\ & & & & \frac{3}{L} & 2 \\ & & & & & L \\ & & & & & & \frac{4(1+g/2)}{L} \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

SIMETRIA

Sendo

E - Módulo de elasticidade longitudinal

L - Comprimento do elemento

I - Momento de inércia em relação ao eixo Zvl

g - Constante adimensional de cortante, sendo:

$$g = \frac{6fEI}{2GAL} \quad (3.4)$$

Onde

G - Módulo de elasticidade transversal

A - Area da seção transversal

f - Fator de forma para cortante que depende do tipo de seção transversal. O apêndice 1 mostra os seus valores para os tipos mais usuais de seção transversal.

III.2 - Propriedades dos elementos pilares

III.2.1 - Sistema de referência local e graus de liberdade

O sistema de referência triortogonal XpYpZp que contém o elemento pilar deve ter a origem na sua extremidade inferior e o eixo Xp deve coincidir com o seu eixo longitudinal (Fig. III.2). A linha "x" mostrada nesta figura, corresponde a uma linha paralela ao eixo x do sistema de referência de painel. O ângulo α formado pela linha "x" e o eixo Xp no sentido indicado na figura, deve estar contido no intervalo aberto entre 0 e 180 graus. Quando este ângulo for igual a 90 graus, têm-se um pilar vertical. Cada extremo do elemento possui 3 graus de liberdade, quais sejam: Translação nas direções Xp e

Y_p e rotação na direção Z_p .

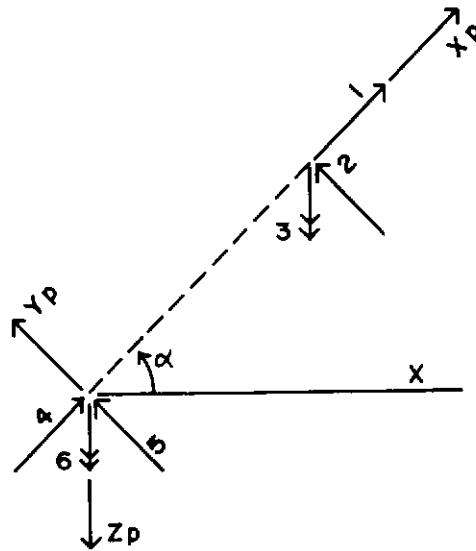


Fig. III.2 - Sistema de referência local do elemento pilar e graus de liberdade

III.2.2 - Matriz de rigidez

A relação entre esforços e deslocamentos para o elemento pilar no sistema de referência local se dá de acordo com a expressão matricial

$$S_{pl} D_{pl} = F_{pl} \quad (3.5)$$

onde D_{pl} e F_{pl} são respectivamente os deslocamentos e esforços, representados em forma de vetor de ordem 6, segundo as direções dos graus de liberdade do elemento pilar e S_{pl} é a matriz de rigidez quadrada de ordem 6 deste elemento. Esta matriz de rigidez para elemento pilar com deformação por cortante é dada pela seguinte expressão matricial:

$$\begin{array}{c}
 \left[\begin{array}{ccccc}
 \begin{array}{c} EA \\ \hline L \end{array} & 0 & 0 & \begin{array}{c} -EA \\ \hline L \end{array} & 0 & 0 \\
 & \frac{12EI}{L^3 (1+2g)} & \frac{-6EI}{L^2 (1+2g)} & 0 & \frac{-12EI}{L^3 (1+2g)} & \frac{-6EI}{L^2 (1+2g)} \\
 & & \frac{4(1+g/2)EI}{L(1+2g)} & 0 & \frac{6EI}{L^2 (1+2g)} & \frac{2(1-g)EI}{L(1+2g)} \\
 & & & & & \\
 & \text{SIMETRIA} & & & & \\
 & & & \begin{array}{c} EA \\ \hline L \end{array} & 0 & 0 \\
 & & & & \frac{12EI}{L^3 (1+2g)} & \frac{6EI}{L^2 (1+2g)} \\
 & & & & & \frac{4(1+g/2)EI}{L(1+2g)}
 \end{array} \right]
 \end{array}
 \quad (3.6)$$

Os parâmetros aqui empregados são análogos aos do elemento viga.

III.3 - Esforços de engastamento perfeito

Considera-se a aplicação de cargas somente nos elementos viga. Caso hajam elementos pilar carregados, pode-se determinar as ações equivalentes destes elementos e aplicar tais esforços diretamente aos seus nós. O apêndice 2 mostra os tipos de carga que podem ser utilizados nos elementos viga e as correspondentes ações de engastamento perfeito **Fep**.

III.4 Mudança de eixos para elementos estruturais

III.4.1 - Elemento viga

III.4.1.1 - Matriz de transformação

Para uma viga conectada a pontos nodais através de trechos rígidos em suas extremidades, é necessário fazer uma transformação dos graus de liberdade do sistema de eixos local para o sistema de eixos global de viga.

Considere-se a viga da figura III.3 e III.4, onde se representa os deslocamentos relacionados com o sistema de eixos local de viga D_{vl} , os deslocamentos relacionados com o sistema de eixos global de viga D_{vt} e os trechos rígidos em suas extremidades de comprimentos X_e e X_d .

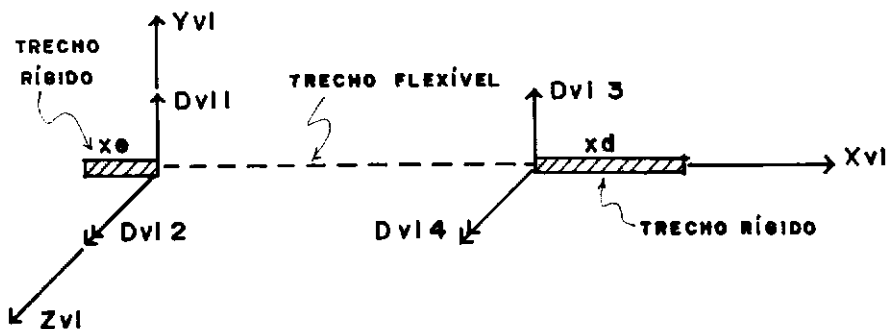


Fig. III.3 - Deslocamentos para o sistema de eixos local de viga

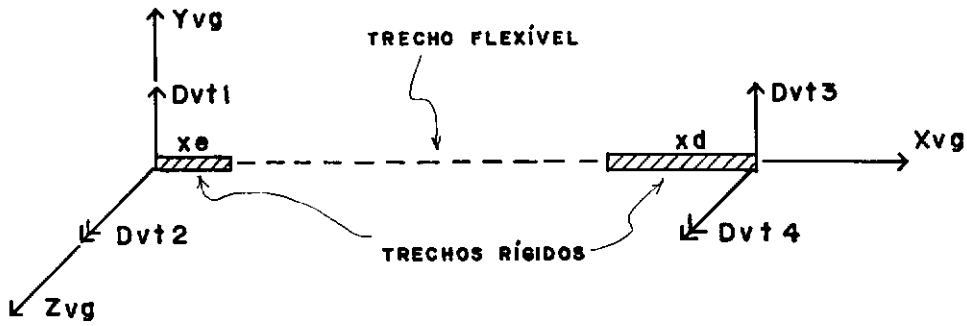


Fig. III.4 - Deslocamentos para o sistema de eixos global de viga

A relação entre os deslocamentos Dvl e os deslocamentos Dvt se dá através da matriz de transformação Tv mostrada na expressão

$$\begin{bmatrix} Dvl1 \\ Dvl2 \\ Dvl3 \\ Dvl4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & Xe & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -Xd \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Dvt1 \\ Dvt2 \\ Dvt3 \\ Dvt4 \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

Ou seja

$$Dvl = Tv Dvt \quad (3.8)$$

As figuras (III.5) e (III.6) mostram uma viga com seus esforços relacionados com o sistema de eixos global e local de viga Fvt e Fvl , respectivamente.

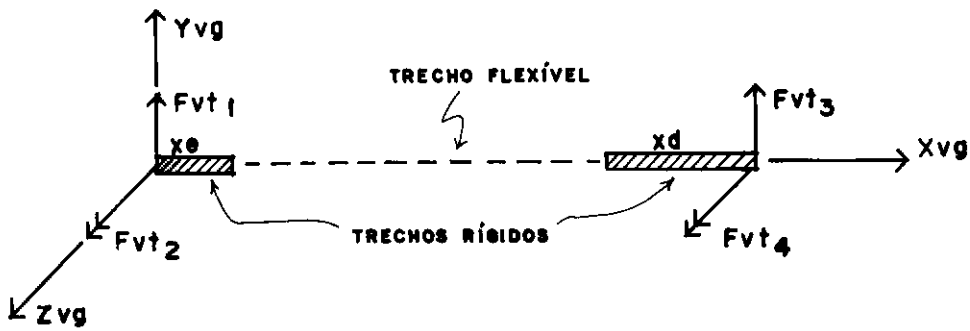


Fig. III.5 - Esforços para o sistema de eixos global de viga

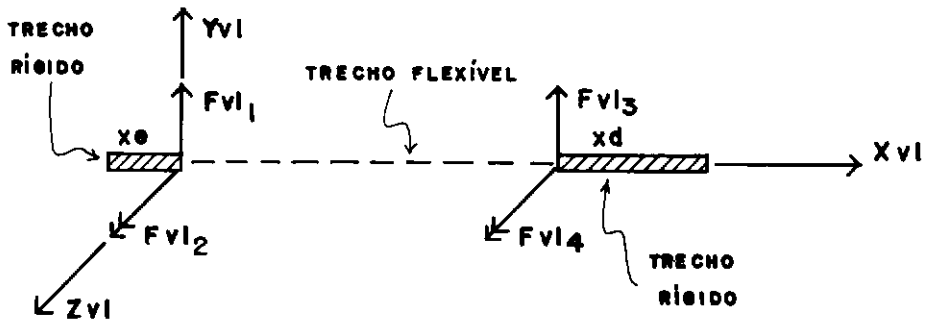


Fig. III.6 - Esforços para o sistema de eixos local de viga

A relação entre os esforços F_{vt} e os esforços F_{vl} se dá através da matriz de transformação T_v^t mostrada na expressão

$$\begin{bmatrix} F_{vt1} \\ F_{vt2} \\ F_{vt3} \\ F_{vt4} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ x_e & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -x_d & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{vl1} \\ F_{vl2} \\ F_{vl3} \\ F_{vl4} \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

Ou seja

$$F_{vt} = T_v^t F_{vl} \quad (3.10)$$

Pré-multiplicando a expressão (3.1) por T_v^t , tem-se

$${}^t T_v S_{vl} D_{vl} = {}^t T_v F_{vl} \quad (3.11)$$

Substituindo as expressões (3.8) e (3.10) em (3.11), tem-se

$${}^t T_v S_{vl} {}^t T_v D_{vt} = F_{vt} \quad (3.12)$$

Onde se conclui que

$$S_{vt} = {}^t T_v S_{vl} {}^t T_v \quad (3.13)$$

é a matriz de rigidez de viga relacionada com o sistema de eixos global de viga.

III.4.2 - Elemento pilar

III.4.2.1 - Matriz de rotação

Considere-se um elemento pilar com seus deslocamentos nodais relacionados com o sistema de eixos local de pilar D_{pl} (Fig. III.7) e o mesmo elemento com seus deslocamentos nodais relacionados com um outro sistema de eixos intermediário de pilar D_{pr} (Fig. III.8).

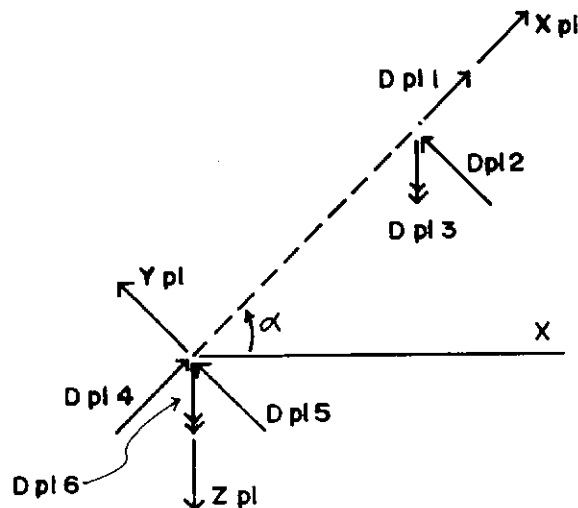


Fig. III.7 - Deslocamentos para o sistema de eixos local de pilar

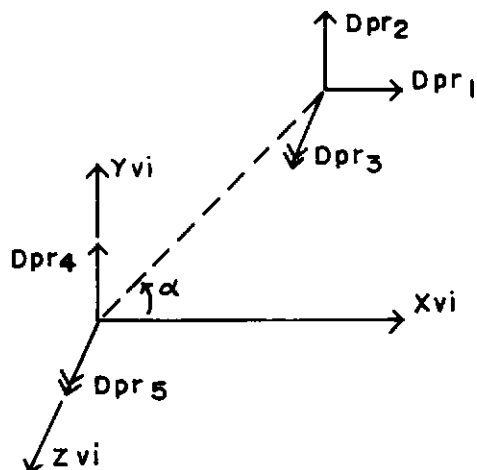


Fig. III.8 - Deslocamentos para o sistema de eixos intermediário de pilar

A relação entre os deslocamentos Dpl e os deslocamentos Dpr se dá através da matriz de rotação R mostrada na expressão

$$\begin{bmatrix} Dpl1 \\ Dpl2 \\ Dpl3 \\ Dpl4 \\ Dpl5 \\ Dpl6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha & 0 & 0 & 0 \\ -\sin \alpha & \cos \alpha & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sin \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Dpr1 \\ Dpr2 \\ Dpr3 \\ Dpr4 \\ Dpr5 \end{bmatrix}$$

(3.14)

Ou seja

$$Dpl = R Dpr$$

(3.15)

As figuras (III.9) e (III.10) mostram um pilar com seus esforços relacionados com o sistema de eixos intermediário e local de pilar Fpr e Fpl respectivamente.

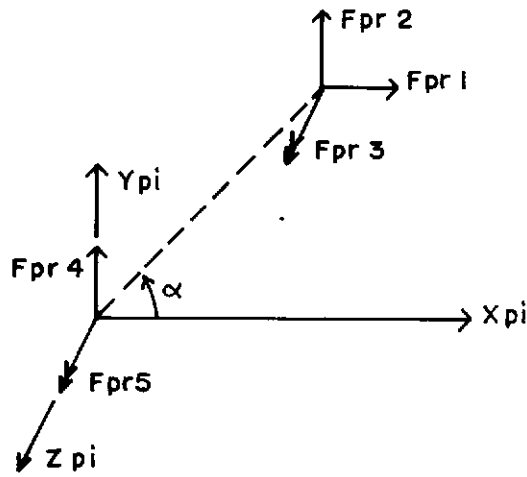


Fig. III.9 - Esforços para o sistema de eixos intermediário de pilar

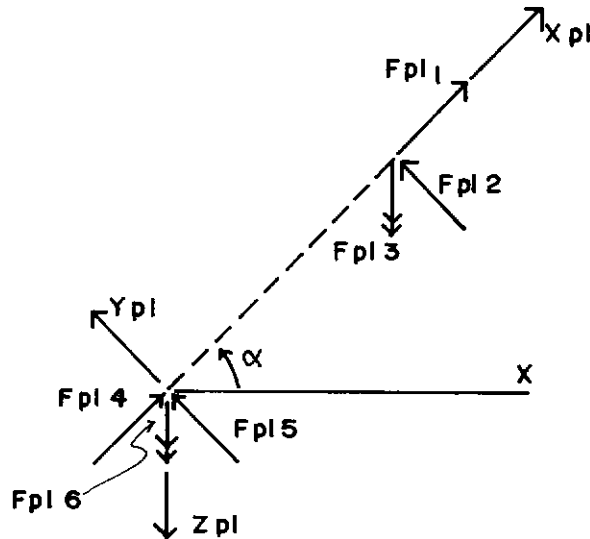


Fig. III.10 - Esforços para o sistema de eixos local de pilar

A relação entre os esforços F_{pr} e os esforços F_{pl} se dá através da matriz R^t mostrada na expressão

$$\begin{bmatrix} \text{Fpr1} \\ \text{Fpr2} \\ \text{Fpr3} \\ \text{Fpr4} \\ \text{Fpr5} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \text{Fpl1} \\ \text{Fpl2} \\ \text{Fpl3} \\ \text{Fpl4} \\ \text{Fpl5} \\ \text{Fpl6} \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

Ou seja

$$\text{Fpr} = \mathbf{R}^t \text{Fpl} \quad (3.17)$$

Pré-multiplicando a expressão (3.5) por \mathbf{R}^t , tem-se

$$\mathbf{R}^t \mathbf{Spl} \mathbf{Dpl} = \mathbf{R}^t \text{Fpl} \quad (3.18)$$

Substituindo as expressões (3.15) e (3.17) em (3.18), tem-se

$$\mathbf{R}^t \mathbf{Spl} \mathbf{R} \mathbf{Dpr} = \text{Fpr} \quad (3.19)$$

Onde se conclui que

$$\mathbf{Spr} = \mathbf{R}^t \mathbf{Spl} \mathbf{R} \quad (3.20)$$

é a matriz de rigidez de pilar relacionada com o sistema de eixos intermediário.

Pode-se notar que após esta transformação de eixos, há uma diminuição de um grau de liberdade, correspondente ao deslocamento horizontal na extremidade inferior do pilar. Isto se deve ao fato de, quando da utilização de deslocamento relativo de andar, não existe deslocamento horizontal no andar inferior quando se impõe um deslocamento horizontal no andar em

questão. Maiores detalhes sobre a análise de estruturas com o uso de deslocamento relativo de andar pode ser visto nos trabalhos (1), (2), (3), (5) e no capítulo seguinte.

III.4.2.2 - Matriz de transformação

Considere-se um elemento pilar com seus deslocamentos nodais relacionados com o sistema de eixos intermediário de pilar D_{pr} (Fig.III.11) e o mesmo elemento com seus deslocamentos nodais relacionados com o sistema de eixos global de pilar D_{pg} (Fig. III.12)

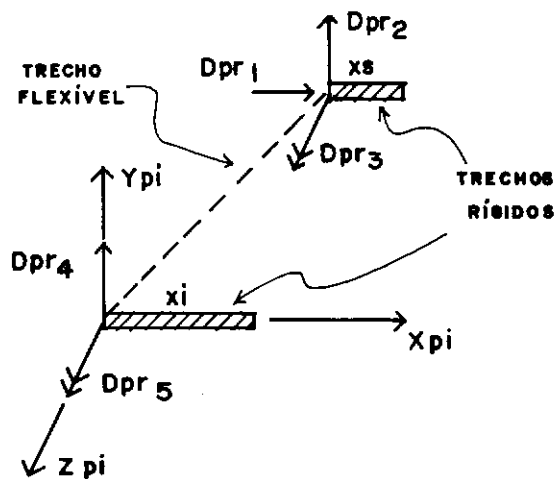


Fig. III.11 - Deslocamentos para o sistema de eixos intermediário de pilar

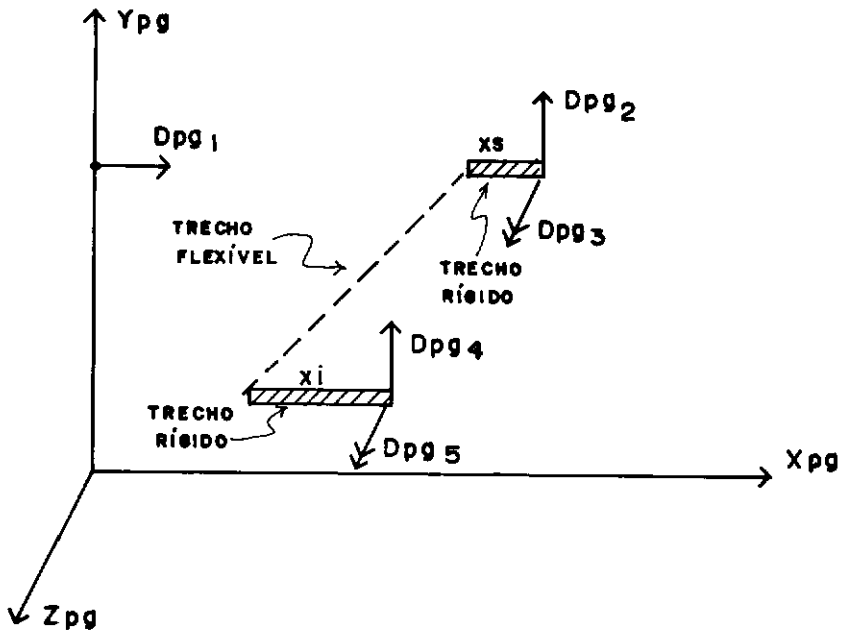


Fig. III.12 - Deslocamentos para o sistema de eixos global de pilar

A relação entre os deslocamentos Dpr e os deslocamentos Dpg se dá através da matriz de transformação Tp mostrada na expressão

$$\begin{bmatrix} Dpr1 \\ Dpr2 \\ Dpr3 \\ Dpr4 \\ Dpr5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -Xs & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -Xi \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Dpg1 \\ Dpg2 \\ Dpg3 \\ Dpg4 \\ Dpg5 \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

Ou seja

$$Dpr = Tp Dpg \quad (3.22)$$

As figuras (III.13) e (III.14) mostram um pilar com seus esforços relacionados com o sistema de eixos global e

intermediário de pilar F_{pg} e F_{pr} , respectivamente.

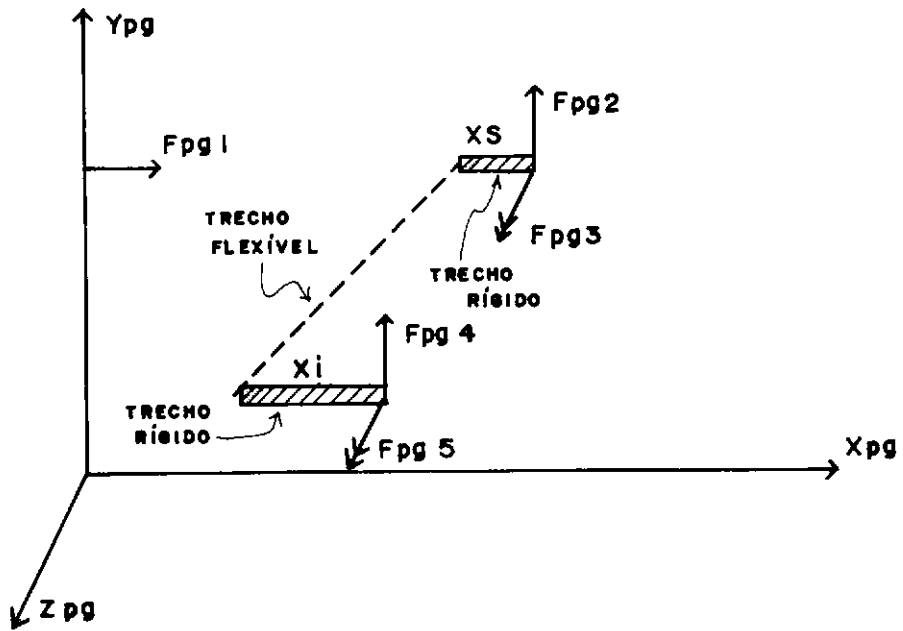


Fig. III.13 - Esforços para o sistema de eixos global de pilar

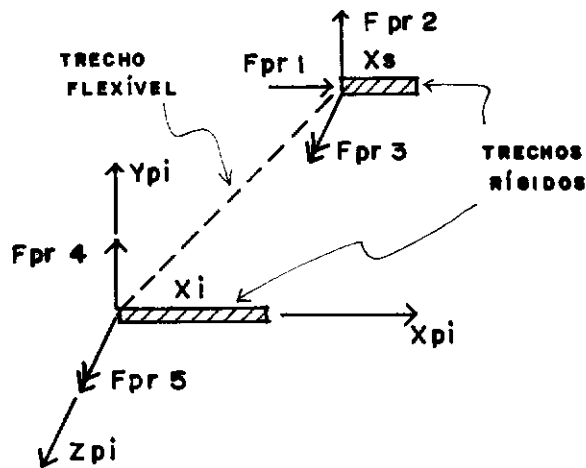


Fig. III.14 - Esforços para o sistema de eixos intermediário de pilar

A relação entre os esforços F_{pg} e os esforços F_{pr} se faz através da matriz de transformação T_p^t mostrada na expressão

$$\begin{bmatrix} F_{pg1} \\ F_{pg2} \\ F_{pg3} \\ F_{pg4} \\ F_{pg5} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -X_s & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -X_i & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{pr1} \\ F_{pr2} \\ F_{pr3} \\ F_{pr4} \\ F_{pr5} \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

Ou seja

$$F_{pg} = T_p^t F_{pr} \quad (3.24)$$

Substituindo a expressão (3.20) na expressão (3.19), tem-se

$$S_{pr} D_{pr} = F_{pr} \quad (3.25)$$

Pré-multiplicando a expressão (3.25) por T_p^t , tem-se

$$T_p^t S_{pr} D_{pr} = T_p^t F_{pr} \quad (3.26)$$

Substituindo as expressões (3.22) e (3.24) na expressão (3.26), tem-se

$$T_p^t S_{pr} T_p D_{pg} = F_{pg} \quad (3.27)$$

Onde se conclui que

$$S_{pg} = T_p^t S_{pr} T_p \quad (3.28)$$

Substituindo (3.20) em (3.28), tem-se

$$S_{pg} = T_p^t R S_{pl} R T_p \quad (3.29)$$

Onde S_{pg} é a matriz de rigidez de pilar relacionada com o sistema de eixos global.

Substituindo (3.28) em (3.27), tem-se a expressão que relaciona esforços e deslocamentos no sistema de eixos global de pilar

$$S_{pg} D_{pg} = F_{pg} \quad (3.30)$$

IV - T E C N I C A S C O M P U T A C I O N A I S

IV.1 - Modelo numérico

A presente análise de uma estrutura, quando da existência de carregamento horizontal, é feita em duas fases distintas. A primeira fase compreende a análise da estrutura tridimensional submetida ao carregamento horizontal e a distribuição deste carregamento entre os diversos painéis. Esta distribuição considera a influência da rigidez de cada painel na absorção de cargas e a não simetria da estrutura e/ou carregamento. A segunda fase consiste na análise de deslocamentos e esforços nos elementos dos painéis submetidos aos quinhões de cargas horizontais e cargas verticais.

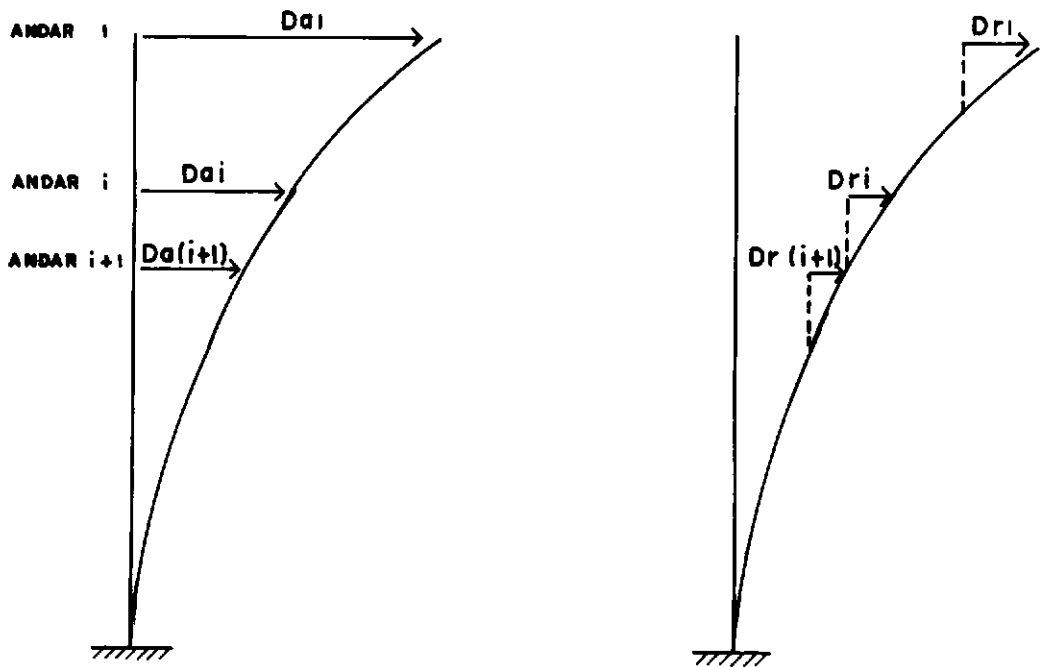
Devido à limitada capacidade de memória do microcomputador, optou-se por um particionamento do sistema de equações em "blocos de andar". Desta forma, trabalha-se com um número consideravelmente inferior de variáveis em memória central, possibilitando a análise de grande parte de estruturas usuais de edifícios altos. Com este procedimento, a limitação de memória auxiliar passa a ser mais sentida e o tempo de processamento se apresenta consideravelmente longo.

Neste trabalho empregou-se a técnica de deslocamento relativo de andar, ver Soriano (3), que consiste basicamente numa análise dos deslocamentos horizontais com uma mudança de referencial em relação ao referencial global XYZ. Define-se deslocamento relativo de um andar i como sendo igual à diferença entre o deslocamento absoluto do andar i e o

deslocamento absoluto do andar $i+1$, quando se faz uma numeração dos andares em ordem crescente de cima para baixo. Desta forma, o deslocamento relativo de um andar i é dado pela seguinte expressão:

$$D_{ri} = D_{ai} - D_{a(i+1)} \quad (4.1)$$

Onde D_{ai} e $D_{a(i+1)}$ são os deslocamentos absolutos dos andares i e $i+1$ respectivamente. A figura (IV.1) apresenta os deslocamentos horizontais de uma estrutura, por simplicidade em uma só direção, considerando os dois tipos de deslocamentos.



a) Deslocamento absoluto

b) Deslocamento relativo

Fig. IV.1 - Deslocamentos horizontais de andar

A relação entre os deslocamentos absolutos e relativos de andar se faz através da seguinte expressão matricial:

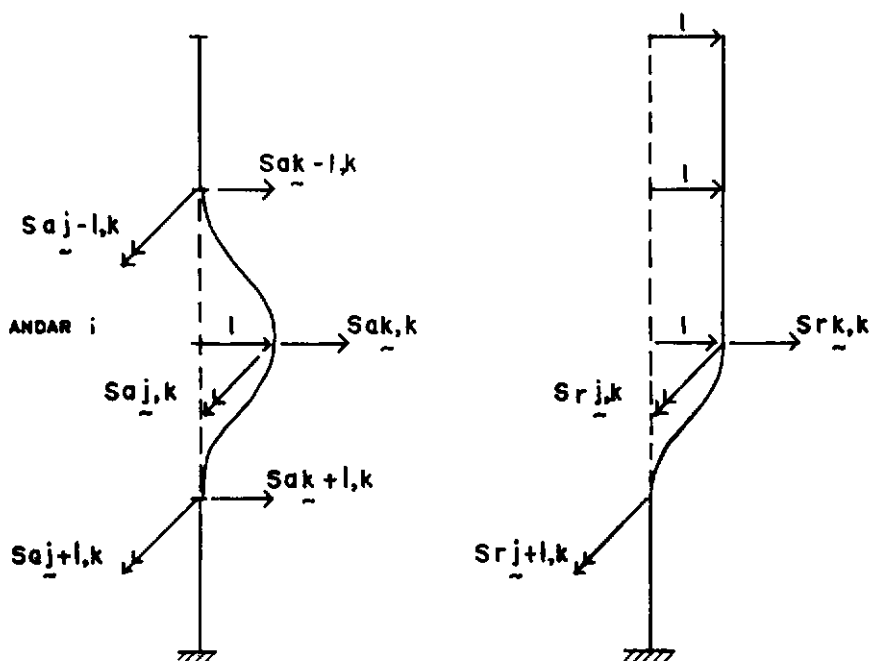
$$D_a = T D_r \quad (4.2)$$

Onde a matriz quadrada T possui elementos unitários na diagonal principal e na banda superior, e zeros nos demais elementos, ou seja:

$$T = \begin{bmatrix} 1 & . & . & . & 1 & . & . & . & 1 \\ 0 & . & . & . & . & . & . & . & . \\ . & . & . & . & . & . & . & . & . \\ . & . & . & . & . & . & . & . & . \\ 0 & . & . & 0 & 1 & . & . & . & 1 \\ . & . & . & . & 0 & . & . & . & . \\ . & . & . & . & . & . & . & . & . \\ . & . & . & . & . & . & . & . & . \\ 0 & . & . & . & 0 & . & . & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

A utilização de deslocamento relativo de andar traz vantagens significativas no tratamento da matriz de rigidez do modelo estrutural. Neste caso, esta matriz se apresenta com uma maior esparsidade, quando comparada com a matriz de rigidez proveniente da utilização de deslocamento absoluto de andar. Outra vantagem se refere à facilidade no tratamento de sistema de equações, quando se utilizam partições por "blocos de andar".

Para uma visualização melhor das vantagens oferecidas pelo uso de deslocamento relativo de andar, considere-se a figura (IV.2) onde se representa uma estrutura por uma linha paralela ao eixo global Z e os dois tipos de deslocamentos em análise.



a) Deslocamento absoluto de andar

b) Deslocamento relativo de andar

Fig. IV.2 - Forças restritivas para deslocamentos unitários no andar i e deslocamentos nulos para os demais graus de liberdade

Através da figura (IV.2.b), observa-se que quando se impõe um deslocamento no andar i , todos os que lhe são superiores se deslocam concomitantemente. Isto se deve ao conceito de deslocamento relativo de andar dado pela expressão (4.1).

As direções $k-1$, k e $k+1$ são aquelas segundo os graus de liberdade de andar dos andares $i-1$, i e $i+1$, respectivamente, e as direções $j-1$, j e $j+1$, segundo os graus de liberdade independentes de nó dos andares $i-1$, i e $i+1$, respectivamente. Para um determinado andar i , prescreve-se um deslocamento unitário numa direção k e deslocamentos nulos segundo as demais direções, obtendo-se os coeficientes de

rigidez indicados na figura, sendo neste caso formados por submatrizes. Assim, por exemplo, a submatriz $S_{aj-1,k}$ é formada por elementos que representam as forças restritivas segundo as direções correspondentes aos graus de liberdade independentes de nó do andar $i-1$ para deslocamentos unitários segundo as direções correspondentes aos graus de liberdade de andar do andar i e deslocamentos nulos segundo as demais direções.

As submatrizes $S_{rk-1,k}$ e $S_{rj-1,k}$ se apresentam nulas, devido à deslocabilidade igual dos andares superiores ao andar i . Desta forma, não existem forças restritivas no andar $i-1$ devido a um deslocamento de andar no andar i , pois ambos se deslocam da mesma quantidade. Finalmente, para se mostrar que a submatriz $S_{rk+1,k}$ se apresenta nula, basta fazer uma análise de sua submatriz simétrica $S_{rk,k+1}$. Esta submatriz se apresenta nula pela mesma razão que se conclui que as duas primeiras são nulas.

As figuras (IV.3) e (IV.4) mostram as matrizes de rigidez para deslocamento absoluto e relativo de andar de um "bloco de andar" da estrutura da figura (IV.2).

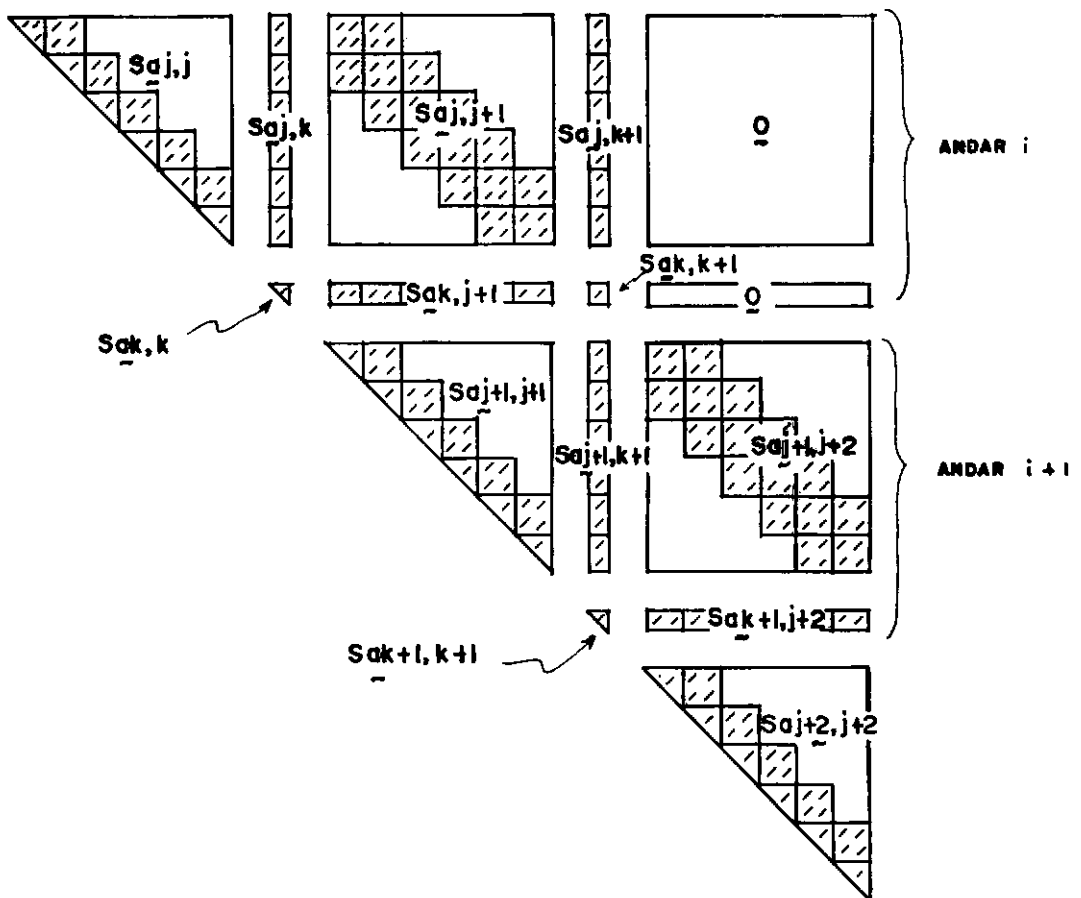


Fig. IV.3 - Matriz de rigidez para deslocamento absoluto de andar

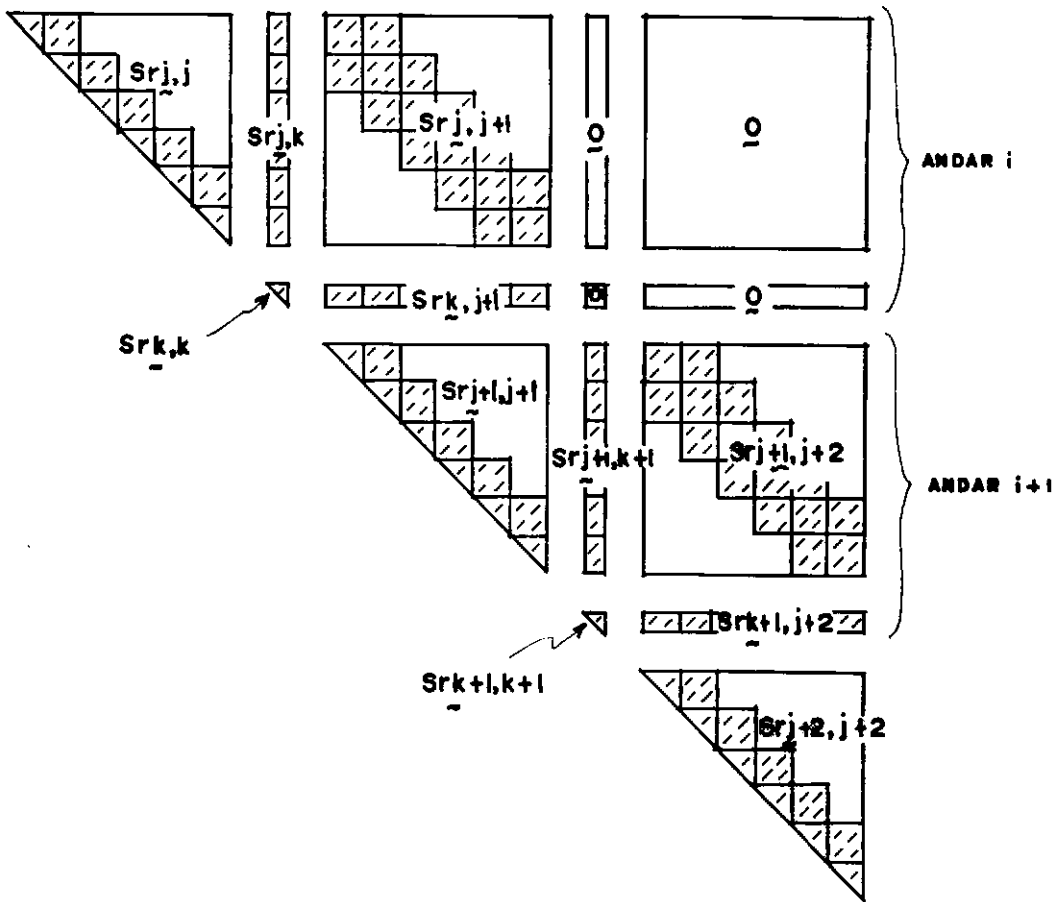


Fig. IV.4 - Matriz de rigidez para deslocamento relativo de andar

Comparando-se estas duas matrizes, pode-se concluir que a segunda apresenta uma maior esparsidade do que a primeira, pois as submatrizes $Sr_{j,k+1}$, $Sr_{k,k+1}$ e suas simétricas se apresentam nulas. Com isto, o acoplamento do andar i com o andar i+1 se faz tão somente através da submatriz $Sr_{j+1,j+1}$, facilitando o particionamento do sistema de equações em "blocos de andar".

IV.2 - Análise tridimensional para carregamento horizontal

Para a análise com cargas horizontais aplicadas à estrutura, é feita, de início, uma distribuição destas cargas entre os diversos painéis. O procedimento utilizado envolve o cálculo da matriz de rigidez reduzida de painel S_{rp} , que é obtida da matriz de rigidez reduzida de painel para um andar i , S_{rpi} , após sucessivas reordenações e condensações de graus de liberdade, permanecendo somente os graus de liberdade de andar. A seguir faz-se a montagem da matriz de rigidez reduzida da estrutura S_{re} em função das matrizes S_{rp} e da localização de cada painel em planta. A matriz de rigidez S_{re} bem como o vetor de cargas horizontais F_h estão relacionados com os graus de liberdade mostrados na figura (IV.5).

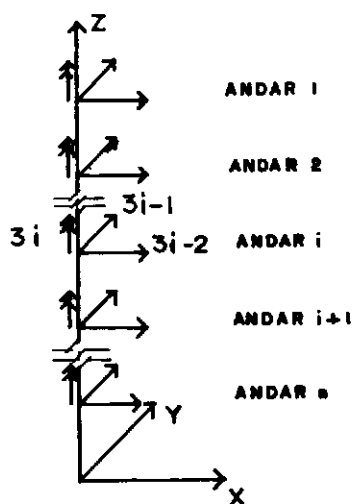


Fig. IV.5 - Graus de liberdade de deslocamento horizontal de laje

Com a matriz S_{re} e o vetor F_h procede-se à resolução do sistema de equações $S_{re} D_h = F_h$, obtendo-se o vetor de deslocamentos horizontais D_h . A partir deste vetor, obtém-se o

vetor de deslocamentos horizontais de painel D_{ph} em função da localização em planta de cada painel. Os vetores de cargas horizontais F_{ph} a serem aplicados aos painéis são obtidos pela multiplicação das matrizes de rigidez reduzidas dos painéis S_{rp} pelos respectivos vetores de deslocamentos horizontais de painel D_{ph} .

IV.2.1 - Matriz de rigidez reduzida de painel para um andar i

Considerem-se os graus de liberdade de painel, representados de forma unidimensional na figura (IV.6).

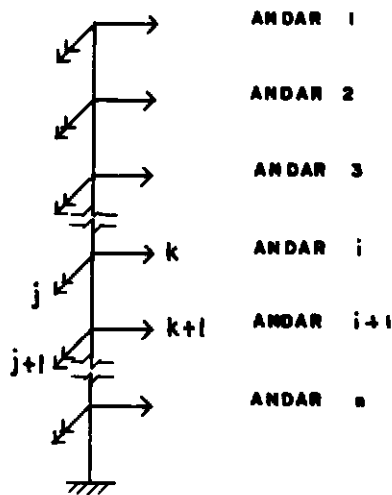


Fig. IV.6 - Graus de liberdade de painel

Para um andar i , a direção j está relacionada com as direções dos graus de liberdade independentes de nó e a direção k , com os graus de liberdade de andar.

Para se calcular a matriz de rigidez reduzida do painel S_{rp} , faz-se a montagem da matriz de rigidez reduzida de painel para um andar i , S_{rpi} , e a condensação de graus de

liberdade, permanecendo somente os graus de liberdade independentes de nó do andar $i+1$ e os graus de liberdade de andar do andar 1 até o andar i . Repetindo-se este processo para todos os andares, obtém-se a matriz S_{rp} correspondente aos graus de liberdade de andar. A figura (IV.7) mostra a matriz S_{rpi} .

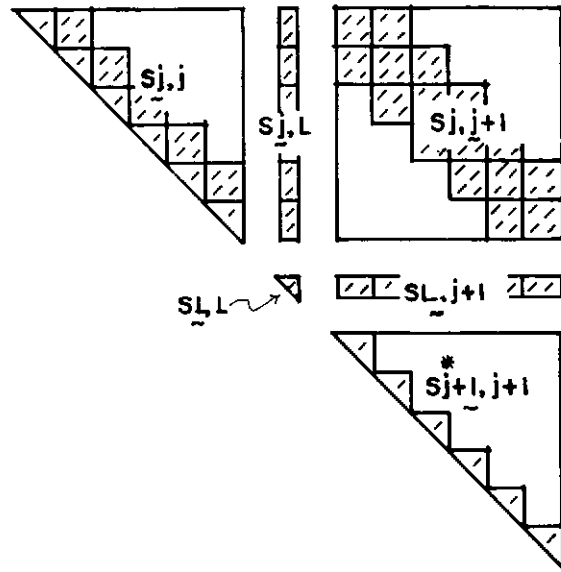


Fig. IV.7 - Matriz de rigidez reduzida de painel para um andar i

Sendo que "L" representa os graus de liberdade de andar do andar 1 ao andar i .

*

A submatriz $S_{j+1,j+1}$ nesta fase se encontra incompleta, pois ainda não recebeu a contribuição dos elementos estruturais do andar $i+1$.

Antes de se fazer a condensação da matriz de rigidez reduzida de painel S_{rpi} , optou-se por fazer uma reordenação de seus termos, correspondendo a uma permuta dos graus de liberdade independentes do nó j , pelos $j+1$. Desta forma, obtém-

se a seguinte matriz.

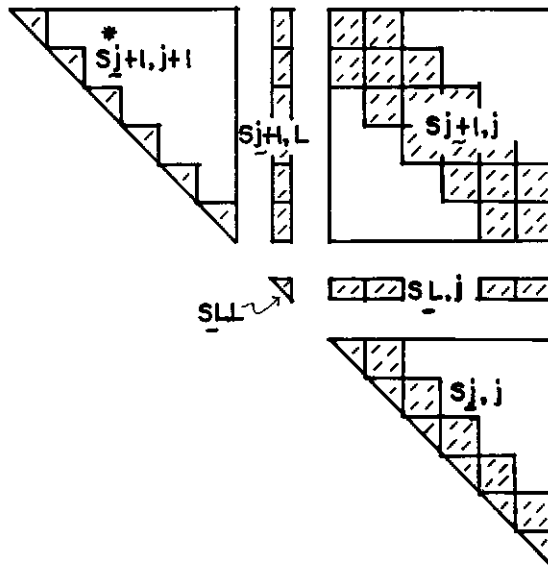


Fig. IV.8 - Matriz de rigidez reduzida de painel reordenada para um andar i

A seguir, procede-se a condensação dos graus de liberdade de baixo para cima pelo método de Gauss, onde se "elimina" os termos correspondentes aos graus de liberdade independentes do nó $j+1$. A matriz obtida é representada na figura (IV.9).

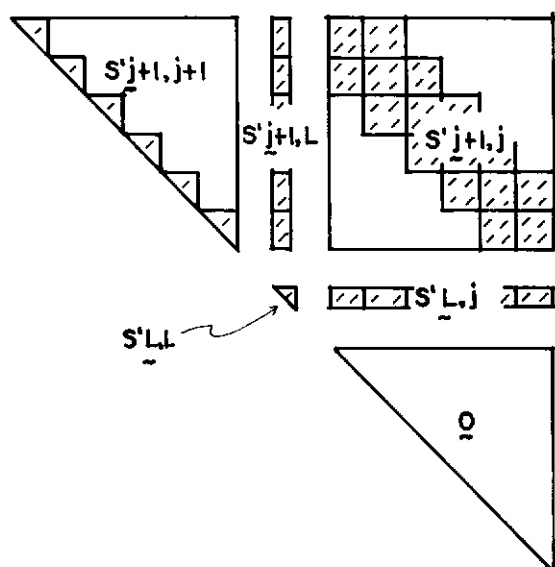


Fig. IV.9 - Matriz de rigidez reduzida de painel condensada para um andar i

O processo de reordenação da matriz de rigidez reduzida de painel se justifica agora, pois a matriz obtida após a condensação de graus de liberdade, já se encontra pronta para ser utilizada no andar seguinte. Como já foi visto, o acoplamento entre os andares i e $i+1$ se faz através da submatriz $S_{j+1,j+1}$. Assim sendo, na análise do andar $i+1$ deve-se somar a submatriz $S_{j+1,j+1}$ com a submatriz $S'_{j+1,j+1}$, que contém os resíduos do processo de condensação de graus de liberdade do andar anterior.

Repetindo-se o processo até o último andar, obtém-se a matriz de rigidez reduzida de painel S_{rp} , relacionada com os graus de liberdade de andar.

IV.2.2 - Matriz de rigidez reduzida da estrutura

Considere-se a matriz de rigidez reduzida de painel S_{rp} , relativa ao sistema de referência de painel. Um coeficiente $S_{i,j}$ desta matriz é numericamente igual à força restritiva na direção i para um deslocamento unitário na direção j e deslocamentos nulos nas demais direções. Cada coeficiente de rigidez $S_{i,j}$ gerará uma submatriz relacionada com o sistema de referência global. A acumulação destas submatrizes para todos os painéis resultará na matriz de rigidez reduzida da estrutura S_{re} .

Seja um painel representado pela linha AB no andar j segundo o sistema de eixos global, sofrendo um deslocamento unitário na direção X , passando para a posição $A'B'$, como mostrado na figura (IV.10).

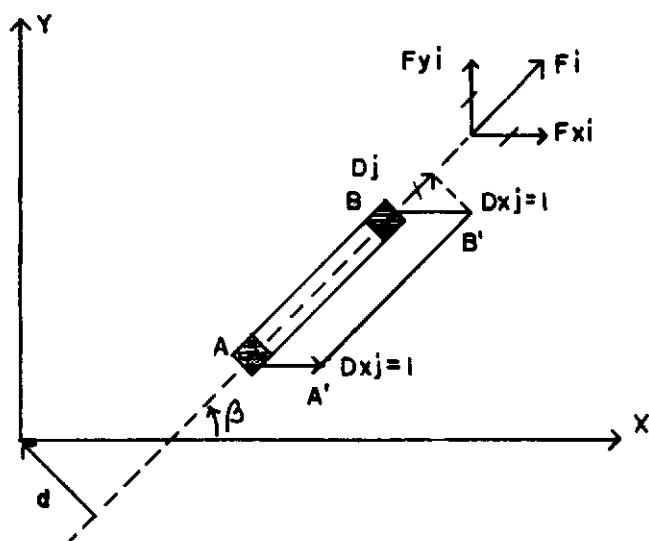


Fig. IV.10 - Influência de um deslocamento unitário na direção X no deslocamento horizontal de andar de painel

O deslocamento horizontal de painel segundo a direção j é dado pela seguinte expressão:

$$D_j = D_{xj} \cos \beta \quad (4.4)$$

A força na direção i pode ser representada pela seguinte expressão:

$$F_i = S_{i,j} D_j \quad (4.5)$$

$$\text{ou } F_i = S_{i,j} D_{xj} \cos \beta \quad (4.6)$$

Em relação ao referencial global XYZ, tem-se as seguintes expressões para as componentes de F_i :

$$F_{xi} = F_i \cos \beta \quad (4.7)$$

$$\text{ou } F_{xi} = S_{i,j} D_{xj}^2 \cos \beta \quad (4.8)$$

$$F_{yi} = F_i \sin \beta \quad (4.9)$$

$$\text{ou } F_{yi} = S_{i,j} D_{xj} \sin \beta \cos \beta \quad (4.10)$$

$$M_i = F_i d \quad (4.11)$$

$$\text{ou } M_i = S_{i,j} D_{xj} d \cos \beta \quad (4.12)$$

Da mesma forma, para um deslocamento unitário na direção Y , tem-se as seguintes expressões:

$$D_j = D_{yj} \sin \beta \quad (4.13)$$

$$F_i = S_{i,j} D_j \quad (4.14)$$

$$\text{ou } F_i = S_{i,j} D_{yj} \sin \beta \quad (4.15)$$

$$F_{xi} = F_i \cos \beta \quad (4.16)$$

$$\text{ou } F_{xi} = S_{i,j} D_{yj} \operatorname{sen} \beta \cos \beta \quad (4.17)$$

$$F_{yi} = F_i \operatorname{sen} \beta \quad (4.18)$$

$$\text{ou } F_{yi} = S_{i,j} D_{yj}^2 \operatorname{sen}^2 \beta \quad (4.19)$$

$$M_i = F_i d \quad (4.20)$$

$$\text{ou } M_i = S_{i,j} D_{yj} d \operatorname{sen} \beta \quad (4.21)$$

Ainda para uma rotação unitária θ_j em torno do eixo Z, tem-se as seguintes expressões:

$$D_j = \theta_j d \quad (4.22)$$

$$F_i = S_{ij} D_j \quad (4.23)$$

$$\text{ou } F_i = S_{i,j} \theta_j d \quad (4.24)$$

$$F_{xi} = F_i \cos \beta \quad (4.25)$$

$$\text{ou } F_{xi} = S_{i,j} \theta_j d \cos \beta \quad (4.26)$$

$$F_{yi} = F_i \operatorname{sen} \beta \quad (4.27)$$

$$\text{ou } F_{yi} = S_{i,j} \theta_j d \operatorname{sen} \beta \quad (4.28)$$

$$M_i = F_i d \quad (4.29)$$

$$\text{ou } M_i = S_{i,j} \theta_j d^2 \quad (4.30)$$

Considerando que os deslocamentos D_{xj} , D_{yj} , θ_j são deslocamentos segundo os graus de liberdade $3j-2$, $3j-1$ e $3j$ indicados na figura (IV.5) ao nível do piso do andar j , verifica-se que cada elemento $S_{i,j}$ da matriz de rigidez reduzida de painel S_{rp} referida ao sistema de eixos de painel, gera uma submatriz $K_{i,j}$, de dimensão 3, da matriz de rigidez

reduzida de painel, referida ao sistema de eixos global. Esta submatriz localiza-se nas interseções das linhas $3i-2$, $3i-1$ e $3i$ com as colunas $3j-2$, $3j-1$ e $3j$ e é representada pela seguinte expressão:

$$K_{i,j} = S_{i,j} \begin{bmatrix} \cos^2 \beta & \sin \beta \cos \beta & d \cos \beta \\ \sin \beta \cos \beta & \sin^2 \beta & d \sin \beta \\ \text{SIMETRIA} & & d \end{bmatrix} \quad (4.31)$$

Portanto, cada elemento $S_{i,j}$ de cada painel gera uma submatriz $K_{i,j}$ que é acumulada em uma matriz de ordem $3 \times \text{Número de andares}$. Ao final deste processo, esta matriz resulta na matriz de rigidez reduzida da estrutura S_{re} .

IV.2.3 - Deslocamentos horizontais de andar

Tendo calculado a matriz de rigidez reduzida da estrutura S_{re} e de posse do vetor de cargas horizontais F_h , resolve-se o sistema de equações $S_{re} D_h = F_h$ via método de Gauss, obtendo-se o vetor de deslocamentos horizontais de andar D_h .

IV.2.4 - Deslocamentos horizontais de painel

Considere-se um painel representado pela linha AB no andar j , segundo o sistema de eixos global. A figura (IV.11) mostra a influência dos deslocamentos horizontais de andar D_{h3j-2} , D_{h3j-1} e D_{h3j} no deslocamento horizontal de painel D_j .

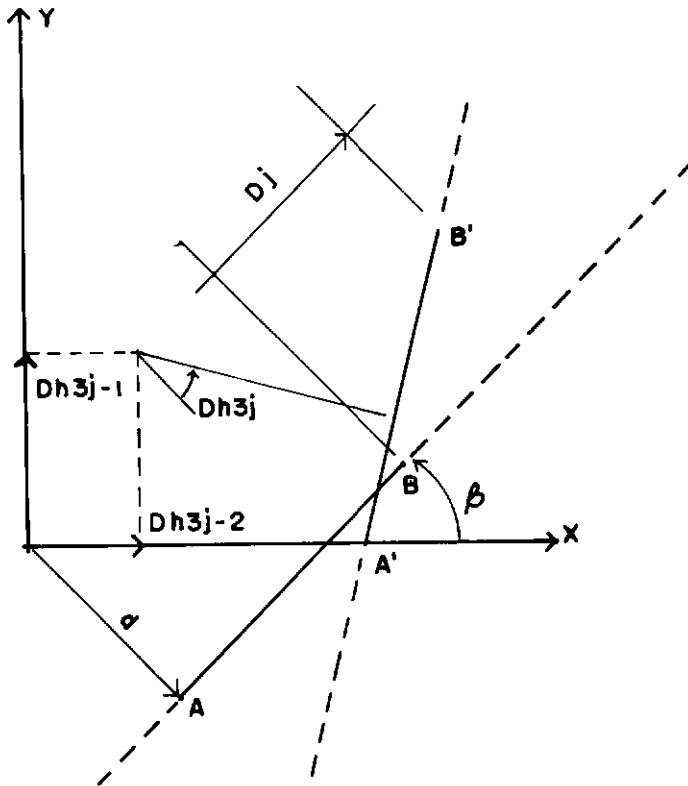


Fig. IV.11 - Influência dos deslocamentos horizontais de andar no deslocamento horizontal de painel

O deslocamento horizontal D_j do painel no andar j é dado pela seguinte expressão:

$$D_j = Dh_{3j-2} \cos \beta + Dh_{3j-1} \sin \beta + Dh_{3j} d \quad (4.32)$$

O vetor deslocamento de painel D_{ph} é obtido calculando-se os valores de D_j para todos os andares do painel.

IV.2.5 - Cargas horizontais de painel

Determinados os deslocamentos que se verificam num painel ao nível dos pisos para um carregamento horizontal, determinam-se as forças que estes pisos exercem sobre o painel, através da seguinte expressão:

$$F_{ph} = S_{rp} D_{ph}$$

(4.33)

Este vetor de cargas de painel representa a parcela de carga horizontal absorvida pelo painel em função de sua rigidez e localização em planta. Estas cargas aplicadas aos painéis produzem deslocamentos horizontais compatíveis com os deslocamentos de corpo rígido das lajes.

IV.3 - Análise de deslocamentos e esforços nos elementos estruturais

Após a distribuição do carregamento horizontal entre os diversos painéis, segue-se o cálculo dos deslocamentos e esforços nos elementos estruturais. Este processo apresenta alguma semelhança com o anterior no tratamento da matriz de rigidez de painel. Faz-se, de início, a montagem da matriz de rigidez de painel S_{pi} para um andar i , seguindo-se a reordenação dos graus de liberdade, triangularização desta matriz pelo método de Gauss e armazenamento dos coeficientes em memória auxiliar. A próxima etapa consiste na montagem do vetor independente de cargas de um andar i , F_i , recuperação da matriz S_{pi} da memória auxiliar e as fases de substituição e retrossubstituição, obtendo-se o vetor de deslocamento do andar i , D_i , ocupando a mesma área de memória destinada ao vetor de cargas F_i . Com este vetor de deslocamento, a matriz de rigidez dos elementos estruturais e o vetor de ações de engastamento perfeito, F_{ep} , obtêm-se os esforços atuantes nestes elementos.

IV.3.1 - Matriz de rigidez de painel para um andar i

Considerem-se os graus de liberdade de painel representados pela figura (IV.6). A montagem da matriz de rigidez de painel S_{pi} para um andar i , difere da matriz S_{rpi} do item IV.2.1, por considerar para "L" apenas o grau de liberdade de andar do andar i .

IV.3.2 - Resolução do sistema de equações

O sistema de equações é resolvido pelo método de Gauss, utilizando um particionamento em "blocos de andar". Devido à limitação de memória do microcomputador, optou-se pela montagem e triangularização da matriz de rigidez em uma etapa distinta da montagem do vetor de cargas. Desta forma, faz-se a triangularização da matriz S_{pi} e armazenam-se seus coeficientes em memória auxiliar. Segue-se a análise do andar seguinte até o último andar, lembrando-se que no acoplamento dos andares, a

*

submatriz $S_{j+1,j+1}$ deve ser somada com a submatriz $S_{j+1,j+1}$ que contém os resíduos do processo de triangularização da matriz de rigidez do andar anterior.

Faz-se a seguir para um andar i , a montagem do vetor de cargas F_i e a recuperação da matriz S_{pi} já triangularizada da memória auxiliar. Procede-se então à fase de substituição até o último andar e à fase de retrossubstituição, buscando-se a matriz S_{pi} triangularizada a partir do penúltimo andar até o andar 1, obtendo-se o vetor deslocamento D_i na mesma área de memória do vetor F_i .

IV.3.3 - Esforços nas extremidades dos elementos

IV.3.3.1 - Elemento viga

Considere-se a expressão (3.12) que relaciona os esforços e deslocamentos para um elemento viga no sistema de eixos global. Como este sistema coincide com o sistema de eixos global de painel, esta expressão permanece válida para o cálculo dos esforços nas extremidades dos elementos vigas. Porém, quando se considera cargas aplicadas aos elementos vigas, as ações de engastamento perfeito aparecem nesta expressão, que deve ser reescrita sob a seguinte forma

$$F_{vt} = S_{vt} D_{vt} + F_{ap} \quad (4.34)$$

sendo $S_{vt} = T_v S_{vl} T_v$

IV.3.3.2 - Elemento pilar

Considere-se a expressão (3.5) que relaciona os esforços e deslocamentos para um elemento coluna no sistema local. Substituindo-se a expressão (3.15) em (3.5), tem-se

$$F_{pl} = S_{pl} R D_{pr} \quad (4.35)$$

Substituindo-se a expressão (3.22) em (4.35), tem-se

$$F_{pl} = S_{pl} R T_p D_{pg} \quad (4.36)$$

Desta forma, obtêm-se os esforços nas extremidades dos elementos pilares segundo o sistema de eixos local de pilar.

IV.4 - Considerações gerais

Este item objetiva fazer uma descrição mais detalhada de algumas implementações utilizadas neste trabalho.

IV.4.1 - Pontos nodais

Os pontos nodais de um painel são obtidos pelas projeções dos nós no eixo x e devem ser numerados em ordem crescente da esquerda para a direita. Define-se desta forma, a numeração de pontos nodais de painel.

Para cada andar, faz-se uma numeração local dos pontos nodais, onde os nós são numerados também em ordem crescente da esquerda para a direita.

Assim sendo, quando estas numerações de pontos nodais não são coincidentes, as matrizes de rigidez de painel para um andar i apresentam a forma mais "compacta", pois elas são sempre relacionadas com um menor número de pontos nodais.

A figura IV.12 mostra um painel com numeração de pontos nodais local de andar para cada andar e numeração de pontos nodais local de painel.

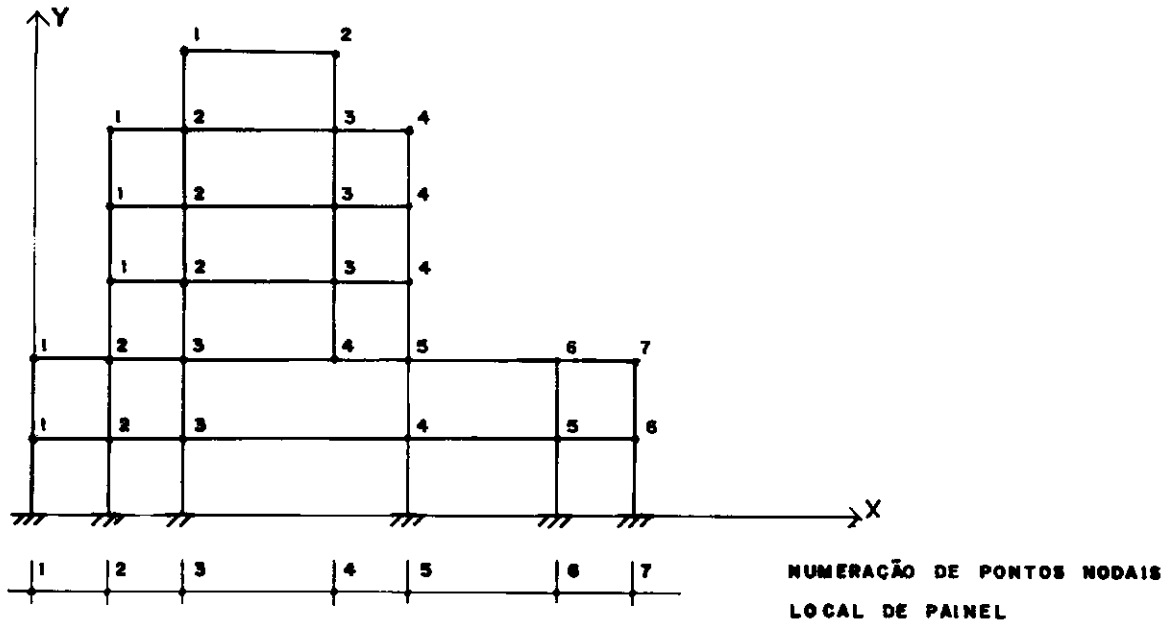


Fig. IV.12 - Numeração de pontos nodais

IV.4.1.1 - Acréscimo de pontos nodais

Quando da passagem de um andar para outro houver inclusão de ponto nodal, faz-se uma alteração na numeração de pontos nodais local de andar em relação ao andar anterior, obedecendo ao critério de numeração de pontos nodais local de andar, tornando-o válido para todos os andares.

IV.4.1.2 - Eliminação de pontos nodais

Da mesma forma, quando da passagem de um andar para outro houver exclusão de ponto nodal, faz-se uma alteração na numeração de pontos nodais local de andar.

IV.4.2 - Montagem da matriz de rigidez reduzida de painel para um andar i

Considerem-se os elementos viga e pilar mostrados na figura (IV.13), com a regra de espalhamento de seus coeficientes de rigidez na matriz Sr_{pi} .

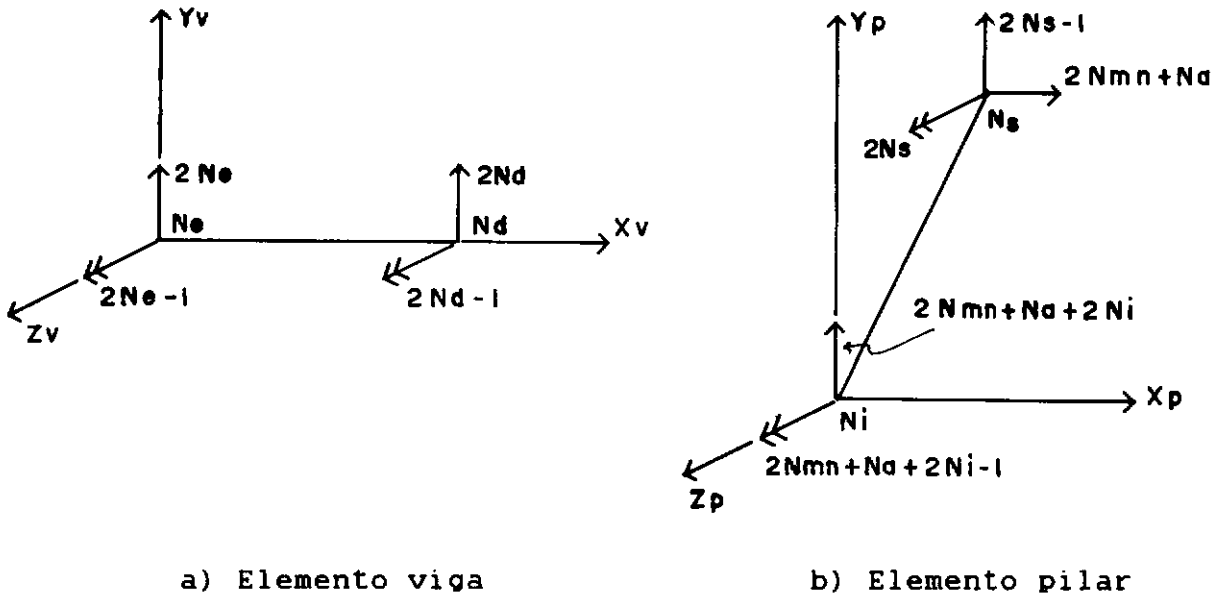


Fig. IV.13 - Regra de espalhamento de coeficientes de rigidez para a montagem da matriz Sr_{pi}

Nesta figura N_e e N_d são os nós das extremidades esquerda e direita do elemento viga, respectivamente, N_s e N_i os nós das extremidades superior e inferior do elemento pilar, respectivamente, $N_m n$ o número máximo de nós no andar e N_a o número do andar.

A matriz de rigidez reduzida de painel para um andar i , Sr_{pi} , é obtida após o espalhamento dos coeficientes de rigidez de todos os elementos do andar, somando-se aos já existentes.

IV.4.3 - Montagem da matriz de rigidez de painel para um andar i , S_{pi}

De forma semelhante, a matriz de rigidez de painel para um andar i , S_{pi} é obtida pelo espalhamento dos coeficientes de rigidez dos elementos viga e pilar, de acordo com a regra mostrada na figura (IV.14).

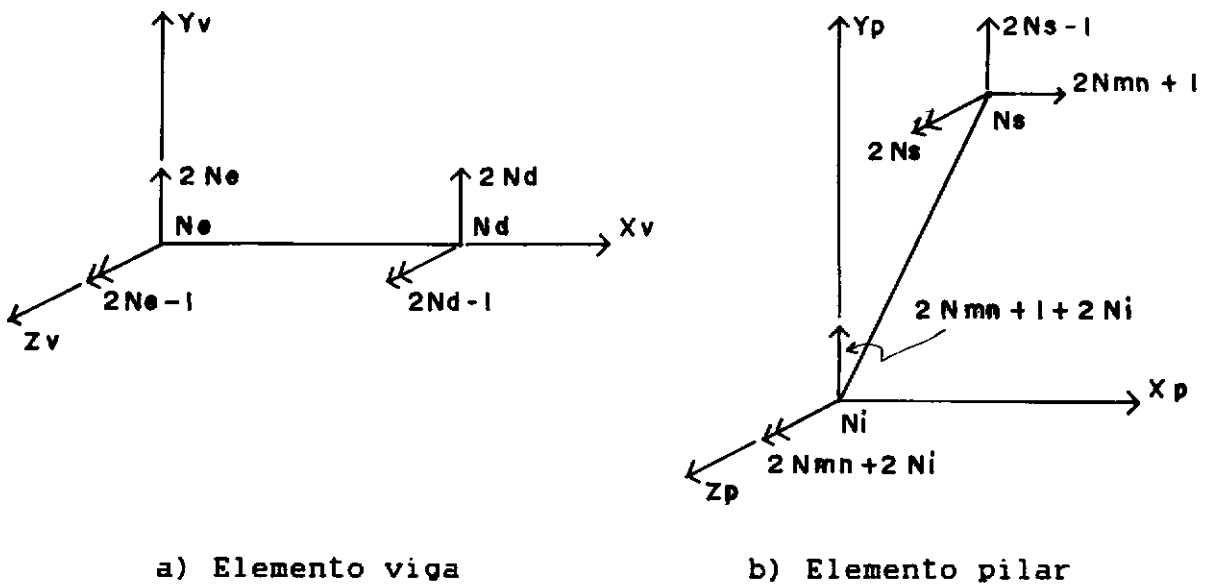
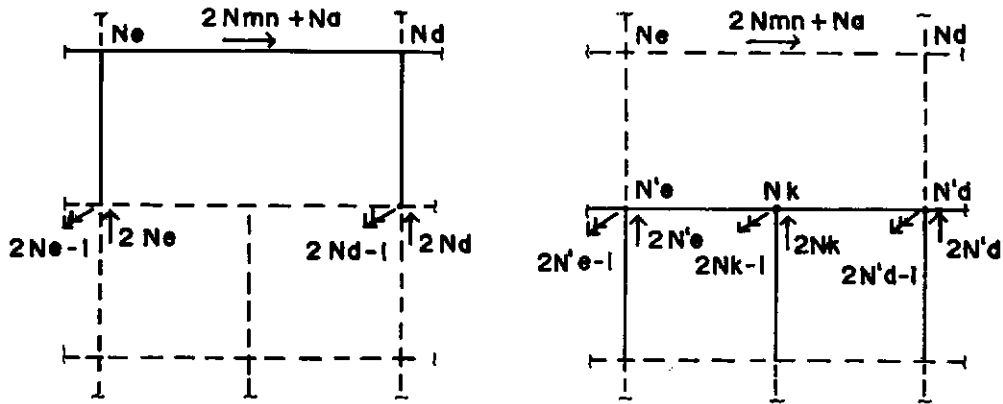


Fig. IV.14 - Regra de espalhamento de coeficientes de rigidez para a montagem da matriz S_{pi}

IV.4.4 - Reordenação da matriz S_{rpi} para inclusão de pontos nodais

Este processo de reordenação é feito logo após a condensação de graus de liberdade do andar precedente. Para o andar seguinte, a numeração dos pontos nodais é alterada e consequentemente, a matriz de rigidez S_{rpi} deve sofrer uma reordenação de seus coeficientes, com a criação de novos graus de liberdade, possibilitando uma correspondência exata com esta numeração de pontos nodais. A figura (IV.15) mostra os graus de

liberdade de um painel, antes e depois da consideração da inclusão de ponto nodal.

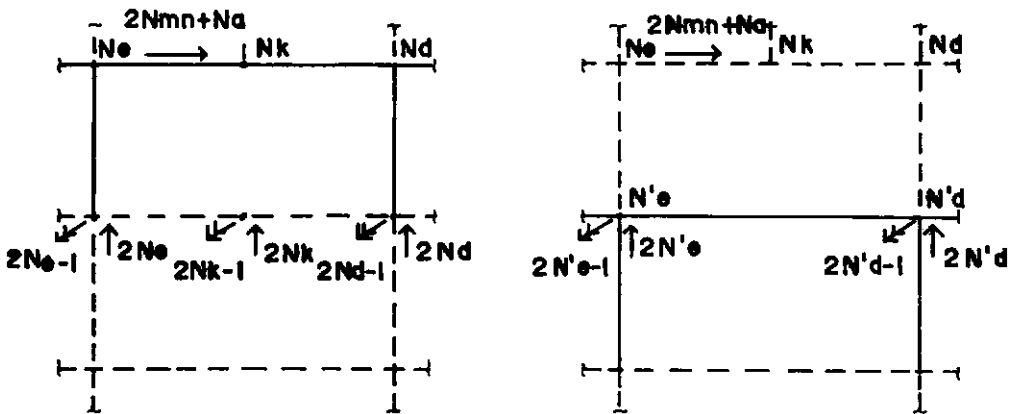


a) Antes da inclusão do nó N_k b) Após a inclusão do nó N_k

Fig. IV.15 - Graus de liberdade relacionados com a matriz Sr_{pi} para inclusão de pontos nodais

IV.4.5 - Reordenação da matriz Sr_{pi} para exclusão de pontos nodais

De forma análoga, faz-se uma reordenação nos coeficientes da matriz de rigidez Sr_{pi} , com uma eliminação de graus de liberdade, possibilitando uma perfeita correspondência com os graus de liberdade do andar seguinte. A figura (IV.16) mostra os graus de liberdade de um painel, antes e depois da consideração da exclusão de ponto nodal.



a) Antes da exclusão do nó N_k b) Após a exclusão do nó N_k

Fig. IV.16 - Graus de liberdade relacionados com a matriz S_{pi} para exclusão de pontos nodais

IV.4.6 - Reordenação da matriz S_{pi} para inclusão e exclusão de pontos nodais

O procedimento utilizado para reordenação da matriz de rigidez de painel S_{pi} é semelhante aos procedimentos dos itens (IV.4.4) e (IV.4.5), lembrando-se apenas a diferença vista na montagem destas duas matrizes em questão.

V - PROGRAMAÇÃO AUTOMÁTICA

V.1 - Generalidades

A programação automática foi desenvolvida em linguagem BASIC, para microcomputadores compatíveis com a linha APPLE II. O equipamento utilizado compreende uma CPU de 48 Kbytes de memória RAM (sendo aproximadamente 36 Kbytes disponíveis), 2 drives, monitor e impressora. Para os programas de entrada de dados, utilizou-se o BASIC interpretado, pois tais programas ocupam um grande espaço de memória (em certos casos, impossibilitando a compilação para a quantidade de memória RAM disponível) e por não precisar necessariamente de um processamento mais rápido. Para os demais programas utilizou-se o BASIC compilado, objetivando a análise com um menor tempo de processamento.

Ao conjunto de programas desenvolvidos, deu-se o nome de APEL versão 1.0 - ANALISE APROXIMADA DE EDIFÍCIOS ELEVADOS. Devido à limitação de memória central, utilizou-se um particionamento do processamento em diversos programas encadeados, gerenciados ou não por um menu principal, onde cada programa faz transferências de variáveis com arquivos sequenciais gravados em memória auxiliar. Estes arquivos foram projetados para armazenar os dados em vetores unidimensionais, com um eficiente gerenciamento destes dados através de vetores apontadores, possibilitando um melhor uso da memória auxiliar disponível.

As estruturas usuais de edificios altos apresentam características que possibilitam uma boa estruturação da programação automática, visando um melhor aproveitamento da memória central do microcomputador. As principais características são: repetição de dados estruturais e/ou de carregamentos, provável existência de simetria na estrutura e pavimento-tipo. Estas duas últimas características são muito importantes, pois minimizam consideravelmente o tempo de processamento. No caso de haver simetria, pode-se diminuir a quantidade de painéis a ser analisada. Quando da existência de pavimento-tipo, as vantagens também são grandes, evitando repetições de fornecimento de dados e de processamentos desnecessários.

Os programas que compõe este trabalho são descritos a seguir.

V.2 - Programas

V.2.1 - MENU

O programa MENU gerencia parte dos programas, possibilitando ao usuário definir as opções desejadas para a análise estrutural. O gerenciamento dos programas é feito envolvendo 4 grupos de programas:

1 - Programas de entrada de dados:

DADOS1 - Lê os dados gerais da estrutura e volta ao menu principal.

DADOS2 - Lê os dados de carregamento e volta ao menu

principal.

2 - Programas de impressões de relatórios:

RELAT1 - Imprime os dados gerais da estrutura e volta ao menu principal.

RELAT2 - Imprime os dados de carregamento e volta ao menu principal.

3 - Programas de processamento de dados:

RIG1 - Inicializa o processamento, sendo seguido pelos programas encadeados:

RIG2

GAUSS

FORCA

ESF1

ESF2

ESF3 - Finaliza o processamento, armazenando os resultados em memória auxiliar e voltando ao menu principal.

4 - Programa de impressão de resultados:

RESULT - Imprime os resultados da análise e volta ao menu principal.

V.2.2 - DADOS1

Este programa tem por objetivo a leitura de dados geométricos da estrutura e armazenamento destes dados em memória auxiliar. O seu funcionamento se faz com uma grande interação entre o usuário e o equipamento, permitindo o fornecimento de uma grande quantidade de dados de forma

simples, e com recursos para corrigir prováveis erros que possam ser cometidos.

Utilizam-se tabelas de tipos de materiais e seções transversais, facilitando o fornecimento destes dados, quando os mesmos se repetem para vários elementos estruturais.

Quando da existência de painéis que apresentam as mesmas características geométricas, podem-se fornecer somente os dados de um painel, indicando que o painel seguinte é igual ao anterior e assim sucessivamente, sempre que houver repetição de painel. Para cada painel, porém, devem-se fornecer os dados que traduzem a sua localização em planta, que em geral difere de um painel para outro.

Os dados correspondentes aos andares dos painéis são fornecidos iniciando-se do primeiro andar, que deve ser o andar localizado na extremidade superior do painel, ao último andar. Quando da passagem de um andar para o andar consecutivo, não é necessário fornecer todos os dados pertinentes a este andar, bastando fornecer apenas as alterações ocorridas nesta passagem. Caso não haja nenhuma alteração, basta indicar que este andar é igual ao anterior, partindo-se então para o fornecimento de dados do andar seguinte.

O fornecimento de dados é feito em etapas, podendo ou não estar dentro de um laço correspondente às variáveis fornecidas em série. Ao final de cada etapa, exibe-se na tela um menu, que possibilita modificações nos dados fornecidos ou

passagem para a etapa seguinte. Ao final de um determinado conjunto de etapas, faz-se a gravação dos dados em memória auxiliar, liberando-se os vetores que compreendem as variáveis, para serem utilizados nas etapas seguintes. Este conjunto de etapas foi definido de maneira a obter a quantidade máxima de variáveis em memória central, com um mínimo de tempo gasto nas transferências de variáveis para a memória auxiliar.

V.2.3 - DADOS2

Este programa apresenta características idênticas ao programa anterior, sendo inclusive gerenciado por alguns dados do mesmo. O objetivo do programa DADOS2 é a leitura do número de casos de carregamentos e os dados de todos os carregamentos. Cada carregamento pode apresentar cargas horizontais, verticais, cargas provenientes da análise automática do peso próprio e/ou suas associações. As cargas horizontais são aplicadas à estrutura ao nível das lajes, segundo o sistema de eixos global. As cargas verticais podem ser aplicadas às vigas, conforme os tipos de cargas mostrados no apêndice 2 e/ou aplicadas diretamente aos nós dos painéis, segundo o sistema de eixos de painel.

Caso algum painel possua o mesmo carregamento de um outro, estes dados não precisam ser novamente fornecidos, a menos que estes painéis não apresentem as mesmas características geométricas.

V.2.4 - RELAT1

O programa RELAT1 recupera os dados gerais da estrutura gravados no arquivo e imprime um relatório correspondente a estes dados. Este relatório apresenta uma formatação que permite uma fácil visualização destes dados, indicando as repetições de dados porventura existentes.

Este programa fica gerenciado pelo menu principal, sendo opcional a sua execução pelo usuário.

V.2.5 - RELAT2

Apresenta as mesmas características do programa RELAT1, para dados de carregamento.

V.2.6 -RIG1

Este programa inicia o processamento dos dados fornecidos através dos programas DADOS1 e DADOS2. Seu objetivo é calcular as matrizes de rigidez reduzidas de todos os painéis, S_{rp} . Para cada painel, é feita a montagem da matriz de rigidez de andar, S_{rpi} , reordenação e condensação desta matriz, acoplamento com a matriz de rigidez do andar seguinte, repetindo-se o processo até o último andar, obtendo-se a matriz S_{rp} . Esta matriz é gravada em memória auxiliar em um único vetor, que ao final da execução do programa, conterá as matrizes S_{rp} de todos os painéis. O programa seguinte, RIG2, é encadeado a este, sem a passagem pelo menu principal.

V.2.7 - RIG2

O programa RIG2 calcula a matriz de rigidez reduzida da estrutura, S_{re} , em função das matrizes S_{rp} e da localização de cada painel em planta. Neste cálculo, recupera-se da memória auxiliar cada matriz de rigidez reduzida de painel, e de acordo com a matriz $K_{i,j}$, obtém-se a contribuição de um coeficiente para a matriz de rigidez reduzida da estrutura S_{re} . Ao repetir este processo para todos os coeficientes das matrizes de rigidez, S_{rp} , de todos os painéis, obtém-se a matriz S_{re} desejada. Segue-se a gravação dos coeficientes desta matriz em memória auxiliar, e a execução do programa GAUSS.

V.2.8 - GAUSS

Este programa objetiva o cálculo dos deslocamentos horizontais da estrutura. Inicialmente, recupera-se a matriz de rigidez reduzida da estrutura S_{re} e o vetor de cargas horizontais F_h , da memória auxiliar. Faz-se a resolução do sistema de equações pelo método de GAUSS, obtendo-se o vetor de cargas horizontais, D_h . Este vetor é armazenado em memória auxiliar, passando-se então à execução do programa seguinte, FORCA.

V.2.9 - FORCA

Com este programa, calculam-se os quinhões de cargas horizontais a serem aplicados aos painéis. A partir do vetor de deslocamentos horizontais da estrutura, D_h , recuperado da memória auxiliar, e da localização em planta dos painéis, calcula-se o vetor deslocamento horizontal de cada painel, D_{ph} .

Este vetor multiplicado pela matriz de rigidez reduzida de painel, S_{rp} , produz o vetor de cargas horizontais, F_{ph} , deste painel, que é armazenado em memória auxiliar num único vetor, que contém os vetores F_{ph} de todos os painéis.

A análise da distribuição do carregamento horizontal fica então estabelecida ao término deste programa, passando-se então à análise de esforços nas extremidades dos elementos estruturais dos painéis isolados, sob a ação de carregamento horizontal e vertical.

V.2.10 - ESF1

Este programa monta as matrizes de rigidez de andar, S_{pi} , para um determinado painel, triangulariza estas matrizes pelo método de GAUSS e armazena seus coeficientes em memória auxiliar. Feito este processo para todos os andares de todos os painéis, executa-se o programa seguinte, ESF2.

V.2.11 - ESF2

O programa ESF2 monta o vetor de cargas para um "bloco de andar", recupera a correspondente matriz triangularizada S_{pi} , e segue o processo de resolução do sistema de equações na fase de substituição, armazenando o vetor de cargas modificado em memória auxiliar. No último andar do painel, inicia-se a fase de retrossubstituição, obtendo-se o vetor deslocamento de painel, D_{pi} , que passa a ser armazenado em memória auxiliar. Este procedimento é feito para todos os andares, de todos os painéis. Segue-se a execução do programa ESF3.

V.2.12 - ESF3

Este programa objetiva o cálculo dos esforços finais nos elementos viga segundo a expressão (4.34), e elementos pilar segundo a expressão (4.36). As matrizes de rigidez S_{vl} e S_{pl} são novamente calculadas, bem como as matrizes R e T_p . Optou-se por este procedimento, pois verificou-se que o tempo gasto com transferências destas matrizes com a memória auxiliar, seria tão ou mais longo quanto se o cálculo destas matrizes fosse refeito. Porém, o aspecto decisivo para esta opção, refere-se à economia de espaço em memória auxiliar, visto que este modelo fica praticamente limitado pela quantidade de memória auxiliar. O vetor de ações de engastamento perfeito F_{ep} é calculado novamente pelas mesmas razões apresentadas. Obtidos os esforços nas extremidades dos elementos, F_{vl} e F_{pl} , faz-se a gravação destes resultados em memória auxiliar, terminando a fase de processamento. A seguir, volta-se ao menu principal.

V.2.13 - RESULT

O programa RESULT imprime os resultados da análise estrutural. Estes resultados são obtidos da memória auxiliar, que foram previamente gravados pelo programa ESF3. A impressão se faz utilizando uma formatação que permite um fácil entendimento e indicando repetições, caso haja, sem a necessidade de gastos adicionais com impressões desnecessárias. Ao final da execução deste programa, retorna-se ao menu principal.

VI - EXEMPLOS E CONCLUSOES

VI.1 - Exemplos

Foram processados 3 exemplos de estruturas, aumentando-se gradativamente o grau de complexidade.

Os resultados apresentados são comparados com os do modelo tridimensional utilizado por Câmara Jr. (4), de programação ATEEL, implementada em um computador BURROUGHS 6800. Este modelo não oferece resultados exatos, pois apresenta como hipótese simplificadora a suposição do comportamento linear físico e geométrico para a estrutura.

VI.1.1 - Exemplo 1

VI.1.1.1 - Planta baixa

Este exemplo é contituido de uma torre retangular de 4 vigas e 4 pilares por andar, conforme planta baixa apresentada na figura VI.1.

VI.1.1.2 - Especificações

Número de andares = 15

Altura dos andares = 3 m

Módulo de elasticidade = $31000000000 \text{ kgf/m}^2$

Dimensões das vigas:

V1 e V2 - 20/50 (em cm)

V3 e V4 - 20/60 (em cm)

Dimensões dos pilares : 30/60 (em cm)

Carregamento 1 : Vento na direção Y + carga vertical

Carga horizontal na direção Y, $F_Y = 720$ kgf em todos os andares.

Carga vertical uniformemente distribuída nas vigas:

V1 e V2 - 1100 kgf/m

V3 e V4 - 1250 kgf/m

Carregamento 2 : Vento na direção X

Carga horizontal na direção X, $F_X = 900$ kgf em todos os andares.

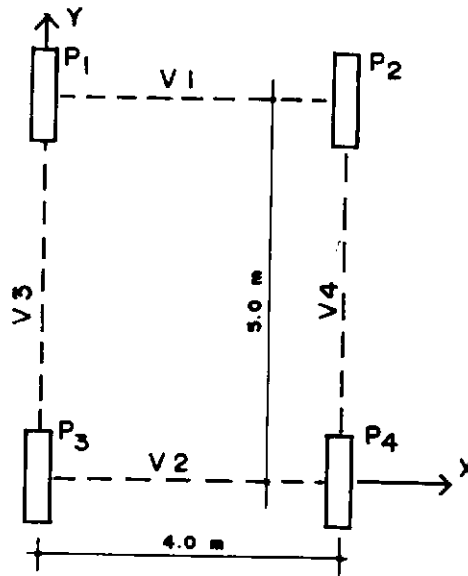
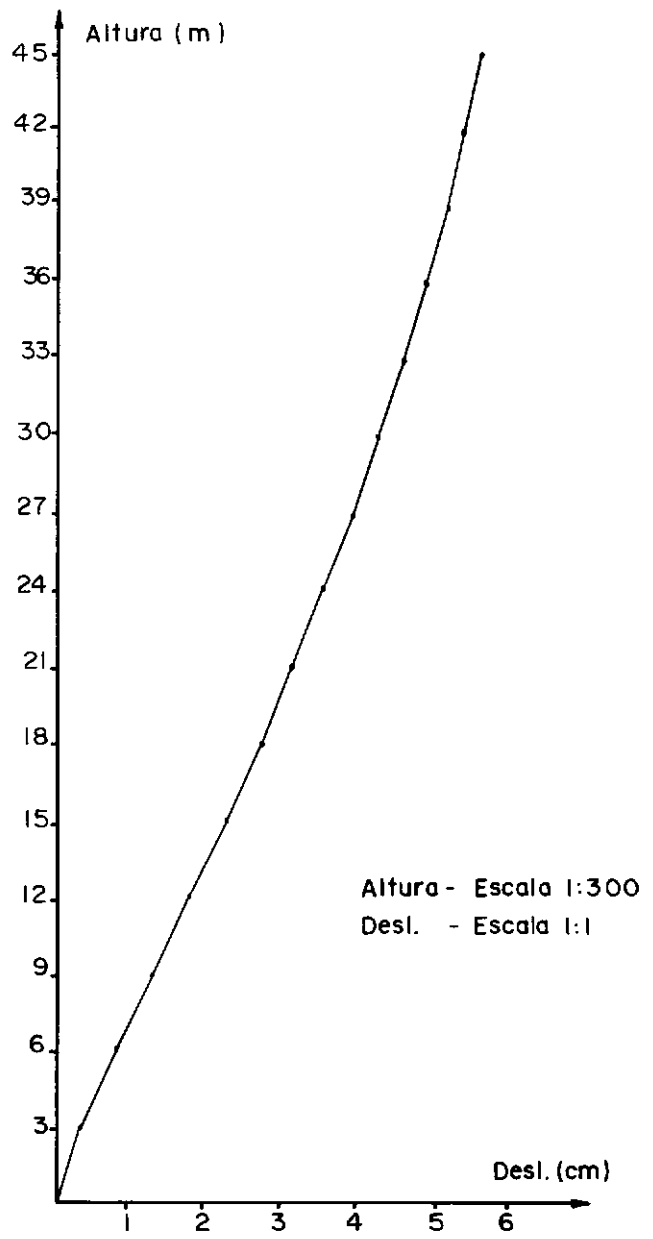
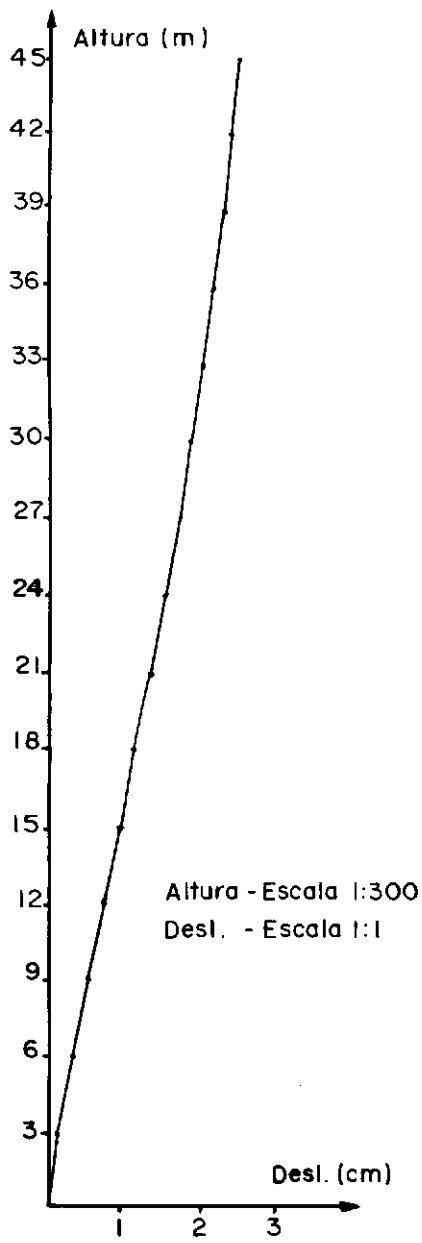


Fig. VI.1 - Exemplo 1

VI.1.1.3 - Resultados

Os resultados obtidos para este exemplo foram idênticos aos resultados obtidos pelo modelo tridimensional, ATEEL, tanto para esforços como para deslocamentos. A figura (VI.2) mostra a deformada da estrutura para os dois casos de carregamento.



a) Caso de carregamento 1

b) Caso de carregamento 2

Fig. VI.2 - Deformada da estrutura do exemplo 1

VI.1.2 - Exemplo 2

VI.1.2.1 - Planta baixa

Este exemplo é constituído de uma estrutura de edifício em concreto com 10 andares, apresentando um pavimento tipo, conforme planta baixa apresentada na figura VI.3.

VI.1.2.2 - Especificações

Número de andares = 10

Altura dos andares = 3 m

Módulo de elasticidade = $31000000000 \text{ kgf/m}^2$

Dimensões das vigas :

De V1 a V6 - 20/50 (em cm)

De V7 a V11 - 20/65 (em cm)

Dimensões dos pilares :

De P1 a P5 e de P10 a P19 - 20/60 (em cm)

De P6 a P9 - 20/80 (em cm)

P20 - dimensões indicadas em planta baixa

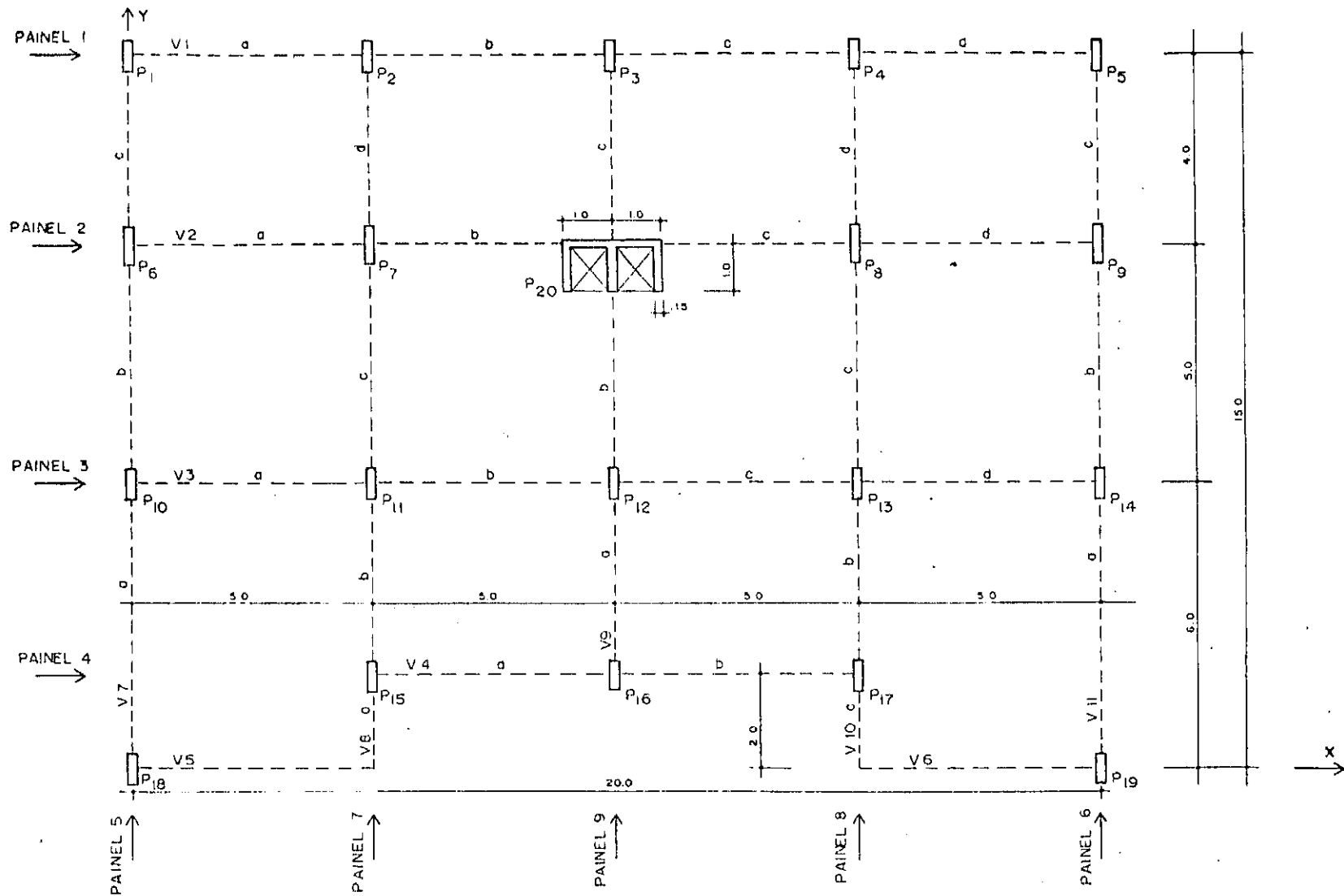
Carregamento 1 : Vento na direção Y

Andar 1 - FY = 1650 kgf

Do andar 2 ao andar 5 - FY = 3300 kgf

Do andar 6 ao andar 8 - FY = 2400 kgf

Do andar 9 ao andar 10 - FY = 1500 kgf



VI.3 - Exemplo 2

VI.1.2.3 - Resultados

A seguir, apresentam-se tabelas de resultados obtidos e comparados com os do modelo ATEEL. Por haver uma grande quantidade de dados, são apresentados somente os esforços nos elementos dos painéis 5 a 9, dos andares 1, 5 e 10. Devido à simetria da estrutura e carregamento, os painéis 5 e 7 são iguais aos painéis 6 e 8, respectivamente. Utiliza-se a seguir, a palavra aproximação para referir-se a diferença percentual em relação ao modelo ATEEL, tomado como referência.

PAINEL 5 ANDAR 1

VIGAS					
VIGA	MODELO	FY1	MZ1	FY2	MZ2
V7A	APEL	-74.6	-247.13	74.6	-200.49
	ATEEL	-72.48	-241.52	72.48	-193.36
V7B	APEL	-124.89	-264.06	124.89	-360.38
	ATEEL	-127.56	-271.21	127.56	-366.6
V7C	APEL	26.52	81.88	-26.52	24.22
	ATEEL	25.82	80.76	-25.82	22.52

V7A	APROXIM.	2.92 %	2.32 %	2.92 %	3.69 %
V7B	APROXIM.	2.09 %	2.64 %	2.09 %	1.7 %
V7C	APROXIM.	2.71 %	1.39 %	2.71 %	7.55 %

PILARES							
PILAR	MODELO	FX1	FY1	MZ1	FX2	FY2	MZ2
P18	APEL	74.6	-126.35	247.13	-74.6	126.35	131.93
	ATEEL	72.48	-123.15	241.52	-72.48	123.15	127.93
P10	APEL	50.28	-270.41	464.55	-50.28	270.41	346.68
	ATEEL	44.24	-270.45	464.58	-44.24	270.45	346.79
P6	APEL	-151.41	-117.63	278.51	151.41	117.64	74.38
	ATEEL	-154.85	-122.12	285.85	154.85	122.12	80.51
P1	APEL	26.52	31.64	-24.22	-26.52	-31.64	-70.68
	ATEEL	27.66	30.52	-22.52	-27.66	-30.52	-69.03

P18	APROXIM.	2.92 %	2.6 %	2.32 %	2.92 %	2.6 %	3.13 %
P10	APROXIM.	13.65 %	.01 %	.01 %	13.65 %	.01 %	.03 %
P6	APROXIM.	2.22 %	3.68 %	2.57 %	2.22 %	3.67 %	7.61 %
P1	APROXIM.	4.12 %	3.67 %	7.55 %	4.12 %	3.67 %	2.39 %

PAINEL 5

ANDAR 5

VIGAS

VIGA	MODELO	FY1	MZ1	FY2	MZ2
V7A	APEL	-366.92	-1161.81	366.92	-1039.7
	ATEEL	-363.54	-1151.82	363.54	-1029.47
V7B	APEL	-538.3	-1268.71	538.3	-1422.77
	ATEEL	-539.21	-1271.42	539.21	-1424.64
V7C	APEL	-592.67	-1191.44	592.67	-1179.26
	ATEEL	-590.69	-1187.26	590.69	-1175.52

V7A	APROXIM.	.93 %	.87 %	.93 %	.99 %
V7B	APROXIM.	.17 %	.21 %	.17 %	.13 %
V7C	APROXIM.	.34 %	.35 %	.34 %	.32 %

PILARES

PILAR	MODELO	FX1	FY1	MZ1	FX2	FY2	MZ2
P18	APEL	1099.69	-430.76	702.04	-1099.69	430.76	590.24
	ATEEL	1085.6	-427.29	696.5	-1085.6	427.29	585.37
P10	APEL	533.92	-848.46	1311.83	-533.92	848.46	1233.56
	ATEEL	493.41	-845.54	1307.25	-493.41	845.54	1229.37
P6	APEL	-353.28	-989.86	1609.47	353.28	989.86	1360.11
	ATEEL	-365.34	-988.38	1606.67	365.34	988.38	1358.47
P1	APEL	-1280.32	-456.06	730.24	1280.32	456.06	637.95
	ATEEL	-1272.47	-454.45	727.61	1272.47	454.45	635.75

P18	APROXIM.	1.3 %	.81 %	.8 %	1.3 %	.81 %	.83 %
P10	APROXIM.	8.21 %	.35 %	.35 %	8.21 %	.35 %	.34 %
P6	APROXIM.	3.3 %	.15 %	.17 %	3.3 %	.15 %	.12 %
P1	APROXIM.	.62 %	.35 %	.36 %	.62 %	.35 %	.35 %

PAINEL 5

ANDAR 10

VIGAS

VIGA	MODELO	FY1	MZ1	FY2	MZ2
V7A	APEL	-463.7	-1478.64	463.7	-1303.54
	ATEEL	-461.54	-1471.95	461.54	-1297.28
V7B	APEL	-661.74	-1560.43	661.74	-1748.27
	ATEEL	-660.04	-1556.54	660.04	-1743.67
V7C	APEL	-1021.17	-2080.77	1021.17	-2003.89
	ATEEL	-1017.33	-2072.91	1017.33	-1996.42

V7A	APROXIM.	.47 %	.45 %	.47 %	.48 %
V7B	APROXIM.	.26 %	.25 %	.26 %	.26 %
V7C	APROXIM.	.38 %	.38 %	.38 %	.37 %

PILARES

PILAR	MODELO	FX1	FY1	MZ1	FX2	FY2	MZ2
P18	APEL	3549.25	-616.85	482.13	-3549.25	616.85	1368.42
	ATEEL	3519.06	-615.17	481.19	-3519.06	615.17	1364.32
P10	APEL	1635.95	-892.3	1033.03	-1635.95	892.3	1643.87
	ATEEL	1548.37	-889.94	1030.73	-1548.37	889.94	1639.09
P6	APEL	953.31	-1531.38	1281.32	-953.31	1531.38	3312.81
	ATEEL	956.25	-1527.93	1280.18	-956.25	1527.93	3303.62
P1	APEL	-6138.52	-726.71	701.85	6138.52	726.71	1478.28
	ATEEL	-6102.71	-724.84	700.54	6102.71	724.84	1473.99

P18	APROXIM.	.86 %	.27 %	.2 %	.86 %	.27 %	.3 %
P10	APROXIM.	5.66 %	.27 %	.22 %	5.66 %	.27 %	.29 %
P6	APROXIM.	.31 %	.23 %	.09 %	.31 %	.23 %	.28 %
P1	APROXIM.	.59 %	.26 %	.19 %	.59 %	.26 %	.29 %

PAINEL 7

ANDAR 1

VIGAS

VIGA	MODELO	FY1	MZ1	FY2	MZ2
V8B	APEL	.23	-51.4	-.23	52.32
	ATEEL	-7.74	-62.75	7.74	31.81
V8C	APEL	-169.36	-399.61	169.36	-447.21
	ATEEL	-156.19	-366.5	156.19	-414.47
V8D	APEL	23.49	81.38	-23.49	12.57
	ATEEL	23.68	79.62	-23.68	15.11

V8B	APROXIM.	*	18.09 %	*	64.48 %
V8C	APROXIM.	8.43 %	9.03 %	8.43 %	7.9 %
V8D	APROXIM.	.8 %	2.21 %	.8 %	16.81 %

PILARES

PILAR	MODELO	FX1	FY1	MZ1	FX2	FY2	MZ2
PV15	APEL	-.23	-14.17	51.4	.23	14.17	-8.9
	ATEEL	12.43	-20.85	62.75	-12.43	20.85	-.19
PV11	APEL	169.59	-201.28	347.29	-169.59	201.28	256.54
	ATEEL	183.37	-193.62	334.69	-183.37	193.62	246.17
PV7	APEL	-192.85	-167.64	365.83	192.85	167.64	137.08
	ATEEL	-183.18	-149.5	334.85	183.18	149.5	113.65
PV2	APEL	23.49	24.03	-12.57	-23.49	-24.03	-59.53
	ATEEL	11.5	25.65	-15.11	-11.5	-25.65	-61.83

PV15	APROXIM.	*	32.04 %	18.09 %	*	32.04 %	*
PV11	APROXIM.	7.51 %	3.96 %	3.76 %	7.51 %	3.96 %	4.21 %
PV7	APROXIM.	5.28 %	12.13 %	9.25 %	5.28 %	12.13 %	20.62 %
PV2	APROXIM.	*	6.32 %	16.81 %	*	6.32 %	3.72 %

(*) - COMPARAÇÃO DE VALORES NAO SIGNIFICATIVOS.

PAINEL 7

ANDAR 5

VIGAS

VIGA	MODELO	FY1	MZ1	FY2	MZ2
VBB	APEL	-541.66	-1176.61	541.66	-990.04
	ATEEL	-547.08	-1184.78	547.08	-1003.53
VBC	APEL	-572.39	-1354.26	572.39	-1507.71
	ATEEL	-556.77	-1315.62	556.77	-1468.21
VBD	APEL	-599.21	-1202.47	599.21	-1194.37
	ATEEL	-596.67	-1198.37	596.67	-1188.3

VBB	APROXIM.	.99 %	.69 %	.99 %	1.34 %
VBC	APROXIM.	2.81 %	2.94 %	2.81 %	2.69 %
VBD	APROXIM.	.43 %	.34 %	.43 %	.51 %

PILARES

PILAR	MODELO	FX1	FY1	MZ1	FX2	FY2	MZ2
PV15	APEL	1281.15	-449.13	722.84	-1281.15	449.13	624.56
	ATEEL	1343.07	-451.45	726.13	-1343.07	451.45	628.22
PV11	APEL	543.04	-870.73	1340.1	-543.04	870.73	1272.09
	ATEEL	633.13	-862.08	1326.84	-633.13	862.08	1259.39
PV7	APEL	-508.21	-1021.09	1656.82	508.21	1021.09	1406.46
	ATEEL	-526.27	-1006.57	1634.05	526.27	1006.57	1385.65
PV2	APEL	-1315.99	-460.72	737.42	1315.99	460.72	644.75
	ATEEL	-1372.59	-458.63	733.92	1372.59	458.63	641.97

PV15	APROXIM.	4.61 %	.51 %	.45 %	4.61 %	.51 %	.58 %
PV11	APROXIM.	14.23 %	1 %	1 %	14.23 %	1 %	1.01 %
PV7	APROXIM.	3.43 %	1.44 %	1.39 %	3.43 %	1.44 %	1.5 %
PV2	APROXIM.	4.12 %	.46 %	.48 %	4.12 %	.46 %	.43 %

PAINEL 7

ANDAR 10

VIGAS

VIGA	MODELO	FY1	MZ1	FY2	MZ2
VBB	APEL	-860.18	-1840.85	860.18	-1599.89
	ATEEL	-858.93	-1837.31	858.93	-1598.4
VBC	APEL	-654.61	-1522.63	654.61	-1750.44
	ATEEL	-648.73	-1508.41	648.73	-1735.23
VBD	APEL	-1022.99	-2084.73	1022.99	-2007.24
	ATEEL	-1020.11	-2079.18	1020.11	-2001.26

VBB	APROXIM.	.15 %	.19 %	.15 %	.09 %
VBC	APROXIM.	.91 %	.94 %	.91 %	.88 %
VBD	APROXIM.	.28 %	.27 %	.28 %	.3 %

PILARES

PILAR	MODELO	FX1	FY1	MZ1	FX2	FY2	MZ2
PV15	APEL	5504.23	-691.99	632.41	-5504.23	691.99	1443.56
	ATEEL	5583.99	-690.81	632.48	-5583.99	690.81	1439.96
PV11	APEL	-55.77	-944.7	1137.82	55.77	944.7	1696.27
	ATEEL	137.92	-941.36	1133.58	-137.92	941.36	1690.51
PV7	APEL	742.48	-1531.35	1281.27	-742.48	1531.35	3312.78
	ATEEL	526.39	-1526.52	1277.36	-526.39	1526.52	3302.22
PV2	APEL	-6190.93	-727.33	703.1	6190.93	727.33	1478.9
	ATEEL	-6285.24	-725.75	702.35	6285.24	725.75	1474.9

PV15	APROXIM.	1.43 %	.17 %	.01 %	1.43 %	.17 %	.25 %
PV11	APROXIM.	140.44 %	.35 %	.37 %	140.44 %	.35 %	.34 %
PV7	APROXIM.	41.05 %	.32 %	.31 %	41.05 %	.32 %	.32 %
PV2	APROXIM.	1.5 %	.22 %	.11 %	1.5 %	.22 %	.27 %

PAINEL 9

ANDAR 1

VIGAS

VIGA	MODELO	FY1	MZ1	FY2	MZ2
V9A	APEL	-72.2	-174.14	72.2	-114.65
	ATEEL	-63.21	-162.55	63.21	-90.3
V9B	APEL	-150.17	-253.12	150.17	-358.8
	ATEEL	-174.42	-299.16	174.42	-411.61
V9C	APEL	30.88	79.79	-30.88	43.75
	ATEEL	36.4	91.98	-36.4	50.87

V9A	APROXIM.	14.22 %	7.13 %	14.22 %	26.97 %
V9B	APROXIM.	13.9 %	15.39 %	13.9 %	12.83 %
V9C	APROXIM.	15.16 %	13.25 %	15.16 %	14 %

PILARES

PILAR	MODELO	FX1	FY1	MZ1	FX2	FY2	MZ2
P16	APEL	72.2	-87.17	174.14	-72.2	87.17	87.39
	ATEEL	53.82	-80.57	162.55	-53.82	80.57	79.16
P12	APEL	77.97	-218.44	367.78	-77.97	218.44	287.53
	ATEEL	63.06	-231.71	389.45	-63.06	231.71	305.68
P20	APEL	-181.05	296.83	367.22	181.05	-296.83	-1257.7
	ATEEL	-201.28	263.19	421.88	201.28	-263.19	-1211.45
P3	APEL	30.88	42.4	-43.75	-30.88	-42.4	-83.45
	ATEEL	57.07	46.17	-50.87	-57.07	-46.17	-87.63

P16	APROXIM.	34.15 %	8.19 %	7.13 %	34.15 %	8.19 %	10.4 %
P12	APROXIM.	23.64 %	5.73 %	5.56 %	23.64 %	5.73 %	5.94 %
P20	APROXIM.	10.05 %	12.78 %	12.96 %	10.05 %	12.78 %	3.82 %
P3	APROXIM.	45.89 %	8.17 %	14 %	45.89 %	8.17 %	4.77 %

PAINEL 9

ANDAR 5

VIGAS

VIGA	MODELO	FY1	MZ1	FY2	MZ2
V9A	APEL	-608.94	-1330.59	608.94	-1105.17
	ATEEL	-598.38	-1312.25	598.38	-1081.27
V9B	APEL	-899.46	-1636.32	899.46	-2028.98
	ATEEL	-919.52	-1676.61	919.52	-2070.45
V9C	APEL	-717.75	-1524.14	717.75	-1346.87
	ATEEL	-744.13	-1551.75	744.13	-1368.96

V9A	APROXIM.	1.76 %	1.4 %	1.76 %	2.21 %
V9B	APROXIM.	2.18 %	2.4 %	2.18 %	2 %
V9C	APROXIM.	3.55 %	1.78 %	3.55 %	1.61 %

PILARES

PILAR	MODELO	FX1	FY1	MZ1	FX2	FY2	MZ2
P16	APEL	1660.87	-499.27	798.79	-1660.87	499.27	699.03
	ATEEL	1560.06	-492.97	789.02	-1560.06	492.97	689.89
P12	APEL	855.5	-1019.52	1555.45	-855.5	1019.52	1503.1
	ATEEL	749.67	-1023.99	1562.28	-749.67	1023.99	1509.71
P20	APEL	-983.17	-1756.08	3877.38	983.17	1756.08	1390.85
	ATEEL	-887.88	-1814.01	3955.38	887.88	1814.01	1486.64
P3	APEL	-1533.2	-521.47	823.78	1533.2	521.47	740.63
	ATEEL	-1458.94	-530.25	835.86	1458.94	530.25	754.88

P16	APROXIM.	6.46 %	1.28 %	1.24 %	6.46 %	1.28 %	1.32 %
P12	APROXIM.	14.12 %	.44 %	.44 %	14.12 %	.44 %	.44 %
P20	APROXIM.	10.73 %	3.19 %	1.97 %	10.73 %	3.19 %	6.44 %
P3	APROXIM.	5.09 %	1.66 %	1.45 %	5.09 %	1.66 %	1.89 %

PAINEL 9

ANDAR 10

VIGAS

VIGA	MODELO	FY1	MZ1	FY2	MZ2
V9A	APEL	-830.34	-1838.92	830.34	-1482.44
	ATEEL	-825.24	-1828.7	825.24	-1472.25
V9B	APEL	-1246.28	-2226.31	1246.28	-2852.29
	ATEEL	-1245.87	-2227.43	1245.87	-2849.49
V9C	APEL	-1257.55	-2705.36	1257.55	-2324.84
	ATEEL	-1314.23	-2777.6	1314.23	-2380.76

V9A	APROXIM.	.62 %	.56 %	.62 %	.69 %
V9B	APROXIM.	.03 %	.05 %	.03 %	.1 %
V9C	APROXIM.	4.31 %	2.6 %	4.31 %	2.35 %

PILARES

PILAR	MODELO	FX1	FY1	MZ1	FX2	FY2	MZ2
P16	APEL	5987.67	-688.97	626.36	-5987.87	688.97	1440.54
	ATEEL	5818.51	-686.67	624.19	-5818.51	686.67	1435.82
P12	APEL	2873.27	-1062.81	1374.05	-2873.27	1062.82	1814.38
	ATEEL	2634.73	-1060.49	1371.83	-2634.73	1060.49	1809.84
P20	APEL	-1411.98	-7179.92	664.57	1411.98	7179.92	20875.2
	ATEEL	-692.55	-7213.91	776.67	692.55	7213.91	20685.07
P3	APEL	-7449.15	-793.09	834.6	7449.15	793.08	1544.65
	ATEEL	-7528.72	-804.26	859.37	7528.72	804.26	1533.41

P16	APROXIM.	2.91 %	.33 %	.35 %	2.91 %	.33 %	.33 %
P12	APROXIM.	9.05 %	.22 %	.16 %	9.05 %	.22 %	.26 %
P20	APROXIM.	103.88 %	.47 %	14.43 %	103.88 %	.47 %	.92 %
P3	APROXIM.	1.06 %	1.39 %	2.88 %	1.06 %	1.39 %	.73 %

VI.1.2.4 - Considerações gerais

Devida à aproximação do presente modelo, em não compatibilizar os deslocamentos verticais nos nós, existe um desacoplamento dos painéis que se interceptam. Para o modelo tridimensional ATEEL, neste exemplo, os deslocamentos verticais para todas as linhas de pilares transversais ao carregamento lateral são diferentes, fazendo com que as vigas situadas entre estes pilares transmitam esforços entre os mesmos. No modelo APEL, este efeito não acontece, e consequentemente, os resultados não são coincidentes como no exemplo anterior. Observou-se porém, que em poucos casos esta diferença é superior a 10%, evidenciando que esta diferença não é relevante em termos de engenharia. Verificou-se também que o somatório de esforços normais para os três andares analisados são iguais para os dois modelos, mostrando que alguns resultados pouco próximos são causados pelas aproximações existentes nestes modelos em questão.

A figura VI.4 apresenta os esforços normais nas extremidades superiores dos pilares P7 e P11, que apresentam comportamentos pouco usuais para o tipo de carregamento adotado, porém, a comparação de resultados dos dois modelos, mostra distribuições de esforços semelhantes.

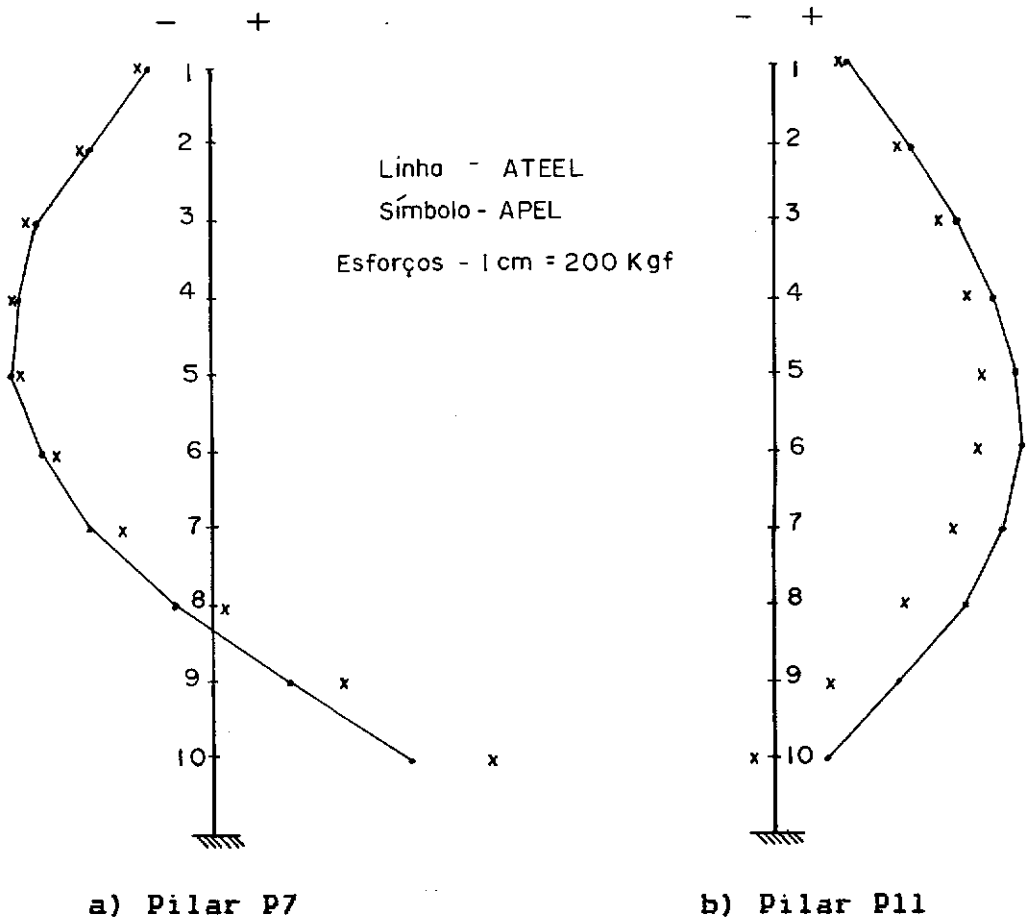
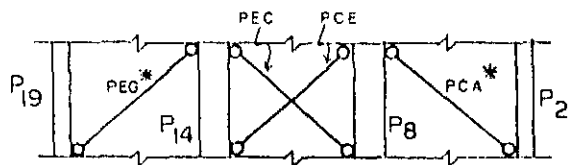
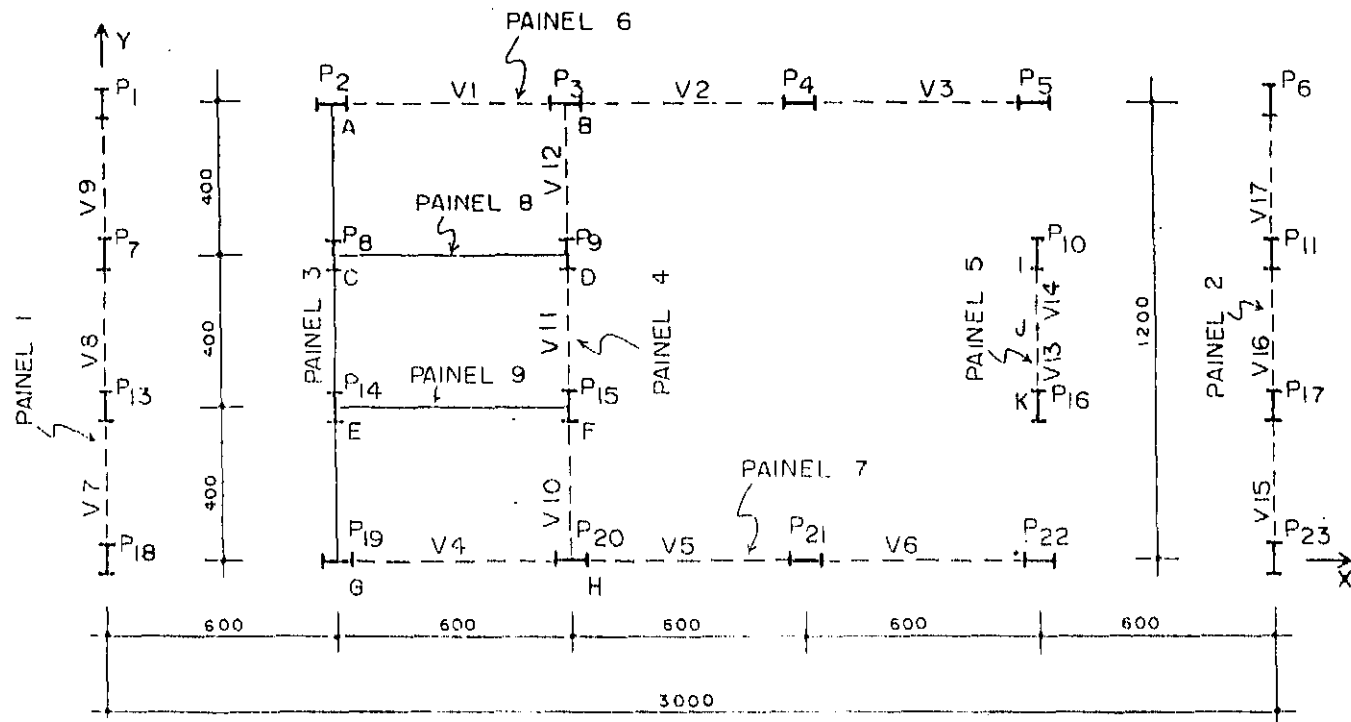


Fig. VI.4 - Esforços normais nas extremidades superiores dos pilares P7 e P11

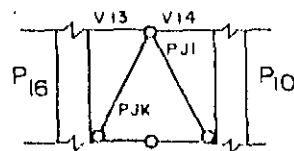
VI.1.3 - Exemplo 3

VI.1.3.1 - Planta baixa

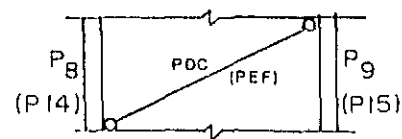
Neste exemplo, é apresentado uma estrutura de edifício em aço com 20 andares, conforme planta baixa apresentada na figura VI.5.



PAINEL 3



PAINEL 5



PAINEL 8 (OU 9)

(*) SOMENTE NO 1º ANDAR

VI.1.3.2 - Especificações

Número de andares = 20

Altura dos andares = 300 cm

Módulo de elasticidade = 2100 tf/cm^2

Dimensões dos elementos - variáveis, apresentando mudanças nos andares 2, 9 e 15.

Carregamento 1 : vento na direção Y

Andar 1 - FY = 3,825 tf

Do andar 2 ao andar 8 - FY = 7,65 tf

Andar 9 - FY = 7,2 tf

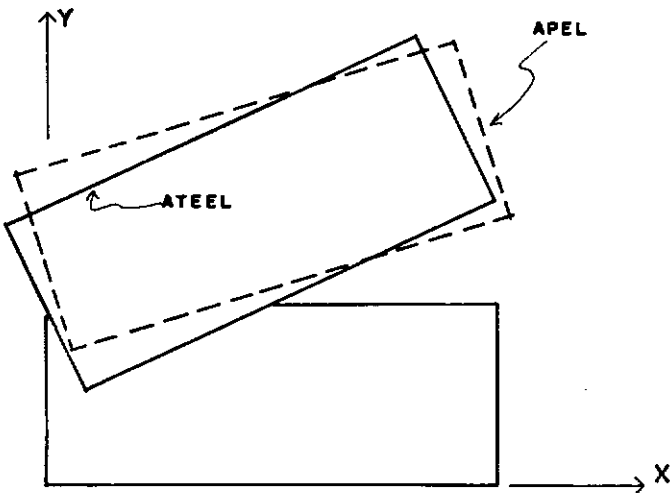
Do andar 10 ao andar 14 - FY = 6,75 tf

Andar 15 - FY = 6,075 tf

Do andar 16 ao andar 20 - FY = 5,4 tf

VI.1.3.3 - Resultados

A figura VI.6 mostra a projeção do piso superior deslocado, segundo os resultados obtidos pelos programas APEL e ATEEL.



ESCALAS :

ESTRUTURA - 1:500

DESLOCAMENTOS - 1:10

Fig. VI.6 - Projeção do piso superior deslocado da estrutura do exemplo 3

A seguir, apresentam-se tabelas com os resultados de esforços nos elementos do andar 10, dos painéis segundo a direção da carga horizontal

PAINEL 1 ANDAR 10

VIGAS					
VIGA	MODELO	FY1	MZ1	FY2	MZ2
V7	APEL	-1.73	-347.86	1.73	-344.4
	ATEEL	-1.17	-235.34	1.17	-232.93
V8	APEL	-2	-399.72	2	-399.72
	ATEEL	-1.36	-272.02	1.36	-272.02
V9	APEL	-1.73	-344.4	1.73	-347.86
	ATEEL	-1.17	-232.93	1.17	-235.34
V7	APROXIM.	47.86 %	47.81 %	47.86 %	47.86 %
V8	APROXIM.	47.06 %	46.95 %	47.06 %	46.95 %
V9	APROXIM.	47.86 %	47.86 %	47.86 %	47.81 %

PILARES							
PILAR	MODELO	FX1	FY1	MZ1	FX2	FY2	MZ2
P18	APEL	7.65	-1.16	174.88	-7.65	1.16	173.96
	ATEEL	5.64	-.78	116.87	-5.64	.78	117.37
P13	APEL	2.16	-2.49	374.46	-2.16	2.49	372.16
	ATEEL	1.55	-1.68	251.28	-1.55	1.68	251.84
P7	APEL	-2.16	-2.49	374.46	2.16	2.49	372.16
	ATEEL	-1.55	-1.68	251.28	1.55	1.68	251.84
P1	APEL	-7.65	-1.16	174.88	7.65	1.16	173.96
	ATEEL	-5.64	-.78	116.87	5.64	.78	117.37

P18	APROXIM.	35.64 %	48.72 %	49.64 %	35.64 %	48.72 %	48.22 %
P13	APROXIM.	39.35 %	48.21 %	49.02 %	39.35 %	48.21 %	47.78 %
P7	APROXIM.	39.35 %	48.21 %	49.02 %	39.35 %	48.21 %	47.78 %
P1	APROXIM.	35.64 %	48.72 %	49.64 %	35.64 %	48.72 %	48.22 %

PAINEL 2

ANDAR 10

VIGAS

VIGA	MODELO	FY1	MZ1	FY2	MZ2
V15	APEL	-2.83	-568.49	2.83	-562.13
	ATEEL	-3.11	-625.71	3.11	-618.79
V16	APEL	-3.34	-668.66	3.34	-668.66
	ATEEL	-3.67	-734.17	3.67	-734.17
V17	APEL	-2.83	-562.13	2.83	-568.49
	ATEEL	-3.11	-618.79	3.11	-625.71

V15	APROXIM.	9 %	9.14 %	9 %	9.16 %
V16	APROXIM.	8.99 %	8.92 %	8.99 %	8.92 %
V17	APROXIM.	9 %	9.16 %	9 %	9.14 %

PILARES

PILAR	MODELO	FX1	FY1	MZ1	FX2	FY2	MZ2
P23	APEL	19.99	-1.87	273.98	-19.99	1.87	286.06
	ATEEL	21.36	-2.06	302.58	-21.36	2.06	314.92
P17	APEL	4.74	-4.04	595.94	-4.74	4.04	617.69
	ATEEL	5.09	-4.45	657.1	-5.09	4.45	679.23
P11	APEL	-4.74	-4.04	595.94	4.74	4.04	617.69
	ATEEL	-5.09	-4.45	657.1	5.09	4.45	679.23
P6	APEL	-19.99	-1.87	273.98	19.99	1.87	286.06
	ATEEL	-21.36	-2.06	302.58	21.36	2.06	314.92

P23	APROXIM.	6.41 %	9.22 %	9.45 %	6.41 %	9.22 %	9.16 %
P17	APROXIM.	6.88 %	9.21 %	9.31 %	6.88 %	9.21 %	9.06 %
P11	APROXIM.	6.88 %	9.21 %	9.31 %	6.88 %	9.21 %	9.06 %
P6	APROXIM.	6.41 %	9.22 %	9.45 %	6.41 %	9.22 %	9.16 %

PAINEL 3

ANDAR 10

PILARES

PILAR	MODELO	FX1	FY1	MZ1	FX2	FY2	MZ2
P19	APEL	31.01	-.01	2.11	-31.01	.01	.43
	ATEEL	31.44	-.01	.91	-31.44	.01	.8
P14	APEL	-2.53	-.11	26.57	2.53	.11	5.45
	ATEEL	3.98	-.07	11.28	-3.98	.07	9.86
P8	APEL	2.53	-.11	26.57	-2.53	.11	5.45
	ATEEL	-3.98	-.07	11.28	3.98	.07	9.86
P2	APEL	-31.01	-.01	2.11	31.01	.01	.43
	ATEEL	-31.44	-.01	.91	31.44	.01	.8
PEC	APEL	-13.75	0	0	13.75	0	0
	ATEEL	-14.91	0	0	14.91	0	0
PCE	APEL	13.75	0	0	-13.75	0	0
	ATEEL	14.91	0	0	-14.91	0	0

P19	APROXIM.	1.37 %	0 %	131.87 %	1.37 %	0 %	46.25 %
P14	APROXIM.	163.57 %	57.14 %	135.55 %	163.57 %	57.14 %	44.73 %
P8	APROXIM.	163.57 %	57.14 %	135.55 %	163.57 %	57.14 %	44.73 %
P2	APROXIM.	1.37 %	0 %	131.87 %	1.37 %	0 %	46.25 %
PEC	APROXIM.	7.78 %	0 %	0 %	7.78 %	0 %	0 %
PCE	APROXIM.	7.78 %	0 %	0 %	7.78 %	0 %	0 %

PAINEL 4

ANDAR 10

VIGAS

VIGA	MODELO	FY1	MZ1	FY2	MZ2
V10	APEL	-3	-566.22	3	-632.17
	ATEEL	-3.33	-623.27	3.33	-709.49
V11	APEL	-3.87	-774.74	3.87	-774.74
	ATEEL	-1.91	-382.32	1.91	-382.32
V12	APEL	-3	-632.17	3	-566.22
	ATEEL	-3.33	-709.49	3.33	-623.27

V10	APROXIM.	9.91 %	9.15 %	9.91 %	10.9 %
V11	APROXIM.	102.62 %	102.64 %	102.62 %	102.64 %
V12	APROXIM.	9.91 %	10.9 %	9.91 %	9.15 %

PILARES

PILAR	MODELO	FX1	FY1	MZ1	FX2	FY2	MZ2
P20	APEL	17.24	-1.88	280.12	-17.24	1.88	283.36
	ATEEL	17.21	-2.06	306.36	-17.21	2.06	310.51
P15	APEL	5.93	-4.69	697.37	-5.93	4.69	709.39
	ATEEL	8.87	-3.64	538	-8.87	3.64	553.52
P9	APEL	-5.93	-4.69	697.37	5.93	4.69	709.39
	ATEEL	-8.87	-3.64	538	8.87	3.64	553.52
P3	APEL	-17.24	-1.88	280.12	17.24	1.88	283.36
	ATEEL	-17.21	-2.06	306.36	17.21	2.06	310.51

P20	APROXIM.	.17 %	8.74 %	8.57 %	.17 %	8.74 %	8.74 %
P15	APROXIM.	33.15 %	28.85 %	29.62 %	33.15 %	28.85 %	28.16 %
P9	APROXIM.	33.15 %	28.85 %	29.62 %	33.15 %	28.85 %	28.16 %
P3	APROXIM.	.17 %	8.74 %	8.57 %	.17 %	8.74 %	8.74 %

PAINEL 5

ANDAR 10

VIGAS

VIGA	MODELO	FY1	MZ1	FY2	MZ2
V13	APEL	-.07	-14.68	.07	0
	ATEEL	-.08	-15.97	.08	0
V14	APEL	-.07	0	.07	-14.68
	ATEEL	-.08	0	.08	-15.97

V13	APROXIM.	12.5 %	8.08 %	12.5 %	0 %
V14	APROXIM.	12.5 %	0 %	12.5 %	8.08 %

PILARES

PILAR	MODELO	FX1	FY1	MZ1	FX2	FY2	MZ2
P16	APEL	14.48	-.12	7.39	-14.48	.12	30.08
	ATEEL	15.15	-.13	8.04	-15.15	.13	32.1
P10	APEL	-14.48	-.12	7.39	14.48	.12	30.08
	ATEEL	-15.15	-.13	8.04	15.15	.13	32.1
PJK	APEL	14.95	0	0	-14.95	0	0
	ATEEL	15.98	0	0	-15.98	0	0
PJI	APEL	-14.95	0	0	14.95	0	0
	ATEEL	-15.98	0	0	15.98	0	0

P16	APROXIM.	4.42 %	7.69 %	8.08 %	4.42 %	7.69 %	6.29 %
P10	APROXIM.	4.42 %	7.69 %	8.08 %	4.42 %	7.69 %	6.29 %
PJK	APROXIM.	6.45 %	0 %	0 %	6.45 %	0 %	0 %
PJI	APROXIM.	6.45 %	0 %	0 %	6.45 %	0 %	0 %

VI.1.3.4 - Considerações gerais

Por ser esta estrutura assimétrica e apresentar elementos de contraventamento com modos de deformadas diferentes, as diferenças de resultados discutidas no exemplo anterior se tornam mais evidentes. Porém, a figura VI.6 mostra que o comportamento da estrutura segundo os resultados obtidos pelo programa APEL, é próximo do ATEEL. Os esforços nos elementos dos painéis 1, 3 e 4 não apresentam bons resultados, pois se localizam numa região onde os deslocamentos horizontais da estrutura não são muito próximos para os dois modelos. O mesmo não ocorre para os painéis 2 e 5, que apresentam bons resultados, com aproximações abaixo de 13%.

VI.2 - Conclusões

Para os três exemplos processados, foram calculados os tempos de processamento e estimados os custos destes processamentos para os modelos ATEEL e APEL. Ao modelo ATEEL implementado num computador BURROUGHS 6800, foi estimado um custo de CZ\$ 0,13 por USC (Unidade de Serviços de Computação, que depende do equipamento utilizado). Este custo inclui a utilização de software que corresponde a 55% do preço total. Para o modelo APEL implementado num microcomputador compatível com o APPLE II, estimou-se um custo de aluguel de CZ\$ 20,83 por hora. Este valor pode ser ainda sensivelmente diminuído, se for adotado o critério de aquisição do equipamento, estimando-se sua vida útil e, finalmente, o novo custo do tempo de processamento.

A seguir, apresenta-se a tabela com as comparações dos

tempos e custos de processamento para os exemplos apresentados neste trabalho.

	MODELOS	PROCESSAMENTO	CUSTO (CZ\$)
EXEMPLO 1	APEL	1,10 horas	22,92
	ATEEL	37 seg. (134,04 USC)	17,42
EXEMPLO 2	APEL	1,68 horas	35,06
	ATEEL	201 seg. (802,37 USC)	104,31
EXEMPLO 3	APEL	7,62 horas	158,75
	ATEEL	703 seg. (2947,91 USC)	383,23

Estes resultados mostram que, para os dois últimos exemplos mais significativos, o custo de processamento relativo ao APEL é bem inferior ao ATEEL. Outra vantagem se refere às características do microcomputador, em ser um equipamento de pequeno porte e de fácil instalação no próprio ambiente de trabalho.

A limitação do modelo em relação à memória central RAM de 48 Kbytes é definida pelo número de fileiras de pilares e pelo número máximo de andares de um determinado painel. Esta limitação é dada pela seguinte tabela:

número de pilares	número máximo de andares
1	53
2	49
3	45
4	41
5	37
6	33
7	29

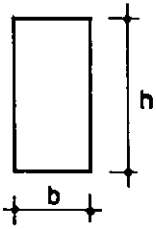
A limitação de memória auxiliar é função do equipamento utilizado. Para os exemplos processados, esta limitação não foi excedida. Na análise de grandes estruturas, onde esta limitação pode estar presente, sugere-se a utilização de discos rígidos, que além de ampliar consideravelmente a capacidade de memória auxiliar, diminui o tempo de transferências de variáveis com a memória central.

O modelo adotado tem um caráter aproximativo, que se torna relevante à medida que a interação entre painéis seja importante. Assim, cabe ao engenheiro projetista avaliar para cada caso em foco a adoção do modelo.

APENDICE 1

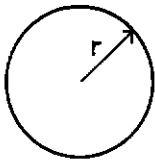
TABELA DE FATOR DE FORMA PARA CORTANTE

1 - Seção retangular:



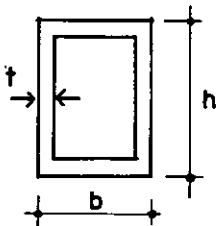
$$f = \frac{6}{5}$$

2 - Seção circular



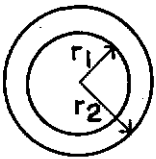
$$f = \frac{10}{9}$$

3 - Seção retangular vazada



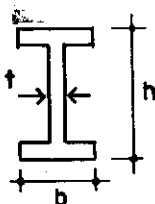
$$f = \frac{A}{2ht} = 1 + \frac{b}{h}$$

4 - Seção circular vazada



$$f = 2$$

5 - Seção I

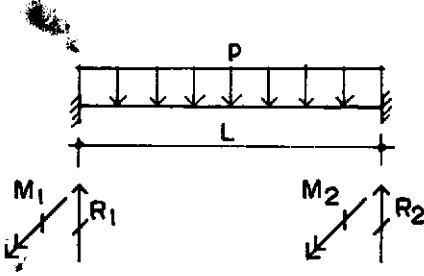


$$f = \frac{A}{ht} = 1 + \frac{2b}{h}$$

APENDICE 2

AÇÕES DE ENGASTAMENTO PERFEITO

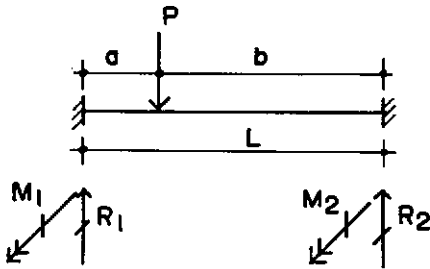
1 - Carga uniformemente distribuida



$$R1 = R2 = \frac{PL}{2}$$

$$M1 = -M2 = -\frac{PL^2}{12}$$

2 - Carga concentrada



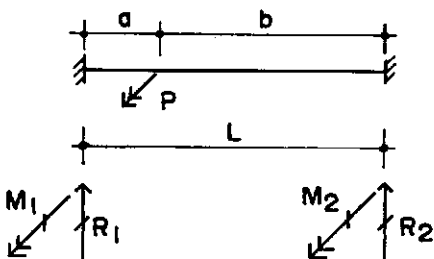
$$R1 = \frac{Pb^2}{L^3} (3a + b)$$

$$R2 = P - R1$$

$$M1 = \frac{Pab^2}{L^2}$$

$$M2 = -\frac{Pa^2b}{L^2}$$

3 - Carga momento



$$R1 = -R2 = \frac{6Pab}{L^3}$$

$$M1 = \frac{Pb}{L^2} (2a - b)$$

$$M2 = -\frac{Pa}{L^2} (2b - a)$$

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] STAMATO, M. C.; STAFFORD-SMITH, B., Análise Aproximada de Estruturas Tridimensionais de Edifícios Elevados, Publicação 155, São Carlos, (1968).
- [2] SORIANO, H. L., Cálculo Automático do Efeito do Vento em Estruturas de Edifício, Tese de M.Sc., COPPE/UFRJ, (1971).
- [3] CAMARA Jr., V. F., Análise dos Esforços em Edifícios Altos, Tese de M.Sc., COPPE/UFRJ, (1978).
- [4] BORGES, J. F.; RAVARA, A., Cálculo de Estruturas de Edifícios Sob Ação de Forças Horizontais estáticas, Processo 36/11/5276, LNEC, Lisboa, (1976).
- [5] SORIANO, H. L., Deslocamento Relativo de Andar em Análise Tridimensional de Edifícios, Revista Brasileira de Engenharia, Vol. 1, número 2, pp. 79-92, (1983).
- [6] GERE, J. M.; WEAVER, W., Análise de Estruturas Reticuladas, Editora Guanabara Dois, (1981).
- [7] SORIANO, H. L., Análise de Estruturas em Computador de Pequeno Porte, COPPE/UFRJ, (1983).
- [8] SORIANO, H. L., Sistemas de Equações Algébricas Lineares em Problemas Estruturais, Seminário 280, LNEC, Lisboa, (1981).

- [9] SCHUELLER, W., High-Rise Building Structures, A Willey-Interscience Publication, (1977).
- [10] TIMOSHENKO, S. P.; GOODIER, J.N., Teoria da Elasticidade, Editora Guanabara Dois, 3a Edição, (1980).
- [11] TIMOSHENKO, S. P., Resistência dos materiais, Volume 1, Editora Ao Livro Técnico, (1971).
- [12] VASCONCELOS FILHO, A. de, Edifícios de Andares Múltiplos, Edições COTEC 06/84, UFMG, (1981).
- [13] SILVA, J. L.; SORIANO, H. L., Análise Aproximada de Edifícios Altos em Microcomputadores, Publicação do COLLOQUIA 85 - XXIII Jornadas Sudamericanas de Ingenieria Estructural, Buenos Aires, (1985).
- [14] Interaccion Estructural en Marcos y Muros de Cortante, Publicacion de Portland Cement Association, Editorial Limusa, México, (1977).
- [15] PRUDENTE, M., Análise de Estruturas Tridimensionais Usuais de Edifícios Altos, Tese de M.Sc., USP, São Carlos, (1984).
- [16] POOLE, LON; Mc NIFF, MARTIN; COOK, STEVE, APPLE II - Guia do Usuário, Editora Mc Graw-Hill do Brasil Ltda, (1984)

[17] ETTLIN, W. A., WordStar Made Easy, Second Edition, Osborne/McGraw-Hill, California.

[18] HOGAN, T., CP/M Guia do Usuário, MacGraw-Hill do Brasil, (1983)