

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ESTRUTURAS

"ANÁLISE TRIDIMENSIONAL DOS EFEITOS
DE TEMPERATURA EM EDIFÍCIOS ALTOS"

ENGO JOSE ELIAS LAIER

Dissertação apresentada à Escola
de Engenharia de São Carlos, da
Universidade de São Paulo, como
parte dos requisitos para a ob-
tenção do título de "Mestre em
Engenharia de Estruturas".

BANCA EXAMINADORA

Dr. Ronaldo Garcia de Figueiredo - Orientador - (F.E.L.-UNICAMP)
Dr. Mário Franco (Politécnica- U.S.P.)
Dr. Eddie Mancini (E.E.S.C. - U.S.P.)

A meus pais, irmãos e à
minha noiva.

AGRADECIMENTOS

Ao saudoso Professor Dr. Miguel Carlos Stamato o nosso reconhecimento, não só pela fecunda orientação dada no inicio do desenvolvimento deste trabalho, mas acima de tudo pelos exemplos de dedicação e amor ao trabalho que sempre deu em sua vida.

Agradecemos ao Professor Dr. Ronaldo Garcia de Figueiredo pela valiosa orientação dada na realização do presente trabalho.

Agradecemos à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo pela concessão de bolsa de Aperfeiçoamento, que muito contribuiu no andamento deste trabalho.

Agradecemos à Escola de Engenharia de São Carlos pelo apoio recebido e ao Centro de Processamento de Dados pelo uso contínuo que fizemos de seus equipamentos.

Finalmente, queremos expressar os nossos agradecimentos aos colegas, que de uma forma ou de outra, muito nos ajudaram e em particular à Sra. Wilma Provinciali Vall e ao Sr. João Paulo Moretti; à ela pela datilografia e a ele pelos desenhos primorosos.

RESUMO

O presente trabalho tem por objetivo principal apresentar uma análise tridimensional para as estruturas de edifícios altos sujeitas a variações de temperatura. Adota-se, neste sentido, um processo aproximado, onde a estrutura do edifício é assimilada a um conjunto de estruturas bidimensionais, dispostas em planos ortogonais ou oblíquos, travadas entre si, ao nível dos andares, por diafragmas de rigidez infinita em seus planos e nula transversalmente (simulação das lajes).

Duas estruturas de edifício são estudadas. As discussões dos resultados encontrados na análise tridimensional proposta e nas soluções já apresentadas na literatura técnica pretendem justificar os objetivos do presente trabalho.

A listagem do programa de computador em linguagem FORTRAN, correspondente à análise tridimensional, é apresentada. Uma sumária explicação sobre o programa, bem como sobre sua utilização, também é fornecida.

I I I

ABSTRACT

The aim of this work is to analyse tridimensional high buildings under changes of temperature. To do that one takes or granted an approximated solution in which a high building is a pool of vertical or inclined plane frames. The links, at the floor levels, between those frames, are diaphragms with no transversal stiffness but completely stiff on its plane.

Two examples are discussed. Comparisons are made between the solutions herein made and those already known in this field. These comparison intend to justify the aim of this work.

The printing of the computer programme, in FORTRAN language, and its utility are presented as well.

Í N D I C E

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO	1
------------------	---

CAPÍTULO II

ANÁLISES ESTRUTURAIS PLANAS

2.1 - INTRODUÇÃO	5
2.2 - PROCESSO ITERATIVO GENERALIZADO	7
2.2.1 - Hipóteses	7
2.2.2 - Notação dos deslocamentos, das forças e grandezas envolvidas	8
2.2.3 - Etapas da iteração	10
2.2.4 - Obtenção da fórmula de recorrência da oitava etapa da iteração	13
2.3 - PROCESSO ITERATIVO SIMPLIFICADO	15

CAPÍTULO III

ANÁLISE APROXIMADA DE ESTRUTURAS
DE EDIFÍCIOS ALTOS

3.1 - INTRODUÇÃO	19
3.2 - HIPÓTESES	19
3.2.1 - Lajes	19
3.2.2 - Painéis	19
3.2.3 - Interdependência entre os painéis	20
3.2.4 - Ângulos entre painéis	20
3.2.5 - Cargas	20
3.3 - DESLOCAMENTOS DOS PAINÉIS E DO EDIFÍCIO	21
3.3.1 - Notação matricial dos deslocamentos	23
3.3.2 - Transformação dos deslocamentos	25

3.4 - MATRIZ DE RIGIDEZ DO PAINEL	27
3.5 - MATRIZ DE RIGIDEZ DO EDIFÍCIO	30
3.6 - DESLOCAMENTOS E ESFORÇOS NOS PAINÉIS	33

CAPÍTULO IV

EXEMPLOS DE APLICAÇÃO

4.1 - INTRODUÇÃO	34
4.2 - PRIMEIRO EXEMPLO	35
4.3 - SEGUNDO EXEMPLO	50

CAPÍTULO V

PROGRAMAS PARA O CÁLCULO AUTOMÁTICO

5.1 - INTRODUÇÃO	65
5.2 - ORGANIZAÇÃO DO PROGRAMA	65
5.2.1 - Diagrama de blocos	67
5.3 - NOTAÇÃO DAS VARIÁVEIS	68
5.4 - PREPARAÇÃO DOS DADOS PARA O PROGRAMA	70
5.5 - IMPRESSÃO DOS DADOS FORNECIDOS AO COMPUTADOR	73
5.5.1 - Primeiro grupo de dados impresso	74
5.5.2 - Segundo grupo de dados impresso	74
5.5.3 - Terceiro grupo de dados impresso	79
5.5.4 - Quarto grupo de dados impresso	80
5.6 - IMPRESSÃO DOS RESULTADOS	82
5.6.1 - Primeiro grupo de resultados impresso	83
5.6.2 - Segundo grupo de resultados impresso	85
5.6.3 - Terceiro grupo de resultados impresso	86
5.7 - LISTAGEM DO PROGRAMA EM LINGUAGEM FORTRAN	87
5.7.1 - Sub-rotina MULT	87
5.7.2 - Sub-rotina CLEA	87
5.7.3 - Sub-rotina COME	87
5.7.4 - Sub-rotina TRAN	99
5.7.5 - Sub-rotina ADDC	99

5.7.6 - Sub-rotina HALF	99
5.7.7 - Sub-rotina SOLVE	100
5.7.8 - Programa UM	100
5.7.9 - Programa DOIS	101
5.7.10- Programa TRÊS	102
5.7.11- Programa Início	103

CAPÍTULO VI

OBSERVAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES	104
BIBLIOGRAFIA	109

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

As modernas soluções apresentadas pela Arquitetura para edifícios altos, caracterizam-se, de um modo particular, pela exposição parcial ou total de elementos estruturais situados na periferia, notadamente vigas e colunas. Nestas soluções arquitetônicas, especial atenção deve ser dada aos efeitos das variações de temperatura, pois os elementos expostos ficam, de modo acentuado, a elas sujeitos, acarretando com isto implicações estruturais e, de certa forma, também funcionais (inclinação dos pisos próximos da periferia e fissuras nas paredes divisórias).

No estudo destes efeitos devem ser abordados, segundo WEIDLINGER¹ (os números que aparecem como expoente correspondem à bibliografia apresentada no fim do trabalho), cinco aspectos importantes, que são:

- 1º - As variações de temperatura causam alongamentos diferentes nas colunas externas e internas, resultando, deste modo, distorções nos quadros divisórios do edifício. Estas distorções são maiores no topo do edifício, diminuindo gradativamente para a base. Quando tais distorções ultrapassam certos limites, podem ocorrer fissuras nas paredes divisórias. Naturalmente, estas fissuras devem surgir, inicialmente, nas paredes divisórias dos andares mais altos.
- 2º - As distorções dos quadros divisórios introduzem flexão (momento e força cortante) nas vigas que conectam as colunas internas e externas e também nas próprias colunas.
- 3º - A flexão das vigas, por outro lado, introduz forças normais adicionais que se acumulam do topo para a base do edifício, nas colunas externas e internas.
- 4º - As colunas, quando parcialmente expostas, ficam, ainda, sujeitas a momentos oriundos dos gradientes de temperatura que nelas se estabelecem.
- 5º - Finalmente, a exposição das vigas de periferia introduz esforços nas lajes, notadamente nas regiões próximas dos cantos. Naturalmente, estes esforços são oriundos dos gradientes de temperatura, que se estabelecem também nestas vigas.

Dentre estes aspectos, o de maior importância é o primeiro, não somente porque dele dependem, de modo direto, o segundo e o terceiro, mas porque estão relacionadas com ele as distorções nos quadros divisórios, que podem, quando ultrapassados certos limites, acarretar fissuras nas paredes divisórias.

De acordo com estudos desenvolvidos por FINTEL e KHAN², o quarto aspecto (momentos nas colunas parcialmente expostas provenientes dos gradientes de temperatura que nelas se estabelecem) assume importância secundária, quando comparado com os três primeiros. Ficou constatado que os efeitos enquadrados neste aspecto são localizados, notadamente no topo do edifício e na base, porém apresentam magnitudes desprezíveis. Com relação ao quinto aspecto, não foi, ainda, dedicada nenhuma atenção, pelo menos nas divulgações ao nosso alcance. Acredita-se, contudo, que os efeitos aí enquadrados, também localizados, não apresentam magnitudes consideráveis.

Um outro aspecto que merece atenção, e não se enquadrano apresentados, provém da exposição do teto do último andar, que em alguns casos são lajes sem proteção térmica. Este aspecto, naturalmente, produz efeitos localizados no topo do edifício. Tendo em vista o caráter localizado dos efeitos aí enquadrados e que o procedimento sugerido no presente trabalho não aborda tais efeitos este aspecto não será tratado.

Para se levar a efeito o estudo dos vários aspectos do problema, é imprescindível, antes de mais nada, o estabelecimento dos parâmetros aí envolvidos, que dependem do clima e do comportamento termodinâmico dos elementos expostos. WEIDLINGER³ discorreu de maneira sumária sobre esta questão, sugerindo, para as condições americanas, intervalos para uma escolha prática destes parâmetros. Um estudo pormenorizado sobre este assunto foi desenvolvido por FINTEL e KHAN⁴, também para as condições americanas, onde foram sugeridas maneiras racionais de estimar tais parâmetros e, além disso, foram também sugeridos processos aproximados para a obtenção dos esforços equivalentes devidos às variações de temperatura, necessários, como se sabe, na análise estrutural segundo o processo dos deslocamentos. Obviamente, só interessam aqui as forças normais de engastamento perfeito, pois os momentos, como já foi dito, não apresentam efeitos consideráveis.

No que diz respeito à análise estrutural, tanto WEIDLINGER⁵ como KHAN e FINTEL⁶, sugeriram análises estruturais planas, admitindo, deste modo, que as estruturas de edifícios altos

podem ser assimiladas a conjuntos de estruturas planas independentes. KHAN e FINTEL⁷ constataram, ainda, que os efeitos consideráveis, provenientes das variações de temperatura somente são significativos nos elementos mais externos do edifício: coluna exposta, primeira coluna interna e as vigas que conectam tais colunas. Desse modo, apenas o trecho da estrutura que contém estes elementos podem ser estudado e, com isto, o problema numérico fica parcialmente aliviado.

Percebe-se facilmente que tais soluções não correspondem à realidade e podem, desta forma, omitir efeitos significativos, que somente uma análise tridimensional permite serem evidenciados, pois as estruturas de edifícios altos são tridimensionais e, como tais, devem ser consideradas.

O presente trabalho tem por objetivo principal sugerir uma solução tridimensional para as estruturas de edifícios altos sujeitas às variações de temperatura, pretendendo, com isto, preencher esta enorme lacuna existente na solução do problema. Além disto, como consequência natural, sugerir também soluções intermedias entre as planas e a tridimensional, quando possível, para que o trabalho numérico, algo elevado da solução tridimensional, possa ser em parte contornado.

As variações da temperatura atmosférica e as dos ambientes internos dos edifícios introduzem gradientes de temperatura no interior dos elementos expostos. Do mesmo modo que a temperatura atmosférica e a dos ambientes internos dos edifícios, estes gradientes de temperatura variam, obviamente, também com o tempo. Toda via, é possível estabelecer, para efeito do estudo das implicações estruturais, um gradiente estático com relação ao tempo, que representa a totalidade destas variações, conforme constatações feitas por FINTEL e KHAN⁸. WEIDLINGER⁹ sugere, para as condições americanas, uma diferença entre a temperatura atmosférica e a temperatura dos ambientes internos dos edifícios, entre 50°F (10°C) e 100°F (37.8°C). No presente trabalho, por falta de maiores informações a respeito das condições brasileiras e também porque este assunto foge às pretensões do mesmo, adota-se 30°C nos exemplos estudados, dentre eles nos apresentados no capítulo IV (a NB-1/60 especifica valores para as diferenças de temperatura apenas para o cálculo de elementos estruturais isolados - artigo 5 - ; entretanto, o critério usado no estabelecimento destes valores, obviamente, não deve ser o mesmo que se adotaria no estabelecimento da diferença de temperatura em questão, daí a arbitrariedade do au-

tor em adotar um valor compreendido no intervalo proposto por WEIDLINGER). O fato de se adotar um valor qualquer para a diferença de temperatura em questão, no caso 30°C , não altera em nada o comportamento qualitativo da estrutura, pois em estruturas de comportamento elástico-linear, o caso das aqui estudadas, as grandesas envolvidas (deslocamentos, esforços e distorções) são funções lineares desta diferença de temperatura.

A obtenção das forças normais de engastamento perfeito nas colunas, oriundas das variações de temperatura e necessária na análise estrutural segundo o processo dos deslocamentos (aqui também usado), envolve rotinas um tanto trabalhosas, mesmo tendo em vista o procedimento sugerido por FINTEL e KHAN¹⁰. Como já foi visto, estes esforços são os únicos que devem ser determinados, pois os momentos de engastamento perfeito, quando a exposição das colunas é parcial, não apresentam efeitos consideráveis.

No intuito de se evitar a rotina mais trabalhosa, que consiste na determinação da temperatura média no interior das colunas, optou-se, nos exemplos apresentados (cap. IV), pela exposição total das mesmas, e, com isto, este parâmetro torna-se evidente (igual à temperatura atmosférica). Naturalmente, assim procedendo, os esforços internos e os deslocamentos na estrutura serão maiores.

Quanto às distorções nos quadros divisórios, WEIDLINGER¹¹ sugere, como critério prático, o limite admissível $\gamma = 1/300$, valor este que não deve ser ultrapassado, para que não ocorram fissuras nas paredes divisórias usuais.

No capítulo II apresenta-se o desenvolvimento teórico do procedimento sugerido por KHAN e FINTEL para o estudo das implicações estruturais provenientes das variações de temperatura. Neste procedimento admite-se, como já foi visto, que as estruturas dos edifícios podem ser assimiladas a um conjunto de estruturas planas independentes e que, além disto, somente os trechos da estrutura próximos da periferia são considerados. No capítulo III desenvolve-se o processo de análise tridimensional sugerido por STAMATO e SMITH¹³, que se constitui no processo proposto pelo presente trabalho, para o estudo dos efeitos das variações de temperatura em estruturas de edifícios altos. No capítulo IV são apresentados dois exemplos, cujas discussões pretendem justificar os objetivos do presente trabalho. O capítulo V é dedicado à apresentação do programa automático de computador, correspondente à análise tridimensional e, finalmente, no capítulo VI são apre-

sentadas as observações finais e as conclusões.

Finalizando, espera-se ter sido dada, ainda, alguma contribuição para a melhor compreensão do comportamento tridimensional dos edifícios altos, quando sujeitos também a alguns casos particulares de cargas verticais.

CAPÍTULO II

ANÁLISES ESTRUTURAIS PLANAS

2.1 - INTRODUÇÃO

Conforme já foi visto no capítulo I, os processos de análise estrutural sugeridos, tanto por WEIDLINGER¹⁴ como por KHAN e FINTEL¹⁵, para o estudo dos efeitos das variações de temperatura em estruturas de edifícios altos, constituem processos de análise de estruturas planas. Admite-se, deste modo, que as estruturas de edifícios altos podem ser assimiladas, no estudo destes efeitos, como um conjunto de estruturas planas independentes, ou seja, desprezando as interações que podem ocorrer entre elas. WEIDLINGER aborda a análise estrutural fazendo uso de um programa automático de computador, por outro lado, KHAN e FINTEL sugerem processos iterativos apropriados para o cálculo manual.

No presente trabalho, em conformidade com WEIDLINGER, adota-se no estudo dos efeitos das variações de temperatura em estruturas de edifícios altos, através de análises de estruturas planas, um programa automático de computador, que tem por base o procedimento matricial desenvolvido por GERE e WEAVER¹⁶. A razão da escolha deste programa no presente trabalho prende-se ao fato de que o mesmo é bastante geral, tanto no sentido de permitir o estudo de quaisquer situações de solicitação (esforços térmicos, recalques de apoio, imposição de deslocamentos e esforços aplicados nos nós e nas barras), como também no sentido de permitir qualquer composição estrutural (quadros treliçados ou não e também pilares-paredes: sendo que neste caso é necessário adotar um criterioso procedimento estrutural). Tendo em vista a ampla divulgação dos trabalhos de GERE e WEAVER a esse respeito, inclusive já fazendo parte de cursos regulares ministrados em diversas escolas de engenharia, julga-se desnecessária qualquer apresentação, não só do procedimento, como também da respectiva programação automática.

Os processos iterativos sugeridos por KHAN e FINTEL baseiam-se no fato de que os efeitos consideráveis oriundos das variações de temperatura somente são significativos nos elementos mais externos da estrutura, ou seja: coluna externa (exposta), primeira coluna interna e as vigas que conectam estas colunas.

Assim sendo, somente o trecho da estrutura que contém estes elementos pode ser estudado, admitindo, naturalmente, que é desprezível a participação do restante da estrutura. Admite-se, além disso, que as estruturas dos edifícios não sofrem deslocamentos horizontais, quando sujeitas às variações de temperatura (o estudo é feito admitindo estruturas planas indeslocáveis horizontalmente). Como parte do programa de pesquisa, que resultou no presente trabalho, o autor¹⁷ desenvolveu para o computador IBM-1130 do Centro de Processamento de Dados da EESC-USP os programas em linguagem FORTRAN das soluções propostas por KHAN e FINTEL. Naturalmente, estes programas não têm sentido prático, pois, como já foi visto, tais soluções são apropriadas para o cálculo manual.

Apresenta-se, a seguir, o desenvolvimento teórico das soluções propostas por KHAN e FINTEL. Como já foi visto, estas soluções abordam o tratamento do problema em questão através de processos iterativos apropriados para o cálculo manual. O procedimento é via deslocamentos (processo dos deslocamentos), sendo considerados apenas os deslocamentos verticais e rotações dos nós, pois admite-se que a estrutura, como já se salientou, não sofre deslocamentos horizontais. Constatata-se que estes processos iterativos apresentam rápida convergência para a maioria das estruturas usuais de edifícios. Bons resultados, segundo KHAN e FINTEL, são obtidos com apenas dois ou três ciclos.

2.2 - PROCESSO ITERATIVO GENERALIZADO

2.2.1 - Hipóteses

As hipóteses em que se baseia este processo podem ser assim resumidas:

- a) - As estruturas dos edifícios altos podem ser assimiladas, para efeito do estudo das implicações estruturais provenientes das variações de temperatura, como um conjunto de estruturas planas independentes.
 - b) - Os efeitos das variações de temperatura somente são significativos nos elementos mais externos da estrutura, ou seja: coluna exposta, primeira coluna interna e as vigas que conectam estas colunas. Com isto, somente o trecho da estrutura que contém estes elementos pode ser consi-

derado, ou em outras palavras, pode ser negligenciada a participação do restante da estrutura.

c) - As estruturas dos edifícios não sofrem deslocamentos horizontais, quando sujeitas às variações de temperatura. Admite-se que também as estruturas planas que compõem as estruturas dos edifícios não sofrem deslocamentos horizontais.

2.2.2 - Notação dos deslocamentos, esforços e grandezas envolvidas

Para simplificar a exposição, considere-se o pórtico simétrico constituído de quatro prumadas de pilares e 'N' vigas mostrado na figura 2.1. Indica-se também nesta figura as colunas ① (coluna exposta) e ② (primeira coluna interna) cujos comportamentos pretende-se estudar.

A notação aqui utilizada é a mesma adotada por KHAN e FINTEL¹⁵, ressalvadas algumas modificações (figura 2.1):

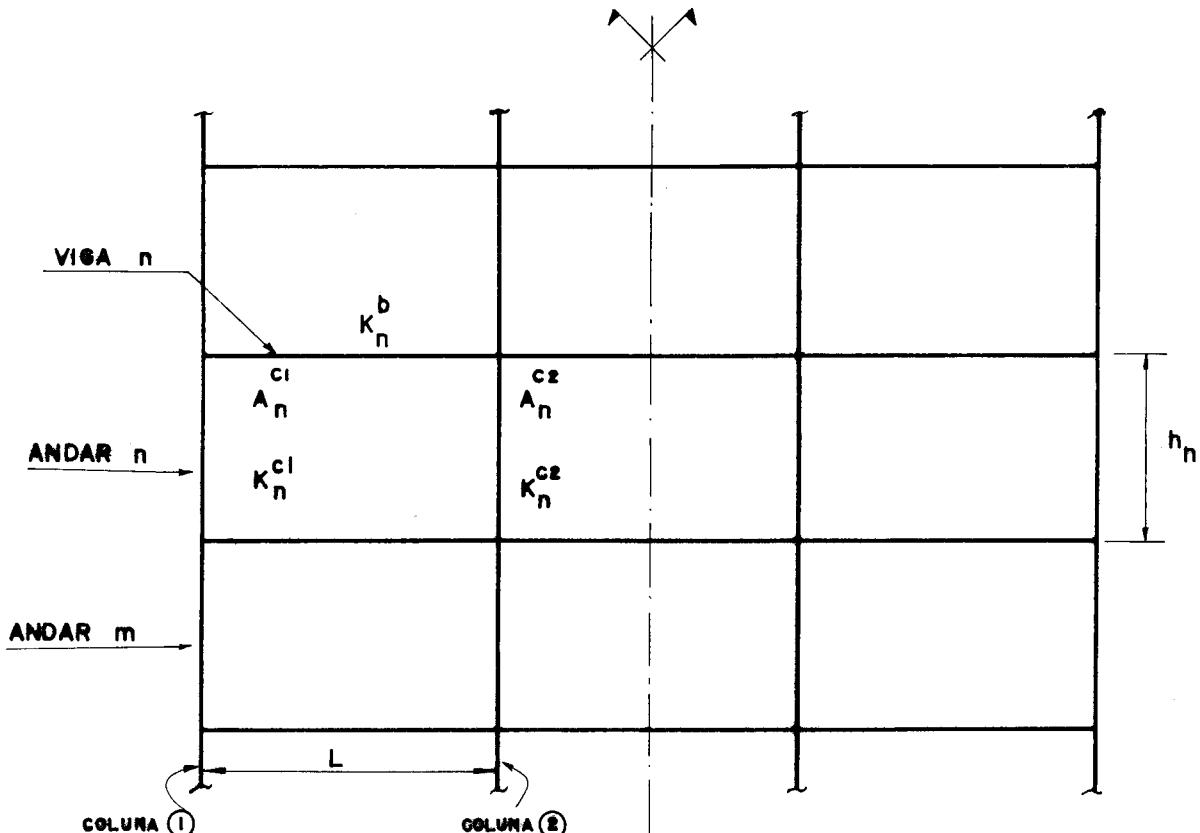


FIG. 2.1 - TRECHO DE UM PÓRTICO DE "N" ANDARES

- N = número de andares (ou vigas).
- i = índice inferior para caracterizar as grandezas relativas a andares genéricos,
- b, cl, c2 = índices superiores para caracterizar as grandezas relativas a viga, coluna ① e coluna ②, respectivamente. Obviamente, tais índices estão destituídos de qualquer significado de expoente.
- L = vão dos tramos das vigas entre as colunas ① e ②.
- h_i = pé direito do andar i.
- A_i^{c1}, A_i^{c2} = área da seção transversal, no andar i, das colunas ① e ②, respectivamente.
- J_i^b, J_i^{c1}, J_i^{c2} = momento de inércia no andar i, da seção transversal da viga, coluna ① e coluna ②, respectivamente.
- K_i^b, K_i^{c1}, K_i^{c2} = parâmetro de rigidez à flexão, no andar i, da viga, coluna ① e coluna ②, respectivamente.
- $K_i^b = J_i^b/L ; K_i^{c1} = J_i^{c1}/h_i ; K_i^{c2} = J_i^{c2}/h_i$
- M_i^{c1}, M_i^{c2} = momento fletor na viga do andar i à direita da coluna ① e à esquerda da coluna ②, respectivamente.
- V_i = força cortante no tramo da viga do andar i compreendido entre as colunas ① e ② (as forças cortantes nestes tramos de vigas, no caso em questão, são constantes).
- P_i^{c1}, P_i^{c2} = força normal, no andar i, nas colunas ① e ②, respectivamente.
- R_i^{c1}, R_i^{c2} = encurtamento dos pilares das colunas ① e ②, respectivamente, no andar i.
- D_{fi} = deslocamento vertical da coluna exposta, no andar i, proveniente da ação da temperatura nesta coluna supondo-a isolada do restante da estrutura.
- D'_i = deslocamento vertical relativo entre as colunas ① e ②, no andar i, num ciclo da iteração.
- D''_i = deslocamento vertical relativo entre as colunas ① e ②, no andar i, no próximo ciclo da iteração.

- E = módulo de elasticidade nas colunas e vigas.
α = coeficiente de dilatação térmica nas colunas e vigas.
T = diferença entre a temperatura média no interior da coluna exposta e interna.

2.2.3 - Etapas da Iteração

Como já foi visto, as incógnitas deslocamentos consideradas são constituidas apenas dos deslocamentos verticais e rotações dos nós. Adotam-se inicialmente valores arbitrários para os deslocamentos verticais relativos entre as colunas exposta e interna e, com isto, através do processo de CROSS, são obtidos os momentos nas colunas e vigas. A partir destes momentos são calculados os demais esforços internos e os alongamentos das colunas. Com base nestes resultados mais os deslocamentos verticais da coluna exposta proveniente das variações de temperatura supondo-a isolada são obtidos os deslocamentos verticais relativos entre as colunas ① e ② para o próximo ciclo da iteração.

A iteração desenvolve-se em nove etapas da maneira que se segue:

1^a) Determinação dos deslocamentos verticais da coluna exposta, nos andares, provenientes da ação da temperatura nesta coluna supondo-a isolada. Isto pode ser feito através da fórmula de recorrência (fig. 2.2)

$$D_{fn} = D_{fm} + T h_n \alpha \quad \dots \quad (2.1)$$

onde n é o andar logo acima do andar m.

2^a) Adotando, conforme sugere KHAN e FINTEL, os valores de D_{fi} como primeira solução para os deslocamentos verticais relativos entre as colunas ① e ② D_i' e, ainda, supondo os nós sem rotação, determinam-se os momentos de engastamento perfeito nas vigas.(figura 2.3).

3^a) Liberação das rotações dos nós e distribuição dos momentos em cada nó (processo de CROSS - fig. 2.4).

4^a) Determinação das forças cortantes nos tramos das vigas entre as colunas ① e ②. Isto pode ser feito através da expressão (fig. 2.4):

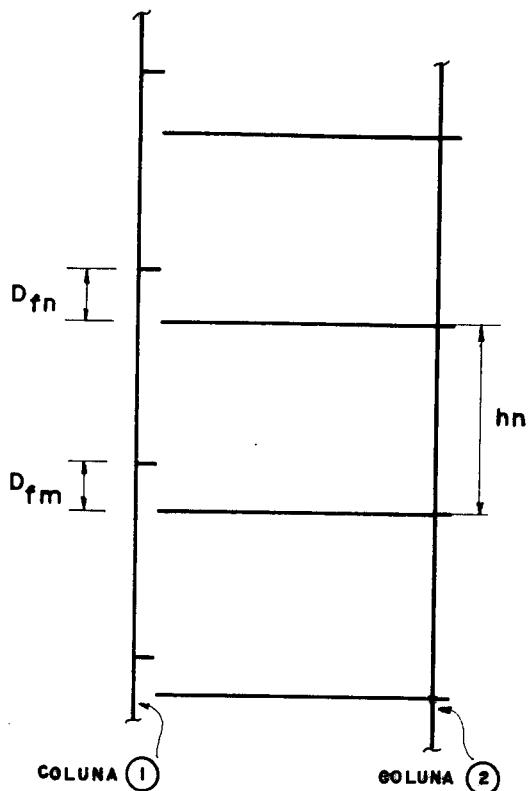
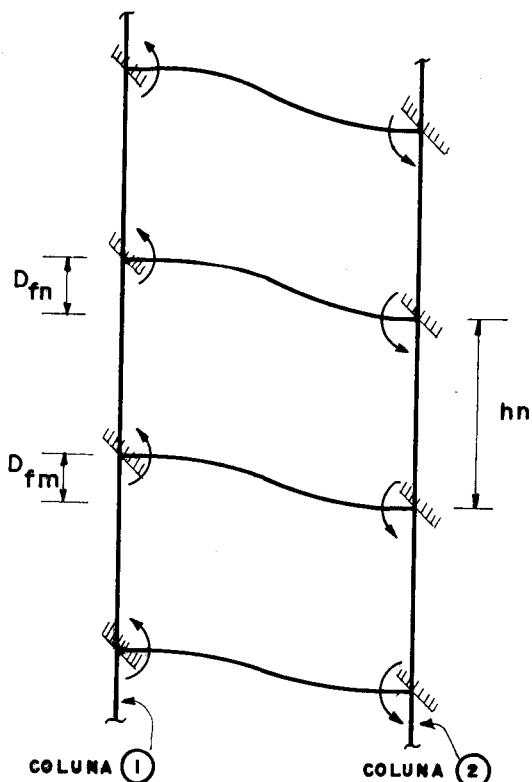


FIG. 2.2 - DESLOCAMENTOS LIVRES DA COLUNA EXPOSTA.



**FIG. 2.3 - MOMENTOS DE ENGASTAMENTO
PERFEITO NAS VIGAS NO PRIMEIRO CICLO DA ITERAÇÃO.**

5^a) Determinação das forças normais, nos andares, nas colunas 1 e 2. Isto pode ser feito acumulando as forças cortantes nos tramos das vigas entre as colunas ① e ② do topo até o andar considerado, ou seja (fig. 2.5).

Os encurtamentos dos pilares das colunas ① e ②, nos andares, são dados por:

$$R_i^{c1} = \frac{P_i^{c1} h_i}{A_i^{c1} E}; \quad R_i^{c2} = \frac{P_i^{c2} h_i}{A_i^{c2} E} \quad \dots \dots \dots \quad (2.4)$$

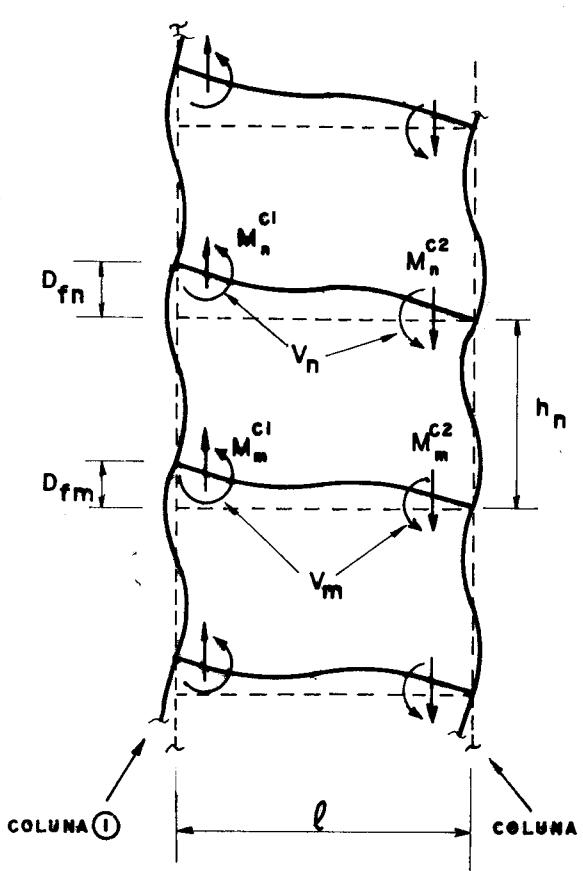


FIG. 2.4 - ESFORÇOS INTERNOS
NAS VIGAS (MOMENTO
E CORTANTE)

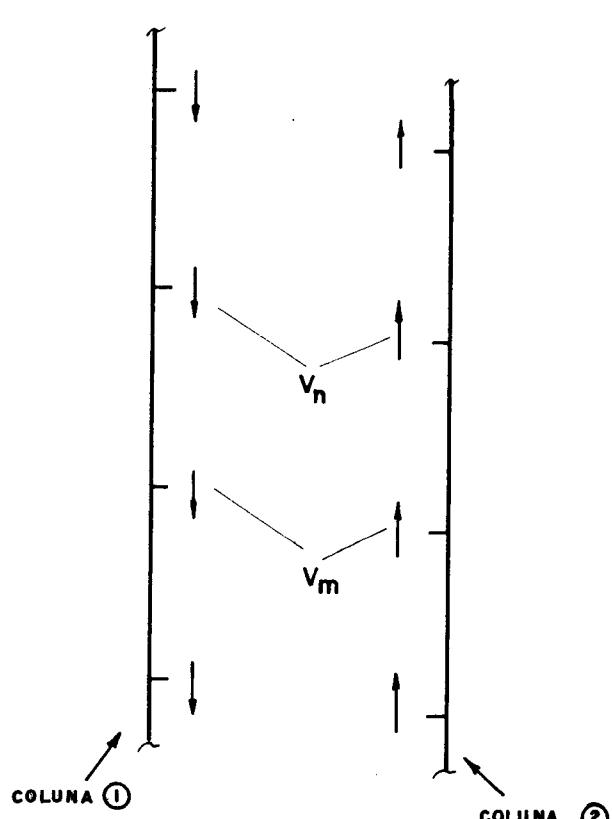


FIG. 2.5 - FORÇAS NORMAIS NAS
COLUNAS.

6^a) Determinação dos deslocamentos verticais das colunas ① e ② nos andares. Isto pode ser alcançado fazendo as somas acumuladas dos encurtamentos dos pilares desde a base até o andar considerado, ou seja:

$$S_i^{c1} = \sum_{j=1}^i R_j^{c1} \quad \dots \dots \dots \quad (2.5)$$

$$S_i^{c2} = \sum_{j=1}^i R_j^{c2}$$

7^a) Determinação da diminuição dos deslocamentos verticais relativos entre as colunas ① e ② adotados na segunda etapa. Isto pode ser feito adicionando em módulo as somas acumuladas dos encurtamentos obtidos na sexta etapa, ou seja:

$$S_i = S_i^{c1} + S_i^{c2} \quad \dots \dots \dots \quad (2.6)$$

8^a) Determinação dos deslocamentos verticais relativos corrigidos, nos andares, através da fórmula de recorrência:

$$D_i'' = D_i' + \frac{D_i' + S_i - D_{fi}}{1 + S_i/D_i'} \quad \dots \dots \dots \quad (2.7)$$

Apresenta-se no parágrafo 2.2.4 a explicação desta fórmula de recorrência, utilizando para isto um exemplo bastante simples.

9^a) Se a correção dos deslocamentos verticais relativos (segunda parcela do segundo membro da exp. (2.7)) for, por exemplo, 1% de ($D_{fi} - S_i$) a iteração pode ser considerada satisfatória, caso contrário repete-se a iteração adotando como deslocamentos verticais relativos no segundo passo os resultados obtidos no oitavo.

2.2.4 - Obtenção da fórmula de recorrência da oitava etapa da iteração

A correção dos deslocamentos verticais relativos entre as colunas (segunda parcela do segundo membro da expressão (2.7)) aplicada na oitava etapa da iteração provem da existência de uma relação linear entre os deslocamentos verticais relativos D_i' e a diminuição destes deslocamentos S_i .

Para simplificar a exposição considere-se a estrutura mostrada na figura 2.6. Admitindo a coluna desvinculada da viga (fig. 2.7) e sujeita a um acréscimo de temperatura, a mesma alonga-se de D_f .

A figura 2.8 exibe um deslocamento vertical arbitrário adotado e a força vertical F_e de interação entre a coluna e a viga proveniente deste deslocamento vertical.

A coluna, quando da atuação de F_e , encurta-se de S (fig. 2.9). Admitindo que a posição final da estrutura é a mostrada na figura 2.10, esta seria alcançada adicionando a F_e , tanto na viga como na coluna, uma certa força F' de modo que a extremidade da viga coincida com a extremidade do pilar.

Pelo exposto chegam-se às seguintes relações:

$$S = \frac{F_e h}{EA} \quad \dots \dots \dots \quad (2.8)$$

onde A é a área da seção transversal do pilar e h o comprimento

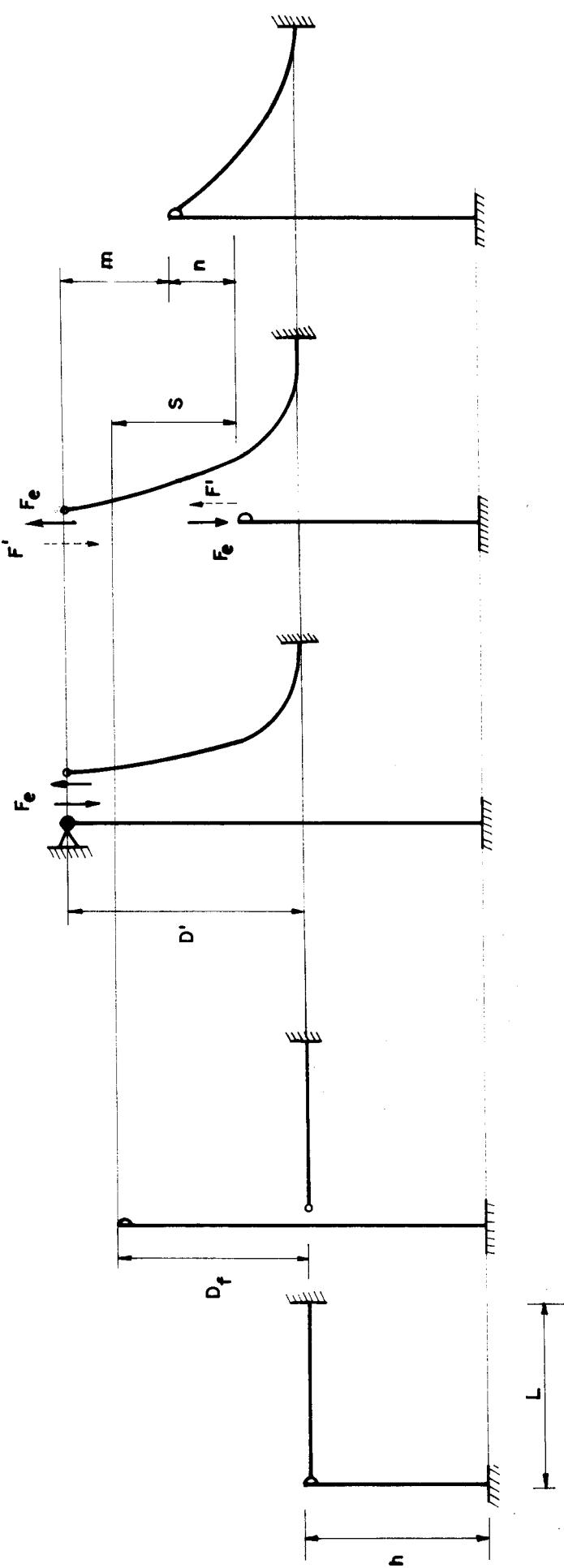


FIG. 2.6 - ESTRUTURA
NO ESTADO
INICIAL

FIG. 2.7 - DESLOCAMENTO
DA COLUNA
ISOLADA

FIG. 2.9 - ALONGAMENTO
ARBITRÁRIO
DA COLUNA

FIG. 2.10 - POSIÇÃO FINAL
DA ESTRUTURA

do mesmo (E é o módulo de elasticidade).

onde L é o comprimento da viga e J o momento de inércia da seção transversal da mesma.

Das expressões (2.8), (2.9), (2.10) e (2.11) chega-se à relação:

Pelo exame das figuras 2.6 até 2.10 chega-se à relação

$$n = D' - (D_f - S) = m \quad \dots \dots \dots \quad (2.13)$$

Substituindo (2.13) em (2.12) tem-se, finalmente, a expressão procurada:

$$m = \frac{D' + S - D_f}{1 + S/D'} \quad \dots \dots \dots \quad (2.14)$$

Convém salientar que nesta expressão as grandezas envolvidas estão em módulo.

Neste exemplo adotado para a obtenção da fórmula de recorrência do oitavo passo da iteração a correção (exp. 2.14) leva ao valor exato do deslocamento vertical, obviamente, para estruturas maiores esta correção leva a uma aproximação do resultado correto.

2.3 - PROCESSO ITERATIVO SIMPLIFICADO

Dentre as etapas do processo iterativo generalizado, apresentado no parágrafo anterior (§ 2.2), a que envolve maior trabalho numérico é a terceira (liberação das rotações dos nós e distribuição dos momentos). Este trabalho numérico pode ser sensivelmente reduzido admitindo momento fletor nulo na meia altura dos pilares. Esta hipótese já é bastante usual em se tratando de edifícios altos e leva a erros desprezíveis para a maioria das

estruturas usuais. Certamente alguma discrepância pode ocorrer na base e no topo da estrutura, mas, como se sabe, estas discrepâncias não afetam os resultados como um todo.

Simplificando a exposição, considere-se a situação esquematizada na figura 2.11. Na figura 2.12 indicam-se os nós A e B isolados e os momentos fletores neles atuando. Indica-se na figura 2.11 as rotações dos nós A e B, respectivamente, θ_1 e θ_2 .

Usando as mesmas notações utilizadas na apresentação do processo iterativo generalizado (§ 2.2) tem-se:

$$M_{BE} = E \cdot K_i^b \left(6 \frac{D_i}{L} - 4\theta_1 - 2\theta_2 \right) \dots \dots \dots \quad (2.17)$$

$$M_{EB} = E \cdot K_i^b \left(6 \frac{D!}{L} - 4\theta_2 - 2\theta_1 \right) \dots \dots \dots \quad (2.20)$$

Admitindo que os pilares não variam bruscamente de seção, o que na prática é usual, tem-se:

$$K_i^{c1} \approx K_{i+1}^{c1} \quad \text{et} \quad K_i^{c2} \approx K_{i+1}^{c2}$$

Tendo em vista estas simplificações o equilíbrio do nó A implica em:

$$(12 \cdot E \cdot K_i^{c1} + 4 \cdot E \cdot K_i^b) \theta_1 + 2 \cdot E \cdot K_i^b \theta_2 = 6(D_i! \cdot E \cdot K_i^b) / L \dots \dots (2.21)$$

e o equilíbrio do nó B implica em:

$$(12 \cdot E \cdot K_i^c)^2 + 4 \cdot E \cdot K_i^b) \theta_2 + 2 \cdot E \cdot K_i^b \theta_1 = 6(D_i^t \cdot E \cdot K_i^b)/L \quad \dots \dots \dots (2.22)$$

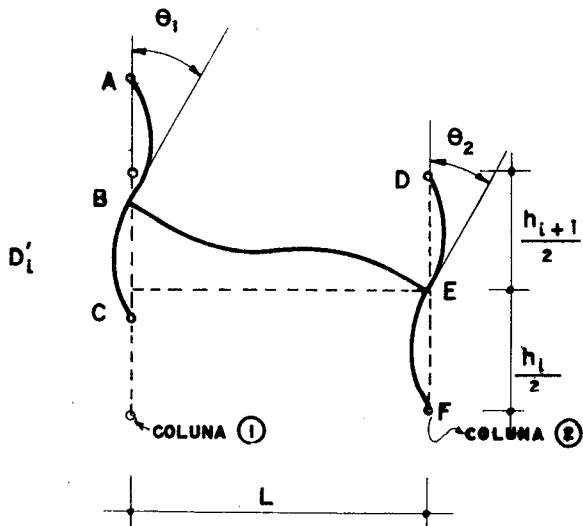


FIG. 2.II - ELÁSTICAS NO ANDAR i

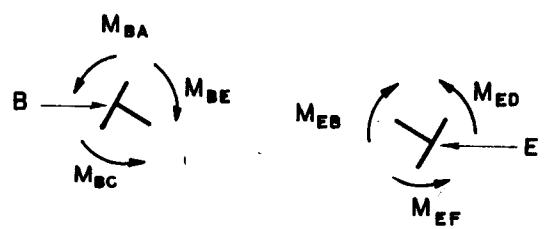


FIG. 2.I2 - ROTAÇÕES DOS NOS E MOMENTOS FLETORES ATUANTES.

Resolvendo as equações (2.21) e (2.22) nas rotações θ_1 e θ_2 encontram-se:

$$\theta_1 = \frac{D'_i \cdot K_i^b \cdot (6 \cdot K_i^{c2} \cdot K_i^b)}{L \cdot (12 \cdot K_i^{c1} \cdot K_i^{c2} + K_i^b \cdot K_i^b + 4K_i^b \cdot K_i^{c1} + 4K_i^b \cdot K_i^{c2})} \dots \dots \dots \quad (2.23)$$

$$\theta_2 = \frac{D'_i \cdot K_i^b (6 \cdot K_i^{c1} + K_i^b)}{L (12 \cdot K_i^{c1} \cdot K_i^{c2} + K_i^b \cdot K_i^b + 4K_i^b \cdot K_i^{c1} + 4K_i^b \cdot K_i^{c2})} \dots \dots \dots \quad (2.24)$$

Substituindo os valores de θ_1 e θ_2 obtidos pelas expressões (2.23) e (2.24) em (2.17) e (2.20) obtem-se os momentos M_{BE} e M_{EB} . Com estes momentos a expressão (2.2) do quarto passo do processo iterativo generalizado fica:

$$v_i = \frac{M_{BE} + M_{EB}}{L} \dots \dots \dots \quad (2.25)$$

Finalizando, vê-se que admitindo a hipótese de momento fletor nulo na meia altura dos pilares diminui enormemente o trabalho numérico envolvido na terceira etapa do processo generalizado, pois a aplicação do processo de CROSS (também processo iterativo) para a obtenção dos momentos fletores finais nas vigas e pilares fica substituída por expressões analíticas que fornecem diretamente tais esforços.

CAPÍTULO III

ANÁLISE APROXIMADA DE ESTRUTURAS DE EDIFÍCIOS ALTOS

3.1 - INTRODUÇÃO

Apresenta-se neste capítulo o processo de análise de estruturas tridimensionais de edifícios altos desenvolvido por STAMATO e SMITH¹⁸. Este processo aplica-se às estruturas tridimensionais que podem ser assimiladas a um conjunto de estruturas verticais bidimensionais (pórticos, treliças e pilares-paredes), genericamente denominadas de painéis, dispostas em planos ortogonais ou oblíquos e travadas entre si por diafragmas horizontais providos de rigidez infinita em seus planos e nula transversalmente (simulação das lajes). Ao longo das interseções verticais dos painéis supõe-se a transmissão de forças verticais, concentradas ao nível dos andares, de modo a assegurar a compatibilidade dos deslocamentos verticais dos pontos que pertencem, simultaneamente, aos painéis aí concorrentes. Neste particular, tal processo permite o estudo dos problemas tratados no presente trabalho, conforme se esclarece mais adiante no parágrafo 3.2.5.

3.2 - HIPÓTESES

As hipóteses em que se baseia o processo, segundo o procedimento via deslocamentos, são as seguintes:

3.2.1 - Lajes: As lajes são assimiladas como diafragmas providos de rigidez infinita em seus planos e nula transversalmente. A contribuição das lajes para a rigidez do conjunto, além de travar os painéis ao nível dos andares, simuladas pelos diagramas, faz-se sentir, ainda, através das faixas das mesmas que se incorporam às vigas vizinhas, formando com elas seções em T ou L.

3.2.2 - Painéis: Os painéis são estruturas bidimensionais (pórticos, treliças e pilares-paredes) sem rigidez transversal, cujos elementos são supostos não possuirem rigidez à torção. Supõe-se também conhecida a matriz de rigidez de cada painel previamente. A deformação axial é considerada nas colunas e pilares-paredes,

todavia, é desprezada nas vigas por conformidade com a hipótese 3.2.1.

3.2.3 - Interdependência entre os painéis: Os painéis interagem através de forças horizontais transmitidas pelos diafragmas e por forças verticais, concentradas ao nível dos andares, ao longo de suas interseções. Todas as interações que ocorrem entre os painéis em um determinado andar devem ocorrer nos demais; caso isto não seja possível em um ou mais andares, por falta de continuidade de vigas, colunas ou pilares-paredes, podem ser inseridos elementos de rigidez nula no lugar dos inexistentes, que acarretam esforços de interação nulos naquele ou naqueles andares.

3.2.4 - Ângulos entre os painéis: Os painéis que se interceptam podem estar contidos em planos oblíquos ou ortogonais. Respeitando as hipóteses anteriores, os dois casos onde são permitidas interseções sem exigências de ortogonalidade são:

- a) - Painéis contidos em planos oblíquos e que não se interagem ao longo da interseção.
- b) - Painéis contidos em planos oblíquos, cuja interseção não seja ao longo de uma coluna.

Na interseção onde existe coluna, os painéis aí concorrentes devem estar contidos em planos ortogonais e os eixos principais de inércia das seções transversais da coluna devem estar contidos nos planos dos painéis. Estas restrições são feitas para se evitar o problema da flexão oblíqua da coluna, que incluiria também momentos como esforços de interação entre os painéis, desobedecendo, assim, a hipótese 3.2.3.

3.2.5 - Cargas: São consideradas somente as cargas que atuam segundo as incógnitas-deslocamentos do edifício, que são em número de três para cada diafragma (uma rotação e duas translações) mais o número de interações entre painéis ao longo das interseções de deslocamentos verticais. Atuando em cada andar, as cargas permitidas são (fig. 3.1):

- a) - Resultante horizontal segundo o eixo Ox.
- b) - Resultante horizontal segundo o eixo Oy.
- c) - Momento resultante segundo o eixo Oz.
- d) - Forças verticais segundo as interseções entre os painéis.

O problema geral, onde se têm cargas atuando em direções quaisquer, pode ser resolvido por superposição do caso aqui estudo com outro, onde os deslocamentos do sistema são impedidos (deste modo obtem-se cargas equivalentes segundo as incógnitas-deslocamentos do edifício).

O fato do processo considerar as cargas verticais segundo as interseções entre os painéis permite o estudo dos efeitos das variações de temperatura, pois, como já foi visto no capítulo I, estes efeitos podem ser tratados admitindo somente os esforços equivalentes axiais nas colunas provenientes de tais variações (estes esforços podem ser enquadrados no carregamento d)).

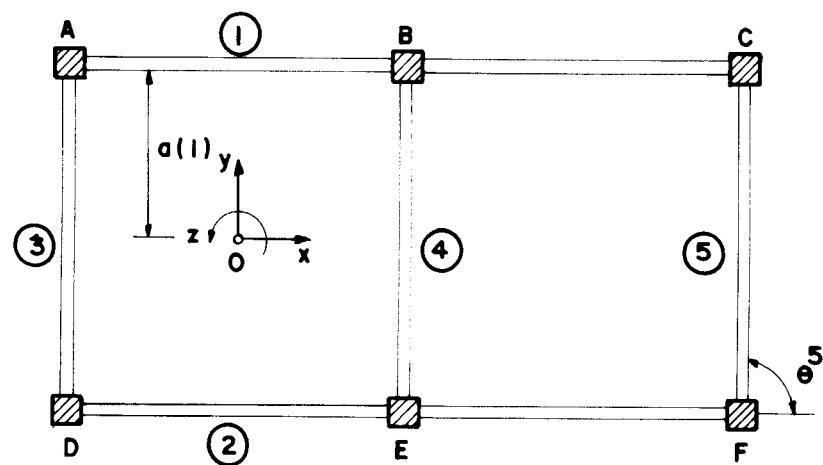
3.3 - DESLOCAMENTOS DOS PAINÉIS E DO EDIFÍCIO

No intuito de facilitar a exposição, considere-se a estrutura do edifício de 'f' andares, cuja planta mostra-se na figura 3.1 a). Os eixos principais de inércia das seções das colunas A, B, ... F são supostos paralelos aos eixos Ox e Oy , pois as mesmas encontram-se nas interseções entre os painéis. Todos os painéis são pôrticos e encontram-se numerados com números dentro de pequenos círculos.

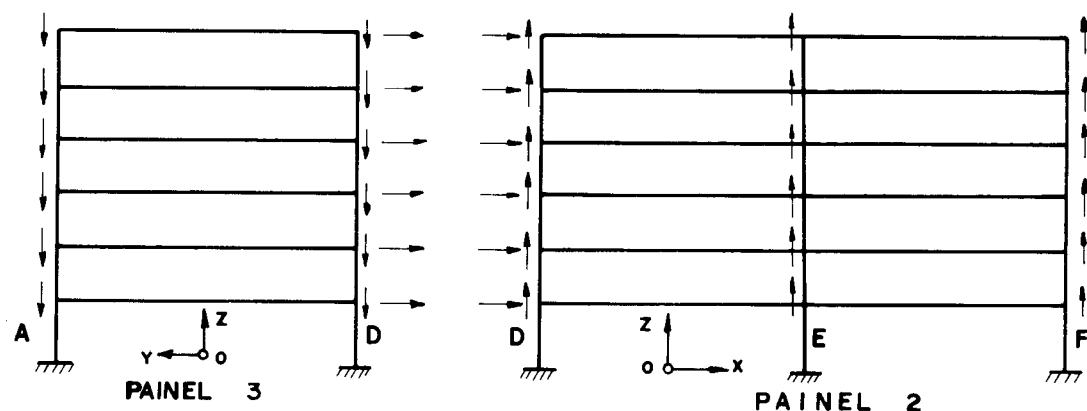
Na interseção onde existe coluna, os parâmetros da seção transversal da coluna são facilmente divididos entre os painéis aí concorrentes. Por exemplo, a coluna D contribui no painel ③ com momento de inércia J_x e no painel ② com J_y ; a área da seção pode ser arbitrariamente dividida entre os painéis, pois tal procedimento não altera os coeficientes de rigidez da estrutura que dependem deste parâmetro.

A escolha dos eixos de referência $Oxyz$ (dextrorso no caso da figura 3.1 a)) deve ser feita, preferencialmente, com origem O próxima do "centro de torção" e os eixos Ox e Oy orientados segundo as "direções principais" da estrutura. Não cabe aqui uma determinação rigorosa de tal centro ou direções, mesmo porque podem variar ao longo da altura do edifício. Entretanto, é oportuno salientar que uma escolha arbitrária do sistema de referência pode prejudicar o bom condicionamento do sistema de equações, que se descreve mais adiante (equação 3.18)).

Chamando de O_j o ponto onde o eixo vertical Oz cruza o diafragma do andar j , as n incógnitas-deslocamentos da estrutura, no andar j , são (no decorrer da descrição deste processo, as nota-

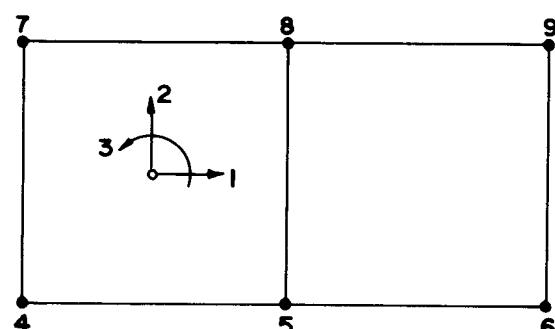


a) PLANTA DA ESTRUTURA DO EDIFÍCIO

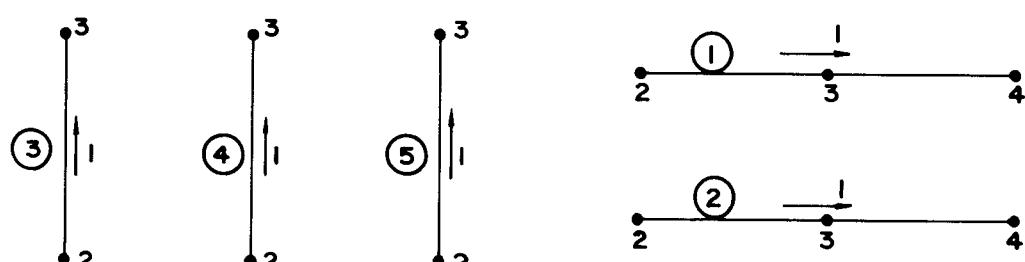


b) IDENTIFICAÇÃO DOS PAINÉIS

FIG. 3.1 - ESTRUTURAS DO EDIFÍCIO E IDENTIFICAÇÃO DOS PAINÉIS



a) NUMERAÇÃO DOS DESLOCAMENTOS DO EDIFÍCIO POR ANDAR



b) NUMERAÇÃO DOS DESLOCAMENTOS DOS PAINÉIS POR ANDAR.

FIG. 3.2 - NUMERAÇÃO DOS DESLOCAMENTOS POR ANDAR

ções são as mesmas usadas por STAMATO e SMITH¹³, com ligeiras modificações e omissões, tendo em vista o problema aqui tratado):

v_{j1} = deslocamento de O_j segundo $0x$.

v_{j2} = deslocamento de O_j segundo $0y$.

v_{j3} = rotação do diafragma em torno de $0z$ (positiva no sentido dextrorso).

$v_{j4}, v_{j5} \dots v_{jn}$ = deslocamentos verticais do andar j (positivos para cima - segundo $0z$) ao longo das interseções dos painéis.

Usando i como índice superior para caracterizar as grandezas relativas ao painel i (sem qualquer significado de expoente), as m_i incógnitas-deslocamentos deste painel, no andar j , são:

d_{j1}^i = deslocamento horizontal do painel i , em seu próprio plano, ao nível do andar j . Em cada painel é arbitrado um sentido positivo para este deslocamento (ver "flechas" na figura 3.2 b)).

$d_{j2}^i, d_{j3}^i \dots d_{jm}^i$ = deslocamentos verticais, ao nível do andar j (positivos para cima), do painel i , correspondentes às m_i interações do mesmo com os seus vizinhos.

Na estrutura mostrada na figura 3.1 a) foram considerados 9 deslocamentos do edifício por andar ($n = 9$). A numeração destes deslocamentos para um andar genérico encontra-se na figura 3.2 a). Na figura 3.2 b) vê-se a numeração dos correspondentes deslocamentos nos painéis. Para o estudo ser levado a bom termo é conveniente que a numeração adotada para os deslocamentos do edifício e painéis, num determinado andar, seja repetida na mesma sequência nos demais (isto facilita a montagem das matrizes envolvidas).

3.3.1 - Notações Matriciais dos Deslocamentos

As notações usadas nesta apresentação do processo são as seguintes:

p = número de painéis.

f = número de andares.

i = índice superior para caracterizar as grandezas relativas ao painel genérico *i*.

j e g = índices inferiores para designar as grandezas relativas a andares genéricos.

n = número de deslocamentos considerados no edifício por andar.

mi = número de deslocamentos considerados no painel i por andar.

c = índice inferior para designar uma coordenada genérica nos painéis e no edifício.

v_{jc} = deslocamentos do edifício no andar j segundo a coordenada c ($c = 1, 2, \dots, n$).

V_j = matriz coluna (n linhas) correspondente aos deslocamentos do edifício no andar j.

V = matriz coluna (f.n linhas) correspondente aos deslocamentos do edifício.

$$V = \begin{Bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_f \end{Bmatrix} \text{ ordem } (f \times n) \dots \dots \dots \quad (3.2)$$

d_{jc}^i = deslocamento do painel i , no andar j , segundo a coordenada c .

$D_{j,i}^i$ = matriz coluna (m^i linhas) correspondente aos deslocamentos do painel i no andar j .

$$D_{j}^{(i)} = \begin{cases} d_{j1}^{(i)} \\ d_{j2}^{(i)} \\ \dots \\ d_{jm_i}^{(i)} \end{cases} \quad \text{ordem } (m^i \times 1) \dots \dots \dots \quad (3.3)$$

D^i = matriz coluna ($f \cdot m^i$ linhas) correspondente aos deslocamentos do painel i .

$$D^i = \begin{Bmatrix} D_1^i \\ D_2^i \\ \dots \\ D_f^i \end{Bmatrix} \quad \text{ordem } (f \cdot m^i \times 1) \quad \dots \dots \dots \quad (3.4)$$

D^i = matriz coluna ($f \cdot m$ linhas, onde $m = \sum_1^p m^i$) correspondente aos deslocamentos de todos os painéis.

$$D = \begin{Bmatrix} D^1 \\ D^2 \\ \dots \\ D^P \end{Bmatrix} \quad \text{ordem } (f \cdot m \times 1) \quad \dots \dots \dots \quad (3.5)$$

3.3.2 - Transformação dos Deslocamentos

A matriz dos deslocamentos dos painéis D e a matriz dos deslocamentos do edifício V , definidas no parágrafo anterior, estão relacionadas através de uma matriz de transformação B da forma que se segue:

$$D = B \cdot V \quad \dots \dots \dots \quad (3.6)$$

A matriz B , assim definida, de ordem $(f \cdot m \times f \cdot n)$ por consequência das expressões (3.2) e (3.5), transforma os deslocamentos do edifício nos seus correspondentes nos painéis. A expressão (3.6) pode, ainda, ser escrita, separando as matrizes D e B em sub-matrizes relativas aos painéis, da seguinte maneira:

$$\begin{Bmatrix} D^1 \\ D^2 \\ \dots \\ D^P \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} B^1 \\ B^2 \\ \dots \\ B^P \end{Bmatrix} \cdot V \quad \dots \dots \dots \quad (3.7)$$

Efetuando o produto matricial acima indicado, na forma de produto de sub-matrizes, a expressão (3.7) pode, ainda, ser escrita:

$$D^i = B^i \cdot V \dots \dots \dots \quad (3.8)$$

onde B^i é de ordem ($f \cdot m^i \times f \cdot n$) por consequência das expressões (3.4) e (3.2).

Os deslocamentos do painel i e os do edifício estão relacionados por andar, portanto a expressão (3.8) toma a forma:

$$\begin{Bmatrix} D_1^i \\ D_2^i \\ \dots \\ D_f^i \end{Bmatrix} = \begin{vmatrix} b_1^i & 0 & \dots & 0 \\ 0 & b_2^i & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & b_f^i \end{vmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \dots \\ v_f \end{Bmatrix} \dots \dots \dots \quad (3.9)$$

A repetição de uma mesma configuração geométrica da estrutura do edifício em todos os andares, que nos casos da prática quase sempre se verifica, pelo menos para andares superiores, torna as sub-matrizes b_1^i , b_2^i , ..., b_f^i todas idênticas. Portanto:

$$b_1^i = b_2^i = \dots \dots \dots = b_f^i = b^i \dots \dots \dots \quad (3.10)$$

Como exemplo mostra-se a seguir a forma de b^1 para a estrutura da figura 3.1 a), que transforma os deslocamentos do edifício, num determinado andar, nos deslocamentos do painel 1 no mesmo andar (ver figs. 3.1 e 3.2):

$$b^1 = \begin{vmatrix} \cos(\theta^1) & \sin(\theta^1) & a^1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \dots \dots \dots \quad (3.11)$$

onde θ^1 é o ângulo entre o sentido positivo adotado para os deslocamentos horizontais do painel 1 e o eixo Ox , medido positivamente no sentido dextrorso a partir do eixo Ox e a^1 é a distância do painel 1 ao eixo Oz , considerada positiva se o momento de uma força segundo o deslocamento horizontal do painel 1 for de sentido dextrorso (ver "flechas" na figura 3.2 c)). Obviamente, todas

as matrizes b^i são formalmente idênticas a b^1 .

Percebe-se pela expressão (3.11), que o único elemento das matrizes b^i não possuindo valor absoluto compreendido entre zero e um, é o elemento a^i (primeira linha terceira coluna), e que, além disso, esse elemento assume valores diferentes conforme a unidade utilizada para as medidas lineares. Para contornar este inconveniente, que pode deixar mal condicionado o sistema de equações (expressão (3.18)), aconselha-se adotar como unidade para as rotações dos diagramas a unidade radiano / \bar{a} , onde \bar{a} é o máximo valor absoluto assumido pelos a^i . Assim procedendo, o elemento a^i torna-se a^i/\bar{a} e deste modo assume valores compreendidos entre -1.. e +1.. Convém salientar que nesta nova unidade as rotações reais dos diafragmas resultam multiplicadas por \bar{a} , pois os momentos aplicados devem também ser fornecidos nesta nova unidade, ou seja, momentos reais divididos por \bar{a} .

Uma maneira de simplificar o armazenamento e economizar memória no computador, consiste em reunir ordenadamente as sub-matrizes b^i em uma única matriz P , denominada matriz 'posição dos painéis' (as matrizes b^i definem as posições dos painéis) da seguinte forma:

deste modo usa-se uma área de memória $f \cdot f$ vezes menor que se usaria para a matriz B (eq. (3.6)).

3.4 - MATRIZ DE RIGIDEZ DO PAINEL

A matriz de rigidez S^i do painel i , de ordem $(f.m^i \times f.m^i)$, transforma os deslocamentos considerados neste painel D^i em esforços correspondentes F^i , de ordem por conseguinte $(f.m^i \times 1)$, neste mesmo painel. Assim sendo tem-se:

De acordo com o exposto, a matriz de rigidez si do

painel i não cobre, obviamente, todos os graus de liberdade deste painel, restringindo-se apenas aos f.m̄i deslocamentos considerados. Como os deslocamentos δ_i do painel i estão dispostos ordenadamente por andar (eqs. (3.3) e (3.4)) e da mesma forma, por conseguinte, os correspondentes esforços F_i , a matriz de rigidez S_i resulta particionada em sub-matrizes relativas aos andares, tendo a forma:

$$S_i = \begin{vmatrix} S_{1,1}^i & S_{1,2}^i & \dots & S_{1,f}^i \\ S_{2,1}^i & S_{2,2}^i & \dots & S_{2,f}^i \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ S_{f,1}^i & S_{f,2}^i & \dots & S_{f,f}^i \end{vmatrix} \dots \dots \dots \quad (3.14)$$

onde as colunas de $S_{j,g}^i$ representam esforços F_j^i aplicados no painel i no andar j, quando se impõe um deslocamento unitário segundo um dos deslocamentos considerados no andar g, mantendo impedidos apenas os demais deslocamentos considerados neste painel.

Conforme salienta STAMATO e SMITH¹⁹, os coeficientes de rigidez das sub-matrizes $S_{j,g}^i$ "amortecem" rapidamente à medida que o andar j fica distante do andar considerado g, podendo, inclusive, nas aplicações práticas, considerar nulos os coeficientes destas sub-matrizes, quando em módulo ($j - g$) superar 2 ou 3, ou seja:

$$S_{j,g}^i = 0 \dots \dots \dots \quad (3.15)$$

se $|j - g| > 2$ ou 3

Em outra palavras, a matriz de rigidez S^i do painel i pode ser considerada em banda diagonal, banda esta que corresponde a 2 ou 3 andares acima e abaixo do andar considerado.

Um "amortecimento" dos coeficientes de rigidez mais acentuado, é conseguido quando se usam como coordenadas dos deslocamentos horizontais, não os movimentos absolutos dos andares, mas sim os movimentos relativos de cada andar em relação ao andar imediatamente inferior (vide STAMATO e SMITH¹⁹).

No presente trabalho as matrizes de rigidez dos painéis foram obtidas com o auxílio de um programa automático de computador, que consiste na adaptação de um programa mais geral de análise de estruturas planas sugerido por GERE e WEAVER²⁰. A matriz de

rigidez de cada painel é obtida coluna por coluna (ou linha por linha, por força de sua simetria), com base nas reações de apoio de um problema fictício elaborado para este fim, quando se impõe recalque unitário segundo o deslocamento correspondente.

Seja, por exemplo, o pórtico plano da figura 3.3 a), constituído de duas prumadas de pilares e três vigas, referido num sistema de coordenadas Oxy. Pretende-se obter a matriz de rigidez deste pórtico correspondente aos deslocamentos numerados nesta figura: os deslocamentos de números 1, 2 e 3 são considerados horizontais relativos (segundo Ox), ou seja, deslocamento horizontal de um andar em relação ao seu vizinho imediatamente abaixo, supondo, obviamente desprezadas as deformações axiais das vigas (§ 3.2.2); os demais, de números 4, 9 são deslocamentos verticais absolutos dos nós (segundo Oy).

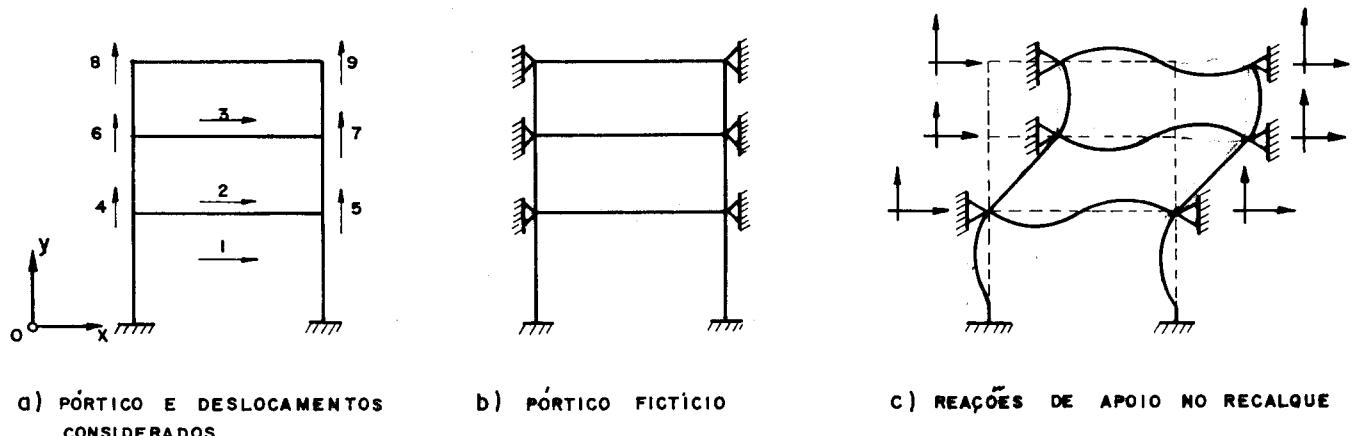


FIG. 3.3 - DESLOCAMENTOS E ETAPAS NA OBTENÇÃO DA MATRIZ DE RIGIDEZ.

Na figura 3.3 b) vê-se o pórtico fictício, onde se vinculam os deslocamentos considerados no pórtico de origem, deixando livre os demais, que neste caso são somente as rotações dos nós. A figura 3.3 c) ilustra a obtenção da segunda coluna da matriz de rigidez, ou seja, a coluna correspondente ao deslocamento horizontal relativo de número 2. Os coeficientes da matriz de rigidez correspondentes aos deslocamentos horizontais relativos são, de acordo com o conceito de esforços e deslocamentos generalizados, forças cortantes totais no pórtico ao nível do deslocamento considerado. Obtem-se tais esforços fazendo a soma acumulada das reações de apoio horizontais, de cima para baixo, até o nível do deslocamento considerado. Os coeficientes da matriz de rigidez correspondentes

aos deslocamentos absolutos verticais dos nós consistem nas próprias reações de apoio aplicadas segundo eles. Deste modo, os coeficientes da matriz de rigidez da segunda coluna são facilmente obtidos através das reações de apoio do problema mostrado na figura 3.3 c) e, análogamente, podem ser obtidos os coeficientes de rigidez das outras colunas da matriz de rigidez.

3.5 - MATRIZ DE RIGIDEZ DO EDIFÍCIO

Reunindo as equações (3.13) de todos os painéis, define-se uma matriz S_u , que relaciona os deslocamentos de todos os painéis com esforços correspondentes nos respectivos painéis da seguinte maneira:

$$\begin{Bmatrix} F^1 \\ F^2 \\ \dots \\ F^P \end{Bmatrix} = S_u \cdot \begin{Bmatrix} D^1 \\ D^2 \\ \dots \\ D^P \end{Bmatrix} \dots \dots \dots \quad (3.16)$$

onde tem-se para a matriz S_u :

$$S_u = \begin{vmatrix} s^1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & s^2 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & s^P \end{vmatrix} \dots \dots \dots \quad (3.17)$$

Da equação (3.17) percebe-se que a matriz S_u é de ordem $(f \cdot m \times f \cdot m)$. Esta matriz, assim definida, tem o significado de matriz de rigidez da estrutura desmontada, ou seja, matriz de rigidez de uma estrutura composta de painéis independentes (que não se interagem).

Tendo em vista simplificar o armazenamento e economizar memória no computador, a matriz S_u pode ser fornecida reunindo ordenadamente as sub-matrizes s^i por coluna, numa matriz P_s , denominada "matriz de rigidez dos painéis".(maiores detalhes a respeito do fornecimento de S_u ao computador são dados no cap. V).

A matriz de rigidez do edifício S, de ordem ($f \cdot n \times f \cdot n$), transforma os deslocamentos considerados no edifício V, em esforços correspondentes R, de ordem, por conseguinte ($f \cdot n \times 1$), no mesmo. Portanto tem-se:

Como os deslocamentos considerados V e, por conseguinte, R estão ordenados por andar, resulta para S uma matriz particionada em sub-matrizes relativas aos andares tendo f·f sub-matrizes de ordem (n x n). Deste modo tem-se:

$$S = \begin{vmatrix} s_{1,1} & s_{1,2} & \dots & s_{1,f} \\ s_{2,1} & s_{2,2} & \dots & s_{2,f} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ s_{f,1} & s_{f,2} & \dots & s_{f,f} \end{vmatrix} \quad \dots \dots \dots \quad (3.19)$$

As matrizes B e S_u , anteriormente definidas, fornecem a matriz S pela conhecida relação:

onde $\{B\}^T$ representa a matriz transposta da matriz B.

Procedendo a partição de $\{B\}^T$, S_u e B em sub-matrizes relativas aos painéis, encontra-se:

$$S = \left\{ \begin{pmatrix} B^1 \\ B^2 \\ \vdots \\ B^P \end{pmatrix}^T \right. \dots \left. \begin{pmatrix} B^1 \\ B^2 \\ \vdots \\ B^P \end{pmatrix}^T \right\} \cdot \begin{vmatrix} S^1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & S^2 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & S^P \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} B^1 \\ B^2 \\ \vdots \\ B^P \end{vmatrix} \quad (3.21)$$

A contribuição do painel i na matriz de rigidez S , de acordo com as eqs. (3.8), (3.14) e (3.21), é dada por:

onde, separando em sub-matrizes relativas aos andares, tem-se:

$$\left| \begin{array}{cccc} \{b^i\}^T & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \{b^i\}^T & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \{b^i\}^T \end{array} \right| \cdot \left| \begin{array}{ccc} s_{1,1}^i & s_{1,2}^i & s_{1,f}^i \\ s_{2,1}^i & s_{2,2}^i & s_{2,f}^i \\ \dots & \dots & \dots \\ s_{f,1}^i & s_{f,2}^i & s_{f,f}^i \end{array} \right| \cdot \dots \cdot \left| \begin{array}{cccc} b^i & 0 & \dots & 0 \\ 0 & b^i & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & b^i \end{array} \right| \dots \dots \dots \quad (3.23)$$

A matriz de rigidez do edifício é obtida, obviamente, considerando a contribuição de todos os painéis; ou em outras palavras, efetuando os produtos indicados na eq. (3.21). Portanto:

$$S = \sum_{i=1}^p \{B^i\}^T \cdot S^i \cdot B^i \dots \dots \dots \quad (3.24)$$

Observando as expressões (3.23) e (3.24), conclui-se que a sub-matriz genérica $S_{j,g}$ de S vale:

$$s_{j,g} = \sum_{i=1}^p \{b^i\}^T \cdot s_{j,g}^i \cdot b^i \dots \dots \dots \quad (3.25)$$

Tendo em vista a expressão (3.15), onde se admite que em termos práticos a matriz S^i é em banda diagonal, que corresponde a 2 ou 3 andares acima e abaixo do considerado, tem-se, pela expressão (3.25), que a matriz S resulta também em banda diagonal, análoga à adotada para os painéis ou seja:

$$s_{j,g} = 0 \quad \dots \dots \dots \quad (3.26)$$

se $|j - g| > 2$ ou 3

As expressões (3.15), (3.24), (3.25) e (3.26) permitem a elaboração de um programa, onde somente se usa a meia banda de si, obtendo, assim, a meia banda de S por meio de P de ordem muito menor que B.

3.6 - DESLOCAMENTOS E ESFORÇOS NOS PALHETIS

Conhecidas as cargas R que atuam na estrutura do edifício, obviamente, segundo os deslocamentos considerados, e a matriz de rigidez S , a próxima etapa consiste na resolução do sistema de equações:

que no presente trabalho é feita através do conhecido processo de GAUSS. Apesar deste processo de resolução de sistema de equações não tirar proveito do fato da matriz S ser definida positiva (como faz o processo de CHOLESKY), ele foi aqui escolhido por permitir que o sistema de equações seja parcialmente singular (quando não existe continuidade de vigas, colunas ou pilares-paredes, a introdução de elementos de rigidez nula no lugar dos inexistentes - § 3.2.3 - pode deixar singular certos trechos da matriz de rigidez).

Obtidos os deslocamentos do edifício V, os deslocamentos dos painéis podem ser obtidos através da expressão (3.8). Com sub-matrizes de ordem menores, relativas aos andares, tendo em vista as expressões (3.9) e (3.10), eles podem ser obtidos através de:

Os esforços nos painéis, segundo as coordenadas deslocamentos consideradas, podem ser obtidos através da matriz D^i e da matriz S^i , tendo em vista as expressões (3.13), (3.15) e (3.28), da seguinte maneira:

$$F^i = S^i + D^i \dots \dots \dots \quad (3.29)$$

Obtidos os esforços F_i e os deslocamentos d_i nos painéis, a análise tridimensional pode ser considerada como terminada, contudo, os esforços internos nos painéis (p. Ex.: momentos, forças normais e cortante nas barras), podem ser posteriormente obtidos com o auxílio de programas já sobejamente divulgados para análise de estruturas planas (vide GERE e WEAVER²⁰).

CAPÍTULO IV

EXEMPLOS DE APLICAÇÃO

4.1 - INTRODUÇÃO

Dentre as diversas estruturas resolvidas pelo autor durante a realização deste trabalho, duas delas são aqui apresentadas por considerar-se que o estudo das mesmas salienta certas peculiaridades do comportamento tridimensional dos edifícios altos, quando sujeitos às variações de temperatura.

Em cada uma das duas estruturas aqui apresentadas foram feitas análises planas dos seus painéis (pórticos planos) imaginados isolados, conforme o procedimento sugerido por GERE e WEAVER¹², e também feita a análise tridimensional do conjunto de painéis, conforme o procedimento exposto no capítulo III. Em seguida, para cada grandeza procurada (deslocamentos, forças normais e distorções nos quadros divisórios), fazem-se as comparações entre os resultados encontrados nas análises planas e na análise tridimensional. Procura-se também verificar a conveniência de uma ou de outra solução e, ainda, se é possível aproximar satisfatoriamente os resultados da análise tridimensional, evidentemente os mais próximos do comportamento real, por uma oportuna superposição de resultados de análises planas de pórticos concorrentes. Naturalmente, a substituição da análise tridimensional por uma ou duas análises planas, quando puder ser realizada, diminui em muito o trabalho numérico (o trabalho numérico da análise tridimensional é sensivelmente maior que o das análises planas).

Como já foi visto no capítulo II, dentre as soluções planas apresentadas na literatura técnica algumas envolvem processos de cálculos iterativos, apropriados para o cálculo manual, e outras o uso de computadores. Nos exemplos apresentados, tanto as análises planas como a tridimensional, foram feitas no computador.

As análises planas dos painéis foram realizadas através de um programa de computador já bastante conhecido, cuja programação automática foi desenvolvida por GERE e WEAVER²⁰ (esta programação tem por base o procedimento matricial via deslocamentos proposto por eles sugerido).

Para a análise tridimensional do conjunto de painéis existe já escrito um programa automático em linguagem ALGOL, cuja listagem e maiores detalhes podem ser encontrados em STAMATO²¹. Como viu-se no capítulo III, o processo desenvolvido por STAMATO e SMITH¹³ permite o tratamento do problema de variações de temperatu-

ra em estruturas tridimensionais de edifícios, por levar em consideração também as cargas verticais correspondentes aos esforços de engastamento perfeito devidos às variações de temperatura. Uma versão em linguagem FORTRAN do mesmo programa de cálculo escrito em linguagem ALGOL foi elaborado por OLIVEIRA²² para o computador IBM-1130 do Centro de Processamento de Dados da E.E.S.C.. No presente trabalho o programa de cálculo usado pelo autor tem por base a versão preparada por OLIVEIRA com algumas modificações. A descrição do programa de cálculo utilizado, bem como as explicações necessárias para a sua compreensão e utilização, são dadas no capítulo V.

4.2 - PRIMEIRO EXEMPLO

A estrutura aqui estudada é constituída de 10 andares idênticos de planta igual à mostrada na figura 4.1). Todos os pés direitos valem 3.0 m. Os pilares têm todos seção de 30.0 x 30.0 cm. As vigas são também idênticas em todos os andares com seção de 12.0 cm x 40.0 cm.. Foi adotado o módulo de elasticidade $E=100t/cm^2$ em todos os pilares e vigas (valor especificado para o concreto armado na NB-1/60 - artigo 54). Para o coeficiente de dilatação térmica, toma-se o valor $\alpha = 10^{-5}C^{-1}$ (valor também especificado para o concreto armado na NB-1/60- artigo 5).

Supõe-se que a causa de solicitação da estrutura seja um acréscimo de temperatura $\Delta T = +30^{\circ}C$ nas colunas do contorno do edifício. Admite-se, deste modo, que a exposição destas colunas é total. As colunas nas quais se dá o aumento de temperatura no presente exemplo encontram-se hachuradas na figura 4.1).

Devido à simetria da estrutura (fig. 4.1) e da solicitação, o comportamento das colunas I (interna), E_1 (externa do painel ①), E_2 (externa do painel ②) e C (coluna de canto), retrata o das demais. Por isto somente os resultados referentes a estas quatro colunas são apresentados. Na figura 4.1 vêm-se ainda os painéis de números ① e ②, para os quais são feitas análises planas supostos isolados (desvinculados do restante da estrutura).

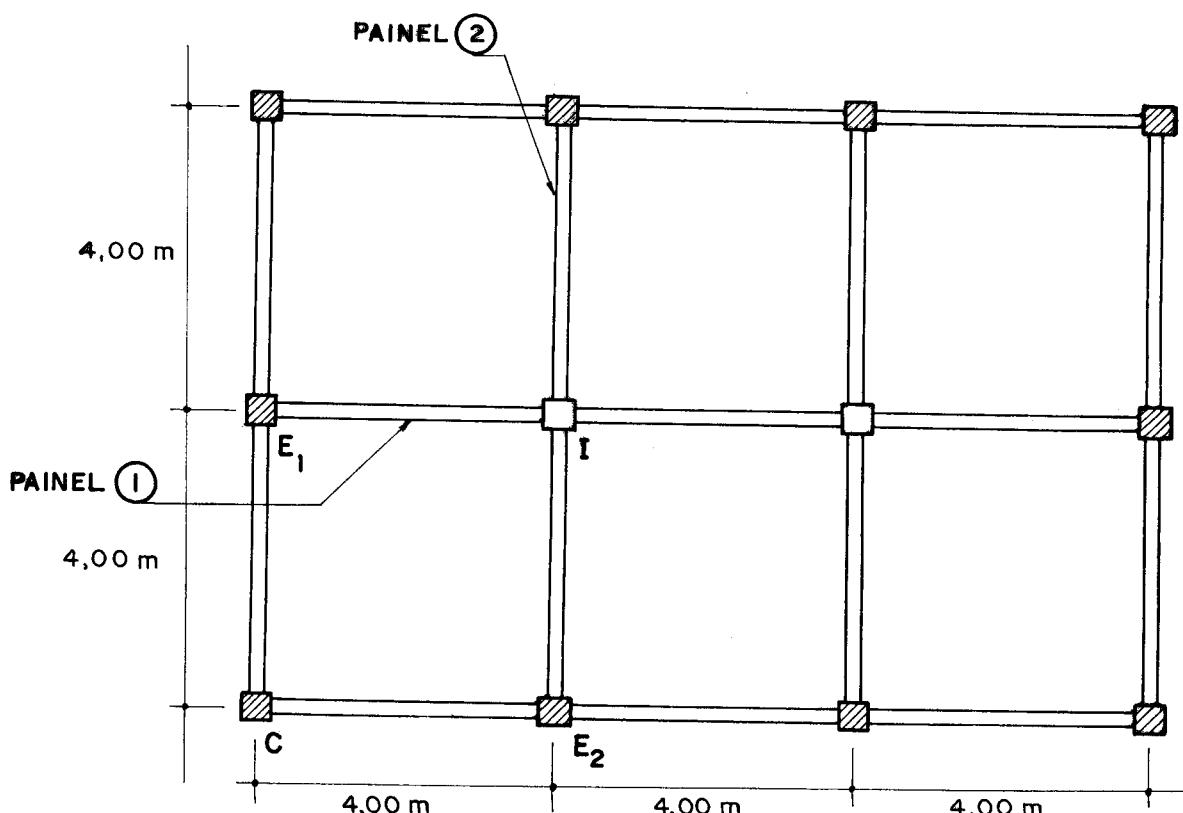
Tanto o estudo dos painéis ① e ② (supostos isolados) como o estudo tridimensional do edifício, constituem problemas de estruturas simétricas com carregamentos verticais simétricos. Resulta, então, que os nós dos pórticos nas análises planas e os nós dos painéis na análise tridimensional não so-

frem deslocamentos horizontais. Na análise tridimensional, por conseguinte, os painéis não trocam forças horizontais com as lajes. Em qualquer destas análises, portanto, o estado final da estrutura fica perfeitamente caracterizado apenas pelos deslocamentos verticais dos nós.

Os deslocamentos verticais dos nós encontrados para as prumadas de pilares I, E₁, E₂ e C, nas análises planas e na análise tridimensional, estão listados na tabela IV-1. As forças normais encontradas para os pilares estão mostradas na tabela IV-2. Finalmente, as distorções nos quadros divisórios estão arroladas na tabela IV-3.

As distorções nos quadros divisórios situados entre duas prumadas de pilares vizinhas podem ser calculadas, aproximadamente, em função dos deslocamentos verticais dos nós das referidas prumadas de pilares, pois no caso presente são nulos os deslocamentos horizontais dos nós. Seja, por exemplo, o caso dos quadros divisórios situados entre as prumadas de pilares E₁ e I. A distorção γ_j no andar genérico j, vale:

$$\gamma_j = \frac{(D_{E_1j}) - (D_{Ij})}{\ell_{E_1I}} \dots \dots \dots \quad (4.1)$$



- TODOS OS PILARES COM SECÇÃO DE 30cm x 30cm
- TODAS AS VIGAS COM SECÇÃO DE 12cm x 40cm

FIG. 4.1 - PLANTA DA ESTRUTURA DE UM EDIFÍCIO DE 10 ANDARES

TABELA IV - 1

Andar	COLUNA I			COLUNA E ₂			COLUNA E ₁			COLUNA C		
	Painel ② isolado	Painel ① Tridimensional	Painel ② isolado	Painel ① Tridimensional	Painel ② isolado	Painel ① Tridimensional	Painel ② isolado	Painel ① Tridimensional	Painel ② isolado	Painel ① Tridimensional	Painel ② isolado	
10º	0.1587	0.0779	0.2103	0.8206	—	0.8341	—	0.8222	0.8427	0.9000	0.9000	
9º	0.1549	0.0762	0.2052	0.7325	—	0.7458	—	0.7338	0.7539	0.8100	0.8100	
8º	0.1470	0.0725	0.1951	0.6465	—	0.6591	—	0.6475	0.6670	0.7200	0.7200	
7º	0.1358	0.0670	0.1802	0.5621	—	0.5738	—	0.5630	0.5813	0.6300	0.6300	
6º	0.1216	0.0602	0.1614	0.4792	—	0.4897	—	0.4798	0.4965	0.5400	0.5400	
5º	0.1050	0.0521	0.1394	0.3975	—	0.4066	—	0.3979	0.4126	0.4500	0.4500	
4º	0.0863	0.0429	0.1146	0.3168	—	0.3244	—	0.3167	0.3294	0.3600	0.3600	
3º	0.0661	0.0329	0.0878	0.2369	—	0.2427	—	0.2371	0.2466	0.2700	0.2700	
2º	0.0447	0.0223	0.0594	0.1576	—	0.1616	—	0.1578	0.1642	0.1800	0.1800	
1º	0.0225	0.0112	0.0299	0.0787	—	0.0807	—	0.0788	0.0820	0.0900	0.0900	

TABELA IV - 2

Andar	COLUNA I		COLUNA E ₂		COLUNA E ₁		COLUNA C	
	Painel ② isolado	Painel ① Tridimensional isolado	Painel ② isolado	Painel ① Tridimensional isolado	Painel ② isolado	Painel ① Tridimensional isolado	Painel C-E ₁	Painel C-E ₂
1º	1.131	0,497	1.530	-0.566	—	-0.510	-0.497	-0.360
9º	2.357	1.107	3.030	-1.179	—	-0.990	-1.107	-0.930
8º	3.378	1.621	4.470	-1.689	—	-1.410	-1.621	-1.290
7º	4.255	2.067	5.640	-2.128	—	-1.770	-2.067	-1.560
6º	4.990	2.441	6.600	-2.495	—	-2.070	-2.441	-1.830
5º	5.592	2.762	7.740	-2.796	—	-2.340	-2.762	-2.040
4º	6.066	3.001	8.040	-3.033	—	-2.490	-3.001	-2.160
3º	6.417	3.184	8.520	-3.208	—	-2.670	-3.184	-2.280
2º	6.649	3.306	8.850	-3.324	—	-2.730	-3.306	-2.340
1º	6.765	3.367	8.970	-3.382	—	-2.790	-3.367	-2.400

TABELA IV - 3

DISTORÇÕES NOS QUADROS DIVISÓRIOS					
Andar	QUADRO DIVISÓRIO E ₂ -I		QUADRO DIVISÓRIO E ₁ -I		Q. DIVISÓRIO E ₂ -C Q. DIVISÓRIO E ₁ -C
	Painel ② isolado	Tridimensional	Painel ① isolado	Tridimensional	
10º	1.655 10 ⁻³	1.559 10 ⁻³	1.861 10 ⁻³	1.581 10 ⁻³	0.131 10 ⁻³
9º	1.444 10 ⁻³	1.351 10 ⁻³	1.644 10 ⁻³	1.372 10 ⁻³	0.128 10 ⁻³
8º	1.249 10 ⁻³	1.160 10 ⁻³	1.438 10 ⁻³	1.180 10 ⁻³	0.120 10 ⁻³
7º	1.066 10 ⁻³	0.984 10 ⁻³	1.240 10 ⁻³	1.003 10 ⁻³	0.112 10 ⁻³
6º	0.894 10 ⁻³	0.821 10 ⁻³	1.049 10 ⁻³	0.838 10 ⁻³	0.100 10 ⁻³
5º	0.731 10 ⁻³	0.668 10 ⁻³	0.865 10 ⁻³	0.683 10 ⁻³	0.086 10 ⁻³
4º	0.576 10 ⁻³	0.524 10 ⁻³	0.685 10 ⁻³	0.537 10 ⁻³	0.070 10 ⁻³
3º	0.427 10 ⁻³	0.387 10 ⁻³	0.511 10 ⁻³	0.397 10 ⁻³	0.054 10 ⁻³
2º	0.282 10 ⁻³	0.256 10 ⁻³	0.339 10 ⁻³	0.291 10 ⁻³	0.046 10 ⁻³
1º	0.141 10 ⁻³	0.127 10 ⁻³	0.169 10 ⁻³	0.130 10 ⁻³	0.018 10 ⁻³
					0.015 10 ⁻³

onde $(D_{E_1})_j$ e $(D_I)_j$ são os deslocamentos verticais dos nós do andar j , correspondentes, respectivamente, às prumadas de pilares E_1 e I ; sendo ℓ_{E_1I} o vão das vigas que unem estas prumadas de pilares.

Os resultados das tabelas IV-1, IV-2 e IV-3 foram colocados nos gráficos das figuras 4.2. até 4.13. Nestas figuras as curvas tracejadas referem-se ao cálculo segundo o painel ① isolado, as curvas em traço e ponto referem-se ao painel ② isolado e as curvas em traço contínuo correspondem à análise tridimensional. Quando necessário, uma curva pontilhada é usada para representar os valores devidos unicamente às variações de temperatura (valores correspondentes à ação das variações de temperatura na coluna isolada).

Considere-se primeiramente a coluna I da figura 4.1. As figuras 4.2 e 4.3 devem ser estudadas conjuntamente, pois referem-se aos deslocamentos verticais e forças normais na mesma coluna I. Deve-se notar que os deslocamentos verticais (positivos quando para cima) obtidos na análise tridimensional são poucos menores que as somas dos deslocamentos verticais obtidos nas análises planas. Este fato era, de certa forma, de se esperar. Para argumentar, considere-se as duas situações extremas:

- a - Edifício (fig. 4.1) com vigas de rigidez nula.
- b - Edifício (fig. 4.1) com vigas de rigidez infinita.

No caso a) os deslocamentos verticais dos nós da coluna I são nulos, quer se considere o painel ① isolado ou o painel ② isolado, ou mesmo o sistema tridimensional. No caso b) os deslocamentos verticais da coluna I podem ser determinados fazendo uma analogia do problema em questão com o problema de um estaqueamento, considerando o caso de estacas engastadas, onde o bloco rígido corresponde à grelha constituída por vigas de rigidez infinita e as estacas aos pilares. Do mesmo modo que na estrutura do edifício do exemplo em questão, aqui também a solicitação é constituída de cargas verticais, para cima, aplicadas nos nós da periferia do topo do edifício. Resulta, deste modo, que os deslocamentos verticais dos nós da coluna I na análise segundo os painéis ② e ① isolados e na análise tridimensional são proporcionais, respectivamente, aos valores $2/3$, $2/4$ e $10/12$. Tem-se, imediatamente, que $2/3 + 2/4 > 10/12$ e, portanto, é válido aqui o fato mencionado: "para a coluna I, as somas dos deslocamentos verticais obtidos nas análises planas são pouco maiores que os da análise tridimensional".

As forças normais encontradas nos pilares da coluna I (figura 4.3) correspondentes à análise tridimensional são também

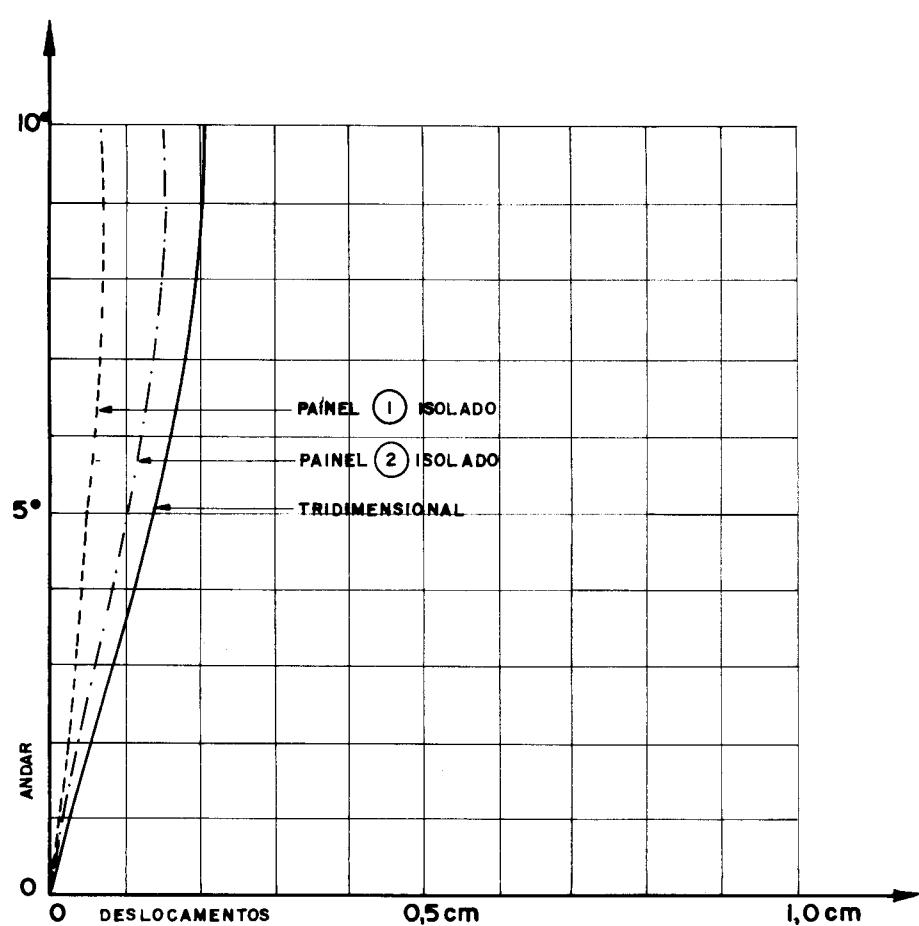


FIG. 4.2 - DESLOCAMENTOS VERTICIAIS NA COLUNA I

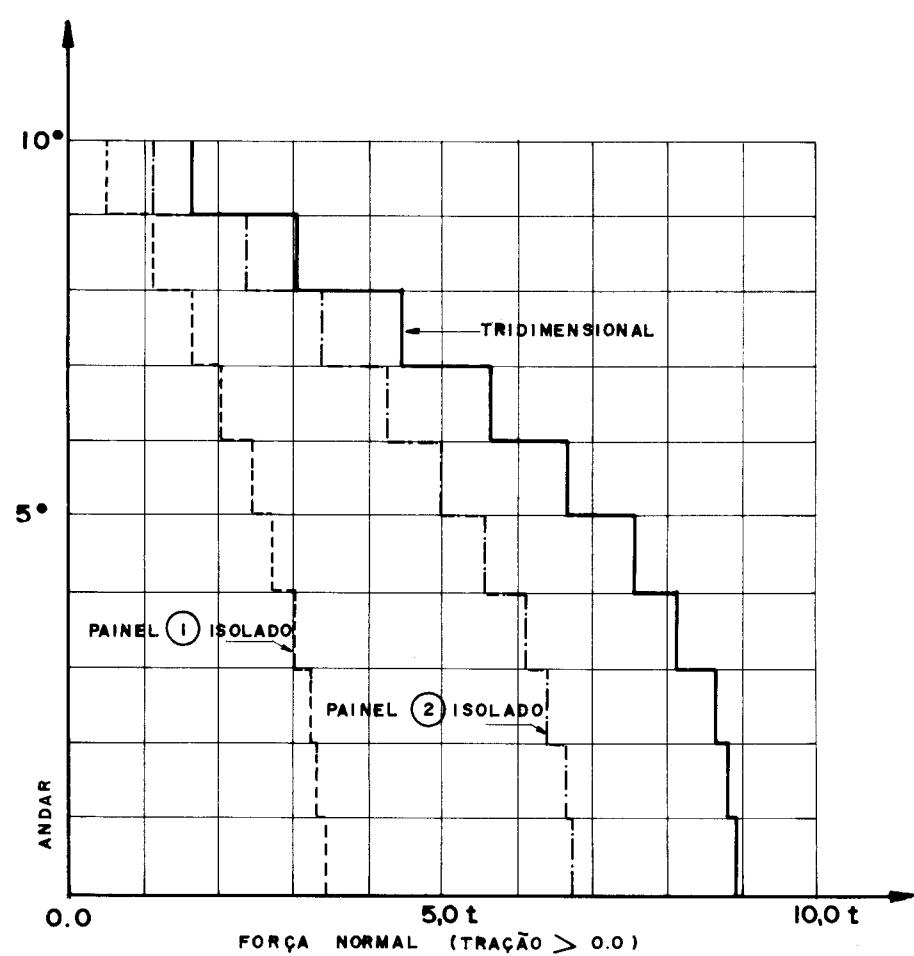


FIG. 4.3 - FORÇAS NORMAIS NA COLUNA I

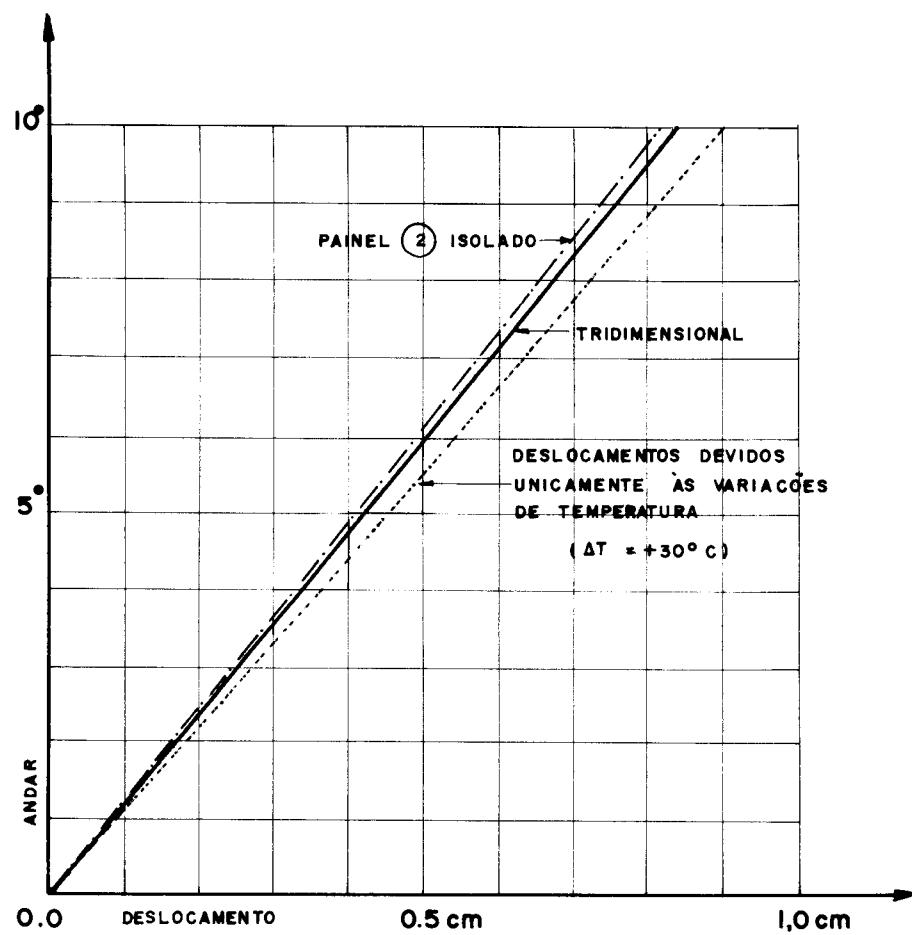


FIG. 4.4 - DESLOCAMENTOS VERTICIAIS NA COLUNA E_2

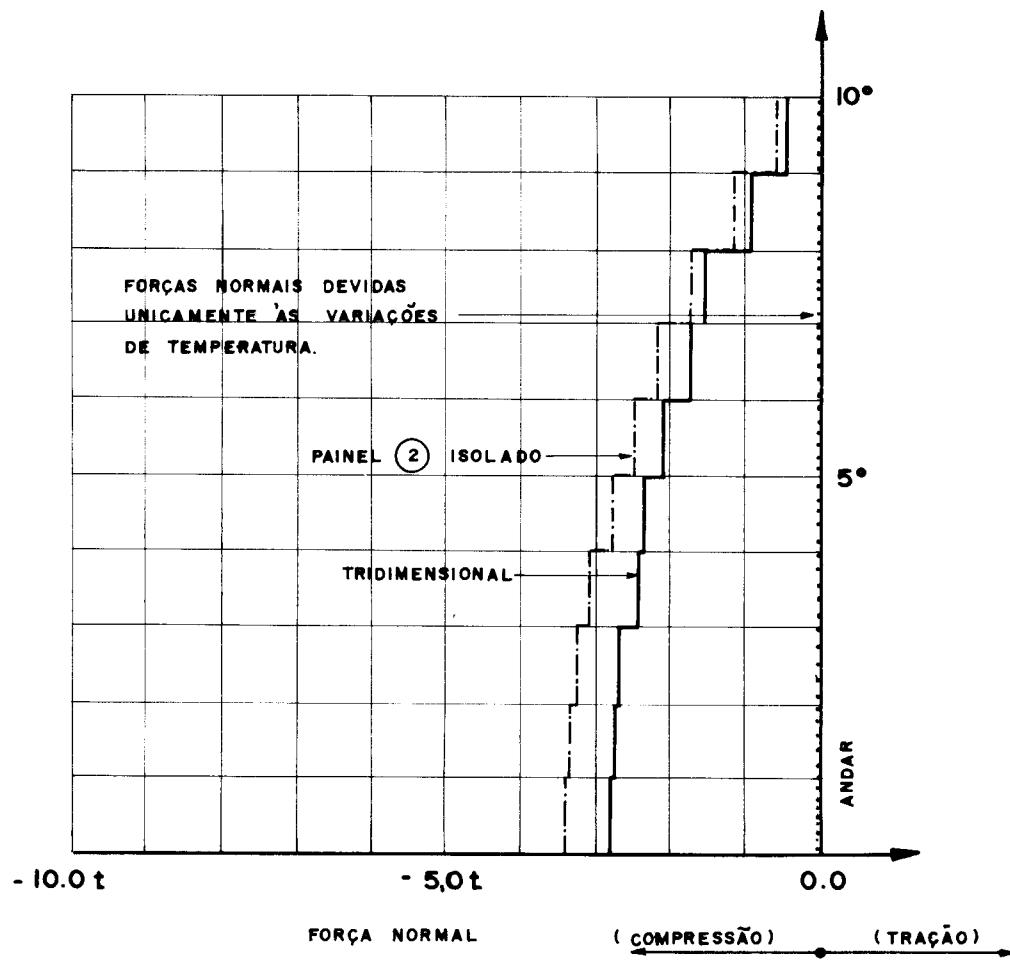


FIG. 4.5 - FORÇAS NORMAIS NA COLUNA E_2

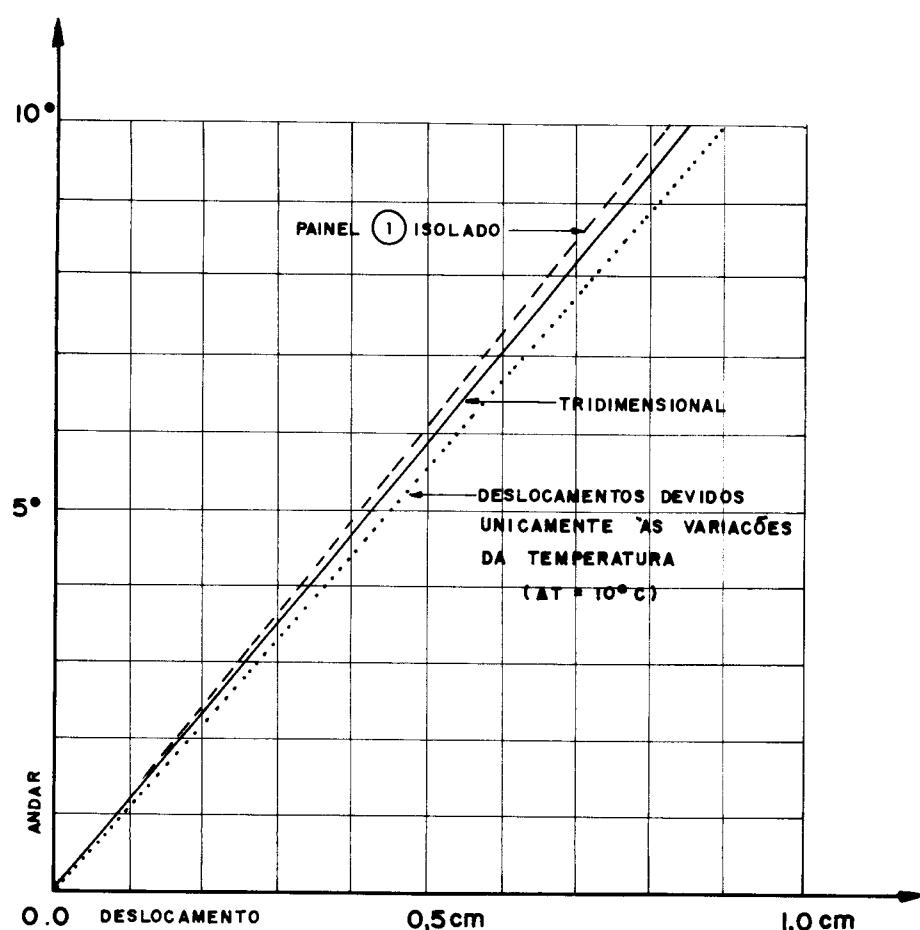


FIG. 4.6 - DESLOCAMENTOS VERTICAIS NA COLUNA E_1

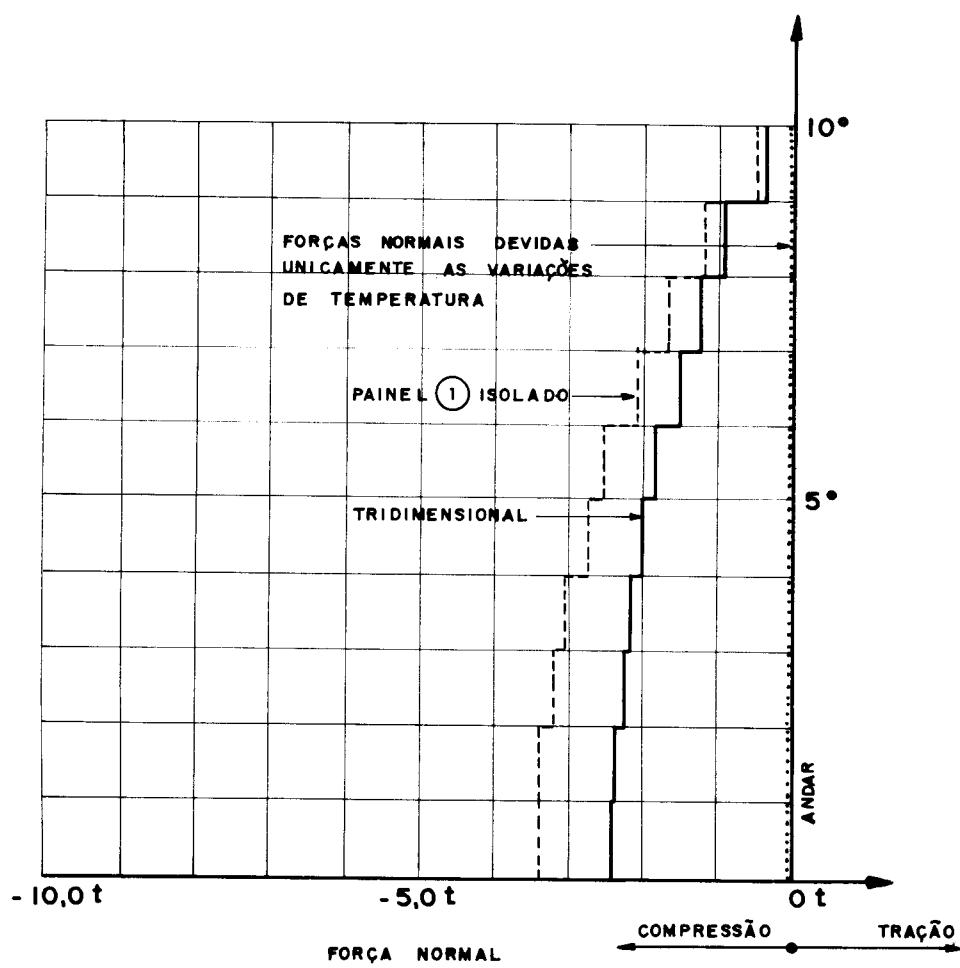


FIG. 4.7 - FORCAS NORMAIS NA COLUNA E_1

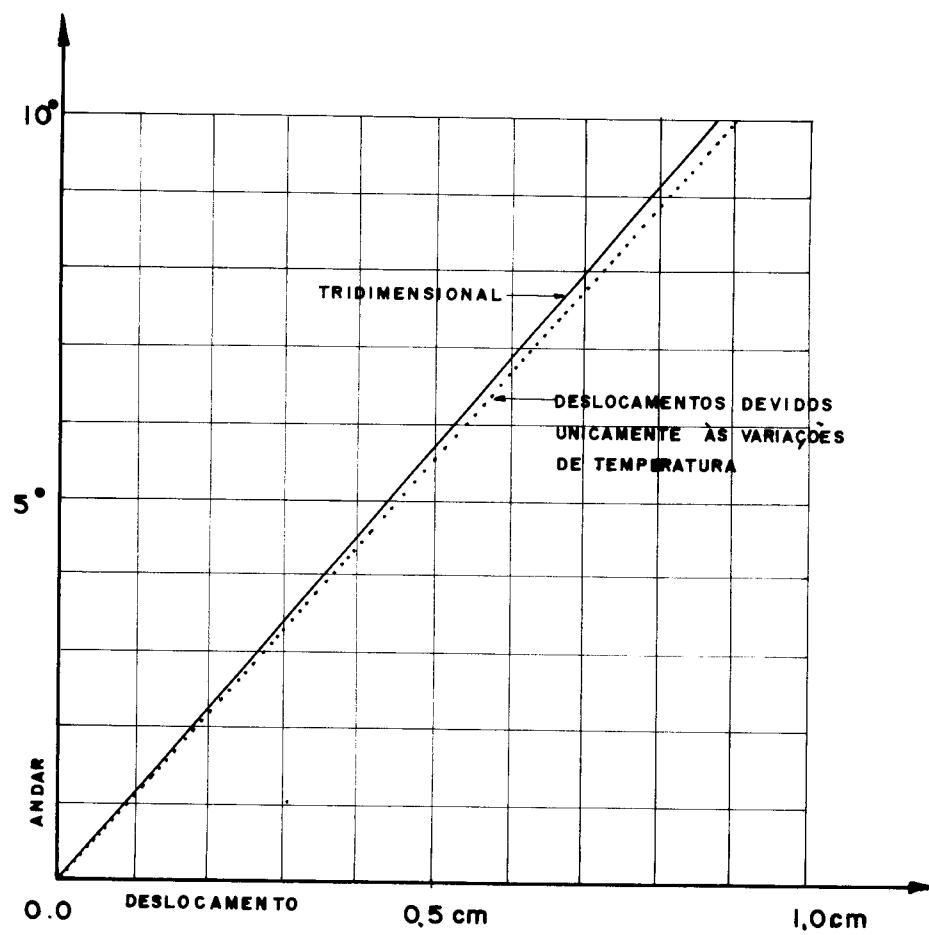


FIG. 4.8 - DESLOCAMENTOS VERTICAIS NA COLUNA C

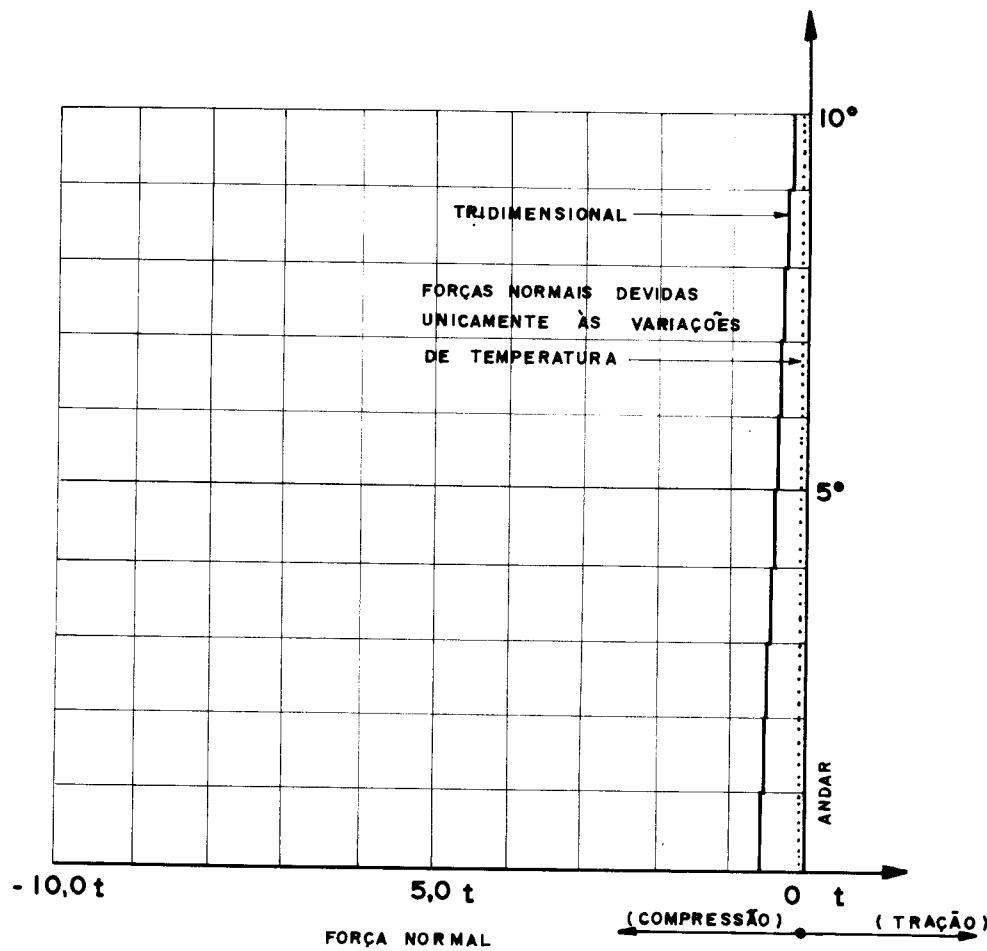


FIG. 4.9 - FORÇAS NORMAIS NA COLUNA C

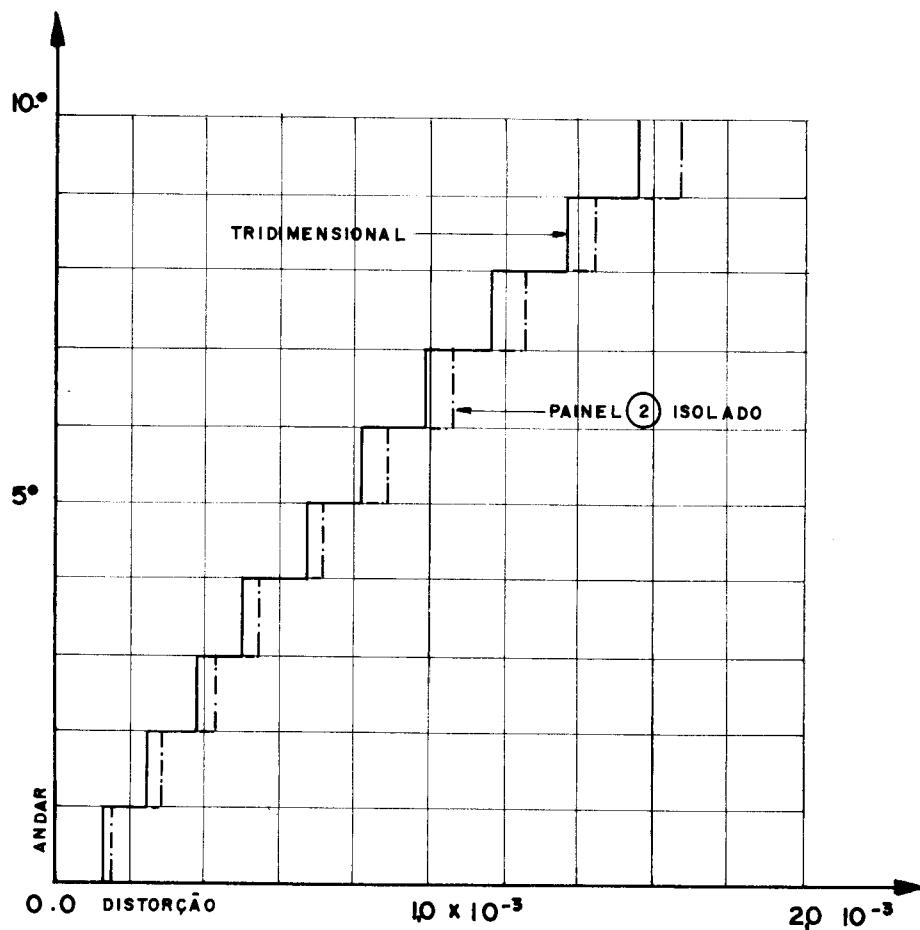


FIG. 4.10 - DISTORÇÕES NO QUADRO DIVISÓRIO E₂ - I

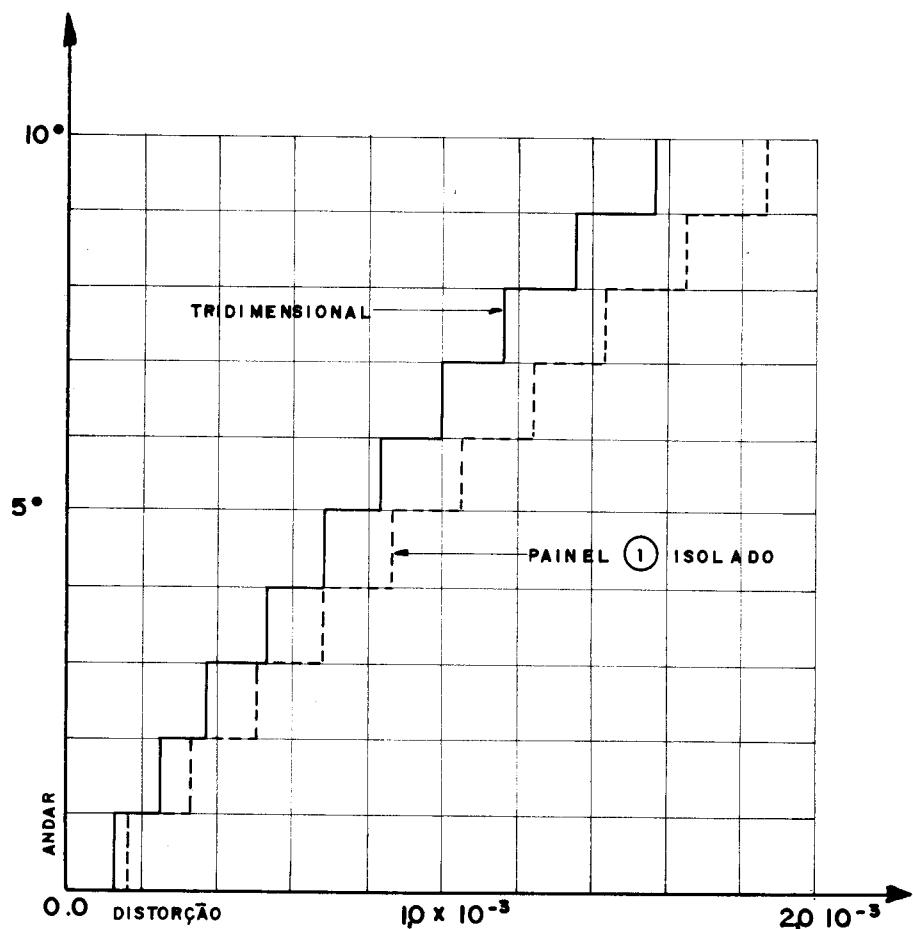


FIG. 4.11 - DISTORÇÕES NO QUADRO DIVISÓRIO E₁ - I

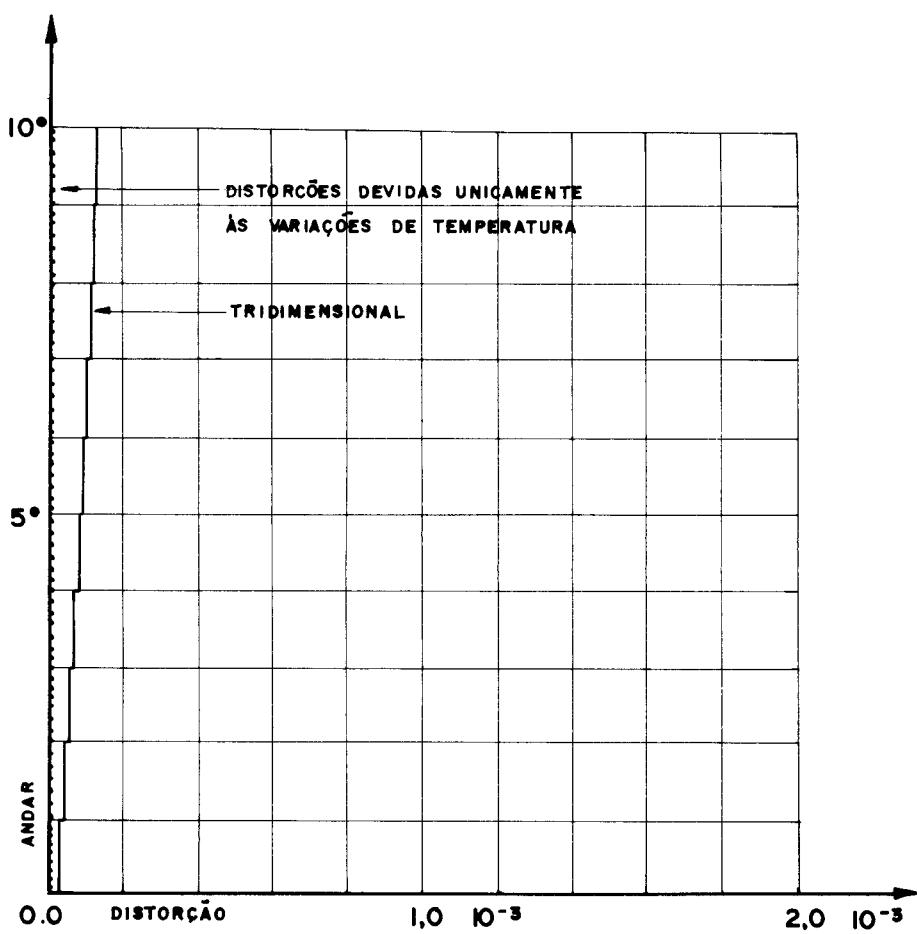


FIG. 4.12 - DISTORÇÕES NO QUADRO DIVISÓRIO $E_2 - C$

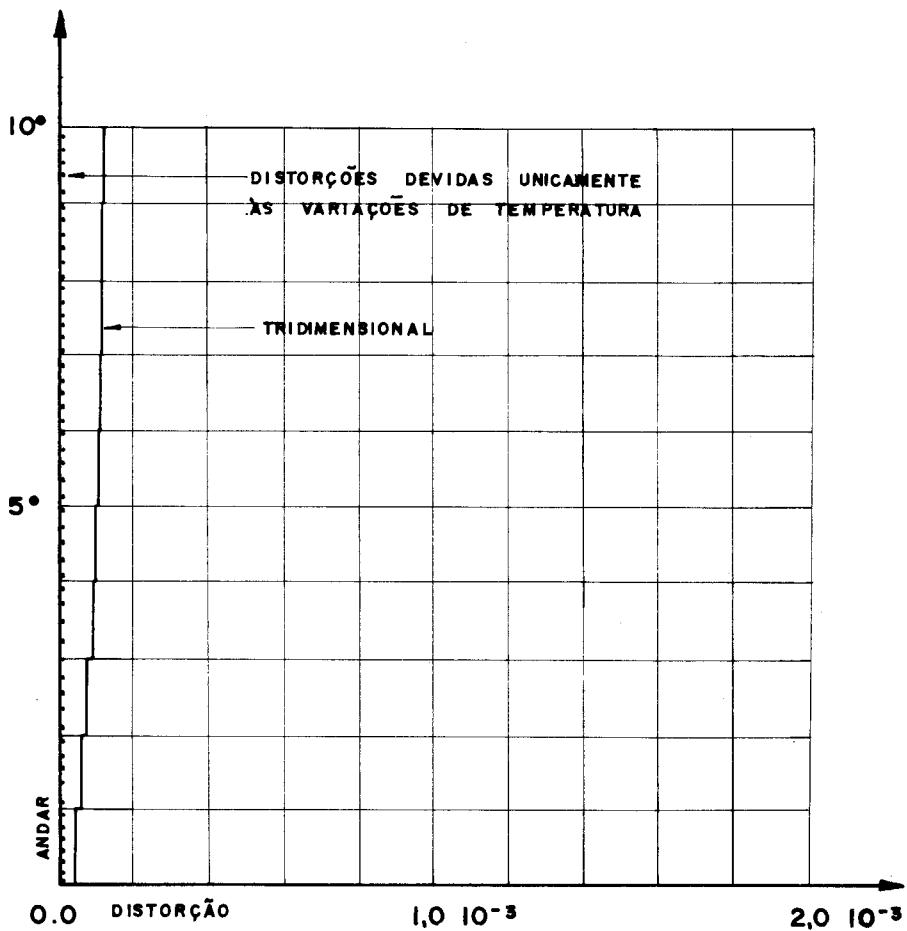


FIG. 4.13 - DISTORÇÕES NO QUADRO DIVISÓRIO $E_1 - C$

pouco menores que as somas dos valores encontrados nas análises planas. Estas forças normais são proporcionais às inclinações das tangentes às curvas da figura 4.2 e estão, portanto, relacionadas com os deslocamentos verticais dos nós; daí também a razão deste fato constatado.

Considere-se agora a coluna E_2 (fig. 4.1). Os resultados para esta coluna encontram-se nas figuras 4.4 e 4.5. Ao contrário do que sucede na coluna I, aqui os pilares desta coluna, onde se dá o aumento de temperatura ΔT , estão submetidos à forças normais de compressão (fig. 4.5). Observe-se que no problema com deslocamentos impedidos as forças normais, de compressão, em todos os pilares da coluna E_2 valem 27.0 t. Note-se também, que a liberação dos deslocamentos (o que equivale a submeter os nós às forças de engastamento perfeito invertidas) alivia enormemente os primeiros esforços (fig. 4.5). Convém observar que para a coluna E_2 a única análise plana envolvendo esta coluna que tem sentido de ser realizada é segundo o painel ②, pois a outra análise, segundo o painel que contém as colunas C e E_2 (painel periférico), leva a resultados óbvios (forças normais nulas e deslocamentos verticais devidos unicamente às variações de temperatura). Vê-se na figura 4.4, que os deslocamentos verticais encontrados na análise tridimensional são ligeiramente maiores que os encontrados na análise plana. Estes resultados podem também ser explicados considerando as situações extremas: vigas de rigidez nula e vigas de rigidez infinita. Naturalmente, tanto na análise plana (painel ②) como na análise tridimensional, os deslocamentos dos nós da coluna E_2 são menores que os devidos unicamente às variações de temperatura. Na figura 4.5 vê-se também que as forças normais, de compressão, nos pilares da coluna E_2 são maiores em módulo na análise plana. Contudo, algebraicamente continuam também para a coluna E_2 sendo maiores os esforços normais na análise tridimensional.

Para a coluna E_1 os deslocamentos verticais e as forças normais encontrados estão lançados nos gráficos das figuras 4.6 e 4.7, respectivamente. Como trata-se também de coluna situada periferia, estes resultados são, de certa forma, semelhantes aos encontrados para a coluna E_2 , valendo, portanto, os mesmos comentários.

Considere-se agora a coluna de canto C. A análise de um dos painéis periféricos contendo a coluna C, ou então, a análise do conjunto dos dois painéis periféricos concorrentes em C é imediata, levando a deslocamentos devidos unicamente às variações de temperatura e forças normais nulas nesta mesma coluna. Na análise

tridimensional, devido a vinculação desta coluna com as colunas internas realizadas pelas vigas, os deslocamentos verticais dos nós desta coluna resultam, obviamente, menores que nas análises planas. Contudo, vê-se na figura 4.8 que nas análises referidas os deslocamentos verticais dos nós da coluna de canto C resultam muito próximos. As forças normais (fig. 4.9) nesta coluna são pequenas comparadas às que aparecem nas outras colunas.

As distorções nos quadros divisórios situados entre as colunas E₂ e I (quadros divisórios E₂-I) estão mostradas na figura 4.10. Observe-se que as distorções encontradas na análise plana do painel ②, que contém este quadro divisório E₂-I, são maiores que as encontradas na análise tridimensional. Estas distorções são obtidas pela expressão 4.1 e, com isto, este fato constatado pode ser justificado como consequência dos resultados já anteriormente discutidos (deslocamentos verticais das colunas E₂ e I). Verifica-se pelo exame desta figura 4.10 que a interação entre os painéis, considerada na análise tridimensional, tende a diminuir as distorções neste exemplo (note-se que são nulos os deslocamentos horizontais).

As distorções nos quadros divisórios situados entre as colunas E₁ e I (quadros divisórios E₁-I) estão lançadas nos gráficos da figura 4.11. O comportamento deste quadro divisório, relativamente às distorções, é análogo ao do quadro divisório E₂-I.

Finalmente, exibem-se nas figuras 4.12 e 4.13 as distorções encontradas na análise tridimensional para os quadros divisórios E₂-C e E₁-C, respectivamente. As análises planas destes painéis periféricos isolados levariam a distorções nulas, contudo, na análise tridimensional as distorções existem, mas são relativamente pequenas, quando comparadas às que ocorrem nos outros quadros.

Em resumo, as constatações observadas neste exemplo são:

1º) Para a coluna I

- a) - Deslocamentos verticais obtidos na análise tridimensional bem maiores que os obtidos nas análises planas dos painéis ① e ② (figura 4.2).
- b) - Deslocamentos verticais obtidos na análise tridimensional pouco menores que as somas dos obtidos nas análises planas dos painéis ① e ② (figura 4.2)
- c) - Forças normais obtidas na análise tridimensional bem maiores que as obtidas nas análises planas dos painéis ① e ② (fi-

gura 4.3).

- d) - Forças normais obtidas na análise tridimensional pouco menores que as somas das obtidas nas análises planas dos painéis ① e ② (figura 4.3).

2º Para a coluna E₂

- e) - Deslocamentos verticais obtidos na análise tridimensional pouco maiores que os obtidos na análise plana do painel ② (figura 4.4).
- f) - Forças normais obtidas na análise tridimensional pouco maiores, algebricamente, que as obtidas na análise plana do painel ② (figura 4.5).

3º Para a coluna E₁

- g) - Deslocamentos verticais obtidos na análise tridimensional pouco maiores que os obtidos na análise plana do painel ① (figura 4.6).
- h) - Forças normais obtidas na análise tridimensional pouco maiores, algebricamente, que as obtidas na análise plana do painel ① (figura 4.7).

4º Para a coluna C

- i) - Deslocamentos verticais obtidos na análise tridimensional pouco menores que os devidos unicamente às variações de temperatura (ou obtidos nas análises planas dos painéis periféricos aí concorrentes - figura 4.8).
- j) - Forças normais obtidas na análise tridimensional pouco menores, algebricamente, que as devidas unicamente às variações de temperatura (ou obtidas nas análises planas dos painéis periféricos aí concorrentes - figura 4.9).

5º Para as distorções nos quadros divisórios

- k) - Distorções no quadro divisório E₂-I obtidas na análise tridimensional pouco menores que as obtidas na análise plana do painel ② (figura 4.10).
- l) - Distorções no quadro divisório E₁-I obtidas na análise tridimensional pouco menores que as obtidas na análise plana do

painel ① (figura 4.11).

- m) - Distorções nos quadros divisórios E_1-C e E_2-C obtidas na análise tridimensional pouco maiores que as devidas unicamente às variações de temperatura (ou obtidas nas análises planas dos painéis periféricos correspondentes - figura 4.12 e 4.13, respectivamente).

Observe-se, contudo, que os deslocamentos horizontais, tanto na análise tridimensional como nas análises planas, são nulos.

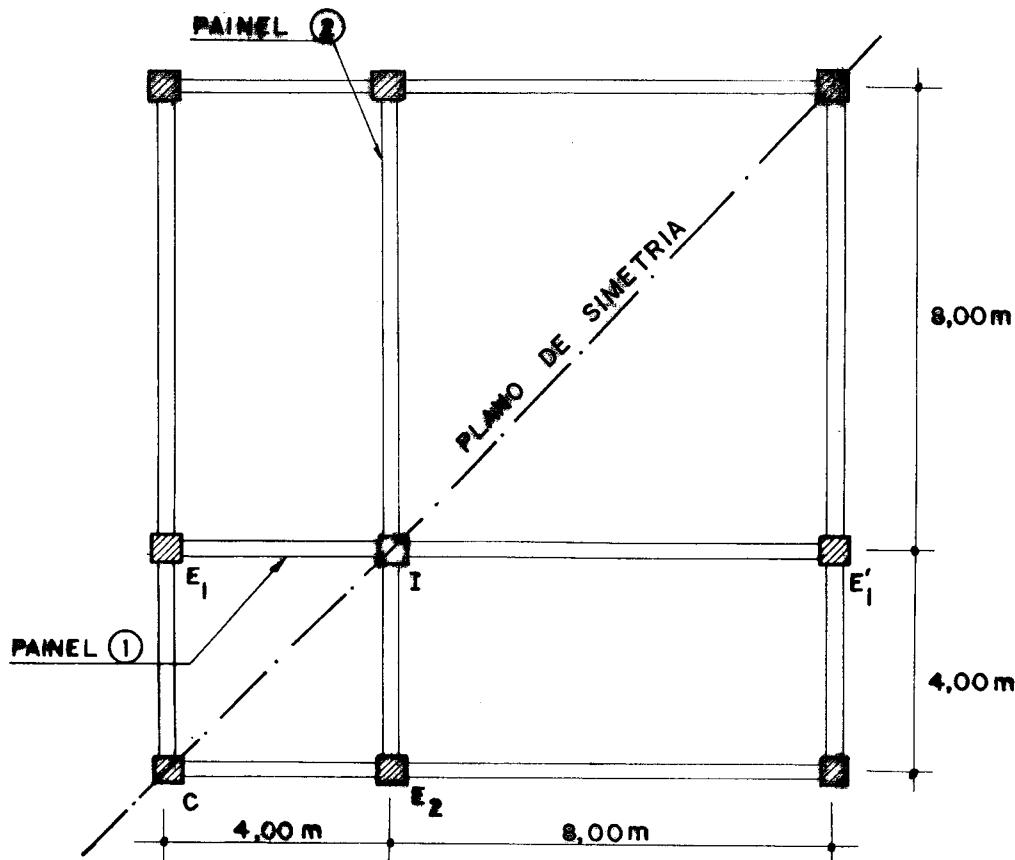
4.3 - SEGUNDO EXEMPLO

A estrutura deste exemplo é também composta de 10 andares idênticos, igualmente espaçados entre si por pés direito de 3.0 m. A planta do andar tipo está mostrada na figura 4.14. Os pilares em todos os andares possuem seção de 30 cm x 30 cm. As vigas repetem-se identicamente em todos os andares com seção 12 cm x 40 cm. Adota-se o módulo de elasticidade $E = 100 \text{ t/cm}^2$ em todas as vigas e pilares. Para coeficiente de dilatação térmica adota-se $\alpha = 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$.

Como no exemplo anterior, supõe-se que a causa de solicitação da estrutura proveniente das variações de temperatura seja um acréscimo de temperatura $\Delta T = 30^\circ\text{C}$ nas colunas expostas (colunas periféricas hachuradas na figura 4.14). Admite-se, deste modo, que a exposição destas colunas é total.

A estrutura e a solicitação deste exemplo não apresentam o mesmo grau de simetria que a estrutura e a solicitação do exemplo anterior. Por isto, tanto as análises planas dos painéis isolados como a análise tridimensional do conjunto, além dos deslocamentos verticais dos nós, apresentam também deslocamentos horizontais. Na análise tridimensional os deslocamentos horizontais são, naturalmente, paralelos ao único plano de simetria da estrutura, plano este que contém as colunas C e I (figura 4.14). Assim sendo, na análise tridimensional o estado resultante da estrutura fica caracterizado pelos deslocamentos verticais dos nós e pelas translações horizontais dos difrágmas. Observe-se, contudo, que os difrágmas, também neste exemplo, não sofrem rotações nos seus planos,

Considera-se suficiente para as constatações de maior interesse estudar apenas o comportamento da coluna I (interna), E_2 (externa do painel ②), E_1 (externa do painel ① à esquerda), C



- TODAS AS VIGAS DE SECÇÃO 12 cm x 30 cm
- TODOS OS PILARES DE SECÇÃO 30 cm x 30 cm

FIG.4.14 - PLANTA DO EDIFÍCIO DO SEGUNDO EXEMPLO. O EDIFÍCIO POSSUI 10 ANDARES IDÊNTICOS.

(coluna de canto) e E'_1 (externa do painel (1) a direita). Os painéis (1) e (2) e as colunas referidas estão indicados na figura 4.14.

A tabela IV-4 mostra os deslocamentos verticais dos nós das prumadas de pilares encontrados nas análises planas e na tridimensional. Os deslocamentos horizontais encontrados estão arrolados na tabela IV-5. As forças normais nos pilares estão na tabela IV-6 e as distorções nos quadros divisórios na tabela IV-7. Os resultados das tabelas IV-4 até IV-7 foram lançados nos gráficos das figuras 4.15 até 4.26. Nestas figuras as curvas em traço contínuo correspondem à análise tridimensional e as tracejadas às análises planas.

As distorções nos quadros divisórios do presente exemplo não podem mais ser calculadas através da expressão (4.1), pois os deslocamentos horizontais dos nós afetam consideravelmente estas distorções. Para esta nova situação a expressão da distorção

TABELA IV - 4

DESLOCAMENTOS VERTICIAIS (cm)

DESLOCAMENTOS HORIZONTAIS (cm)

TABELA IV - 5

ANDAR	COLUNA I		COLUNA E ₂ e E ₁		COLUNA E' ₁		COLUNA C	
	Painel ① isolado e Painel ② isolado	Painel ② isolado e Painel ① isolado	Tridimen- sional	Tridimen- sional	Painel ① isolado	Tridimen- sional	Devidos unicam- pas	Tridimen- sional
10°	0.0769	0.1443	0.8486	0.8287	0.8745	0.8699	0.9000	0.8904
9°	0.0750	0.1405	0.7598	0.7401	0.7851	0.7804	0.8100	0.8002
8°	0.0713	0.1326	0.6723	0.6532	0.6964	0.6915	0.7200	0.7104
7°	0.0659	0.1219	0.5859	0.5680	0.6082	0.6033	0.6300	0.6210
6°	0.0591	0.1087	0.5005	0.4843	0.5204	0.5159	0.5400	0.5318
5°	0.0510	0.0936	0.4159	0.4018	0.4331	0.4290	0.4500	0.4429
4°	0.0420	0.0769	0.3319	0.3203	0.3427	0.3427	0.3600	0.3542
3°	0.0322	0.0588	0.2485	0.2396	0.2593	0.2567	0.2700	0.2657
2°	0.0218	0.0399	0.1654	0.1595	0.1728	0.1711	0.1800	0.1771
1°	0.0110	0.0201	0.0826	0.0797	0.0863	0.0855	0.0900	0.0886

ANDAR	Painel ① isolado e Painel ② isolado		Painel ① isolado		Painel ② isolado		Painel ① isolado e Painel ② isolado	
	Tridimen- sional	Tridimen- sional	Tridimen- sional	Tridimen- sional	Tridimen- sional	Tridimen- sional	Tridimen- sional	Tridimen- sional
10°	1.2878	0.4188	9°	1.0431	0.3394	8°	0.8193	0.2662
9°	1.0431	0.3394	8°	0.6234	0.2024	7°	0.6234	0.2024
8°	0.8193	0.2662	7°	0.4554	0.1477	6°	0.4554	0.1477
7°	0.6234	0.2024	6°	0.3146	0.1019	5°	0.3146	0.1019
6°	0.6234	0.2024	5°	0.2005	0.0648	4°	0.2005	0.0648
5°	0.6234	0.2024	4°	0.1123	0.0361	3°	0.1123	0.0361
4°	0.6234	0.2024	3°	0.0495	0.0157	2°	0.0495	0.0157
3°	0.6234	0.2024	2°	0.0123	0.0038	1°	0.0123	0.0038

TABELA IV - 6

FORÇAS NORMAIS (t)

ANDAR	COLUNA I		COLUNA E ₂ e E ₁		COLUNA E ₁		COLUNA C	
	Painel ① isolado e Painel ② isolado	Painel ② isolado e Painel ① isolado	Painel ② isolado e Painel ① isolado	Painel ① isolado	Painel ① isolado	Devidos unicam/ as variaç. de temp.	Devidos unicam/ as variaç. de temp.	
10º	0.547	1.140	-0.367	-0.420	-0.180	-0.150	0.000	-0.060
9º	1.128	2.370	-0.758	-0.930	-0.390	-0.330	0.000	-0.123
8º	1.618	3.210	-1.084	-1.440	-0.540	-0.540	0.000	-0.180
7º	2.045	3.960	-1.369	-1.890	-0.660	-0.780	0.000	-0.240
6º	2.407	4.530	-1.610	-2.250	-0.810	-0.930	0.000	-0.330
5º	2.706	5.010	-1.810	-2.550	-0.900	-1.110	0.000	-0.390
4º	2.945	5.430	-1.968	-2.790	-0.960	-1.200	0.000	-0.450
3º	3.122	5.670	-2.087	-2.970	-1.000	-1.270	0.000	-0.450
2º	3.241	5.940	-2.166	-3.060	-1.050	-1.320	0.000	-0.460
1º	3.253	6.030	-2.300	-3.240	-1.110	-1.350	0.000	-0.460

TABELA IV - 7

DISTORÇÕES NOS QUADROS DIVISÓRIOS

ANDAR	Q. DIVISÓRIO E ₂ -I e E ₁ -I		Q. DIVISÓRIO E ₁ '-I		Q. DIVISÓRIO E ₂ -C e E ₁ -C	
	Painel ② isolado	Painel ① isolado	Painel ① isolado	Painel ② isolado	Tridimen- sional	Tridimen- sional
10º	1.100 10 ⁻³	1.446 10 ⁻³	1.813 10 ⁻³	1.172 10 ⁻³	0.111 10 ⁻³	0.111 10 ⁻³
9º	0.970 10 ⁻³	1.256 10 ⁻³	1.634 10 ⁻³	1.044 10 ⁻³	0.094 10 ⁻³	0.094 10 ⁻³
8º	0.848 10 ⁻³	1.089 10 ⁻³	1.434 10 ⁻³	0.912 10 ⁻³	0.070 10 ⁻³	0.070 10 ⁻³
7º	0.740 10 ⁻³	0.933 10 ⁻³	1.228 10 ⁻³	0.784 10 ⁻³	0.050 10 ⁻³	0.050 10 ⁻³
6º	0.635 10 ⁻³	0.786 10 ⁻³	0.946 10 ⁻³	0.662 10 ⁻³	0.034 10 ⁻³	0.034 10 ⁻³
5º	0.531 10 ⁻³	0.647 10 ⁻³	0.858 10 ⁻³	0.543 10 ⁻³	0.021 10 ⁻³	0.021 10 ⁻³
4º	0.431 10 ⁻³	0.512 10 ⁻³	0.647 10 ⁻³	0.428 10 ⁻³	0.011 10 ⁻³	0.011 10 ⁻³
3º	0.332 10 ⁻³	0.384 10 ⁻³	0.493 10 ⁻³	0.316 10 ⁻³	0.003 10 ⁻³	0.003 10 ⁻³
2º	0.234 10 ⁻³	0.259 10 ⁻³	0.313 10 ⁻³	0.206 10 ⁻³	0.004 10 ⁻³	0.004 10 ⁻³
1º	0.139 10 ⁻³	0.136 10 ⁻³	0.135 10 ⁻³	0.095 10 ⁻³	0.009 10 ⁻³	0.009 10 ⁻³

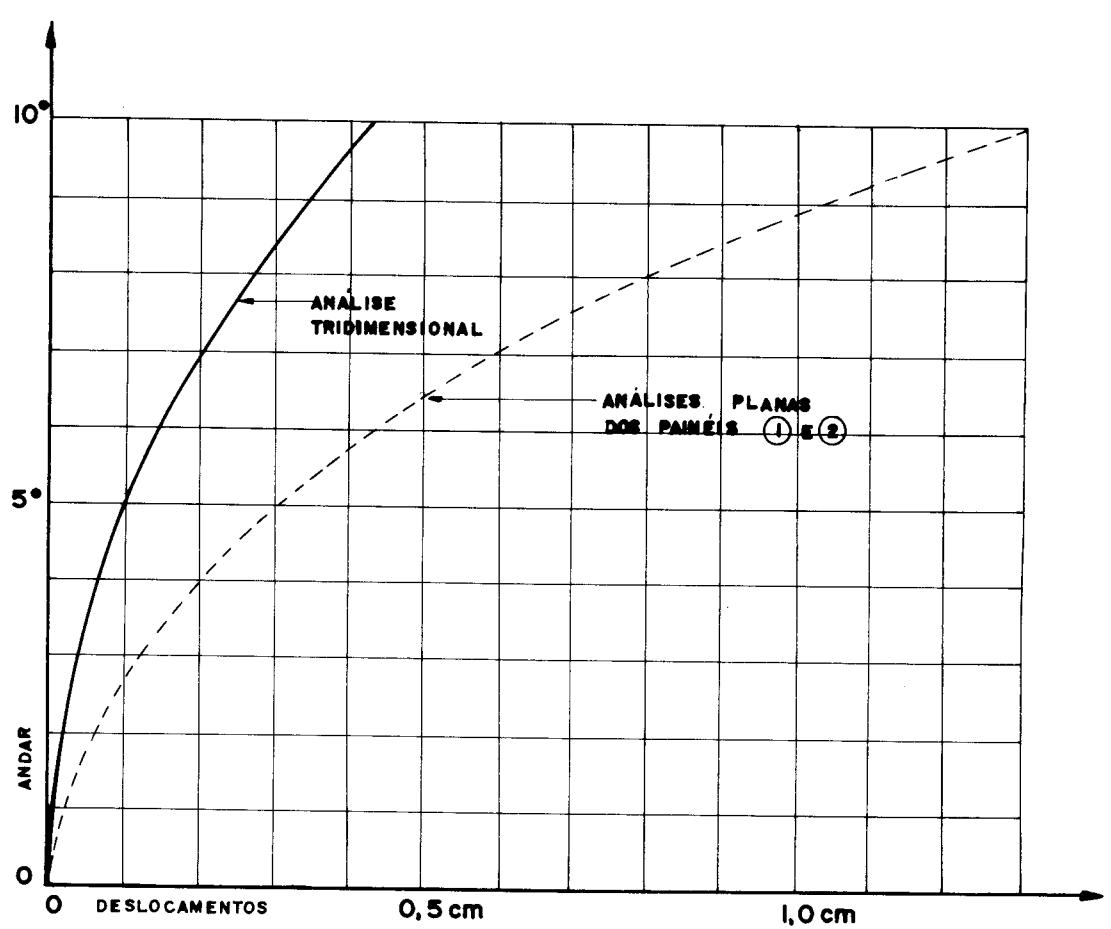


FIG. 4.16 - DESLOCAMENTOS HORIZONTAIS DOS PAINÉIS I E 2

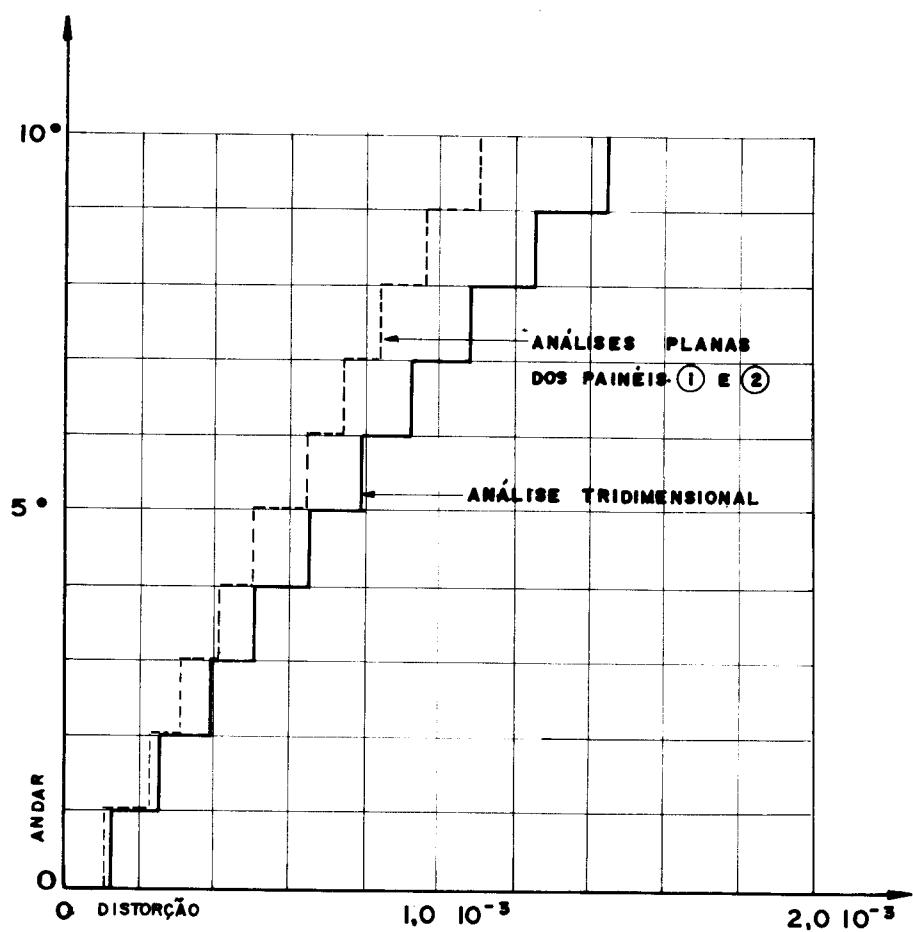


FIG. 4.17 - DISTORÇÃO DOS QUADROS DIVISÓRIOS E₁ - I E E₂ - I

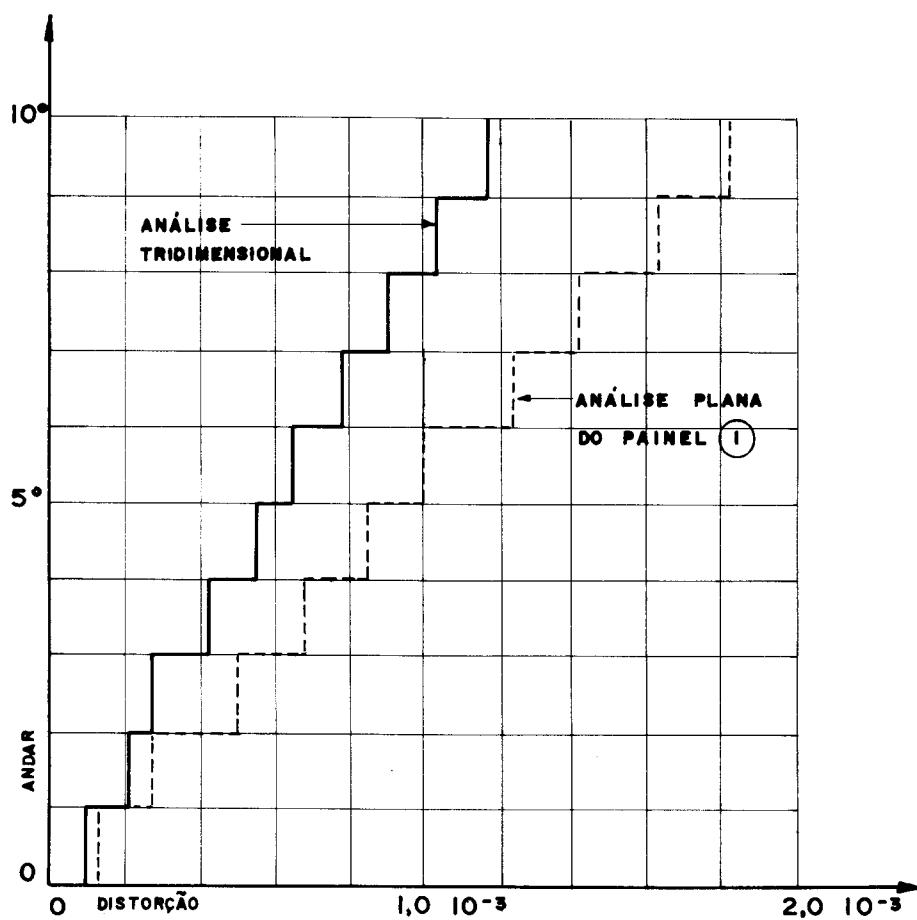


FIG. 4.18 - DISTORÇÃO DO QUADRO DIVISÓRIO E'_I - I

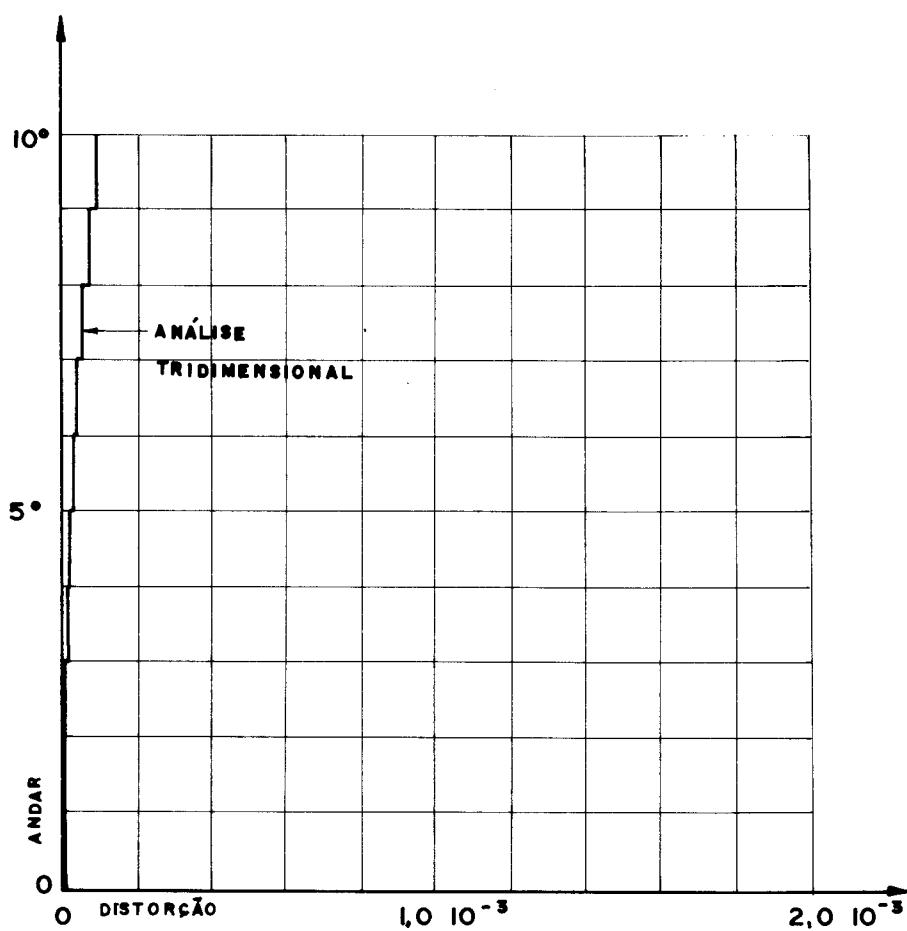


FIG. 4.19 - DISTORÇÃO DOS QUADROS DIVISÓRIOS E_I C E E_{I-C}

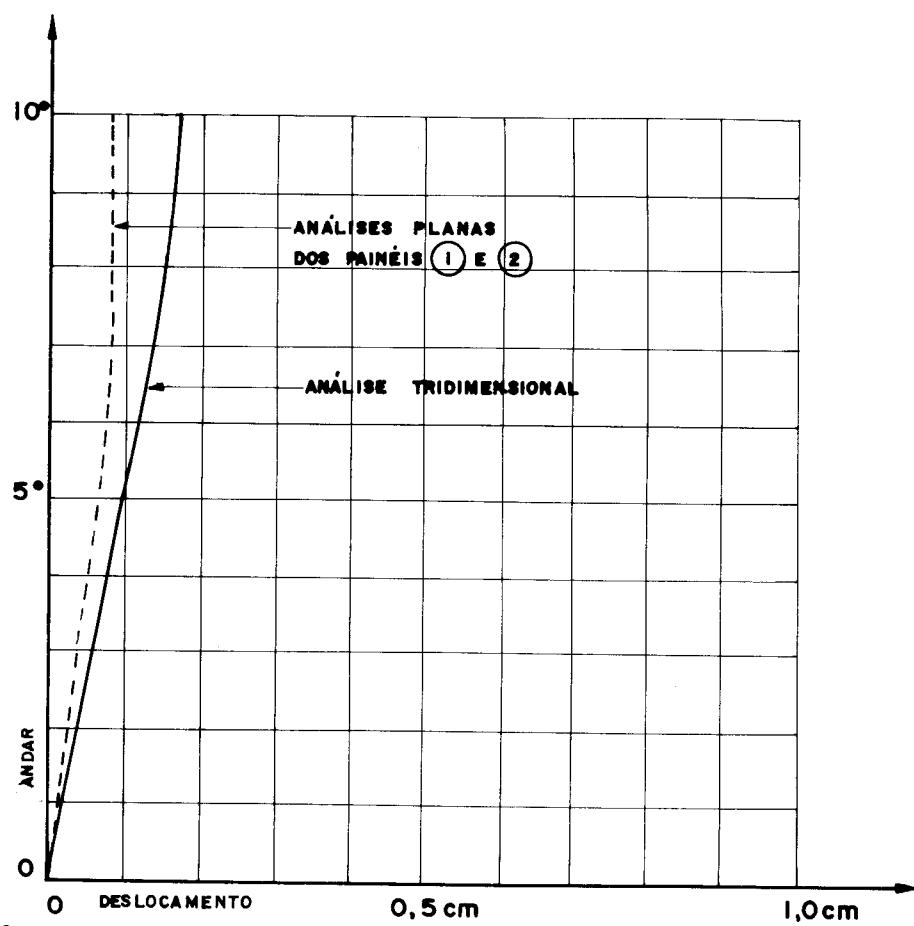


FIG. 4.20 - DESLOCAMENTOS VERTICAIS DA COLUNA I

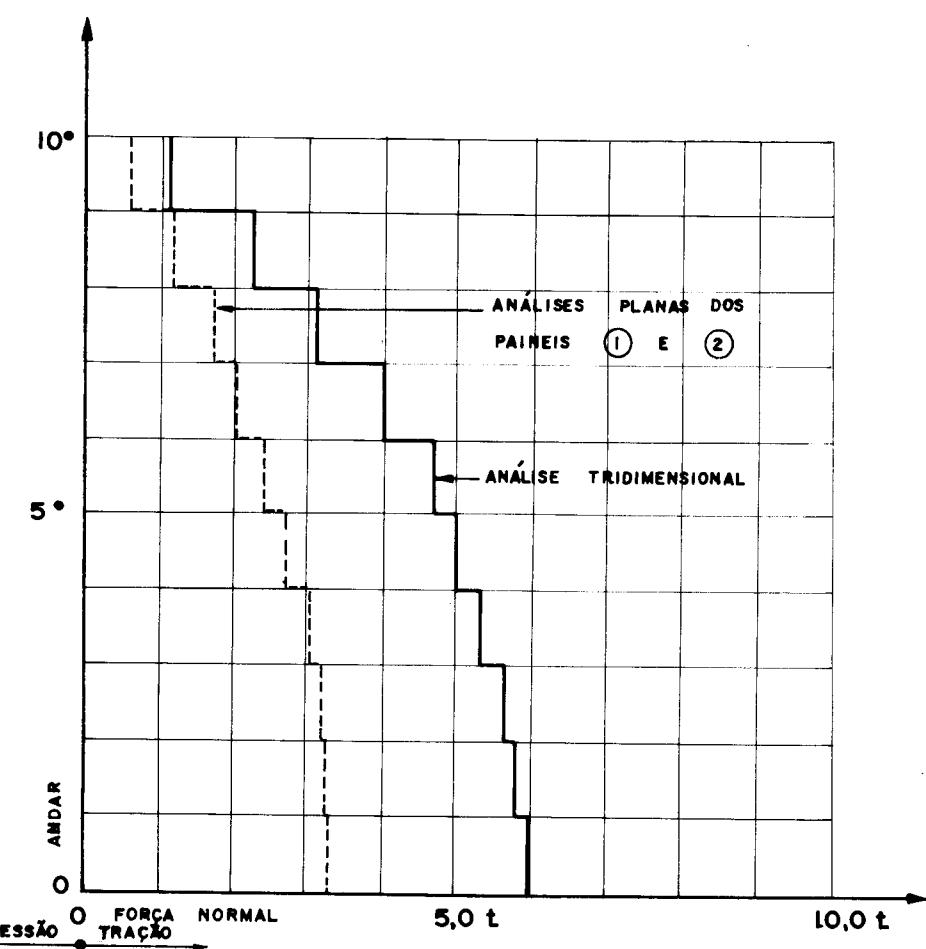


FIG. 4.21 - FORÇAS NORMAIS NA COLUNA I

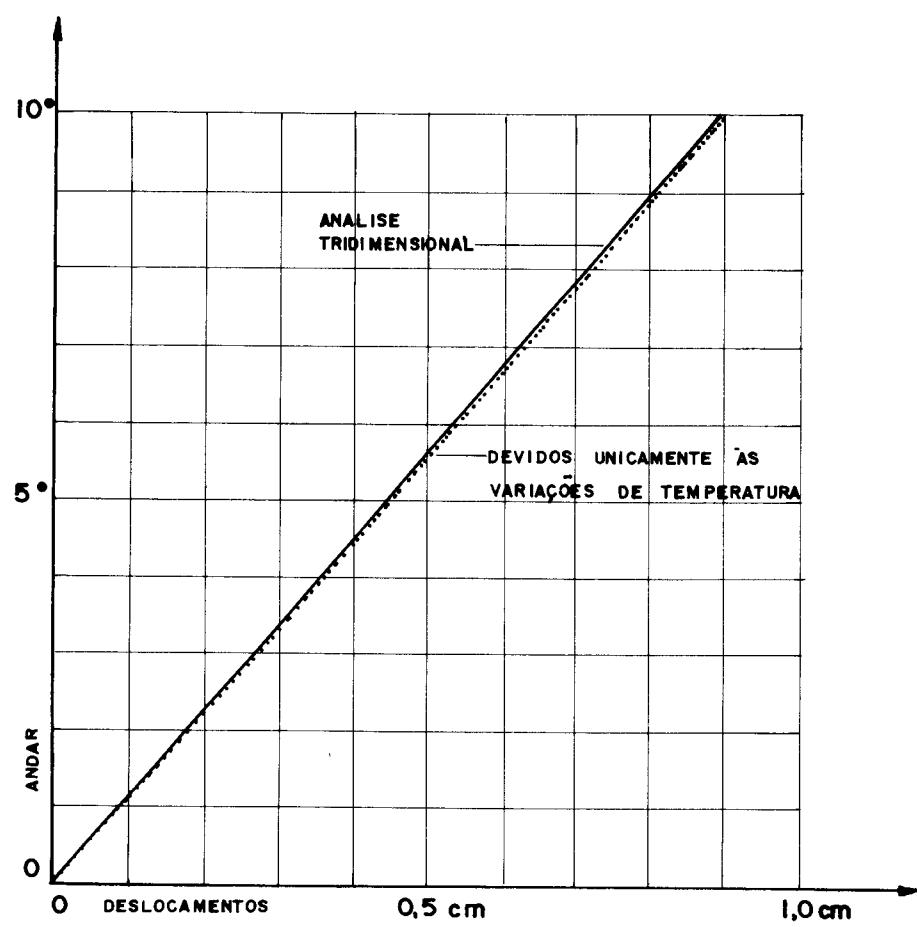


FIG. 4.22 - DESLOCAMENTOS VERTICAIS DA COLUNA C

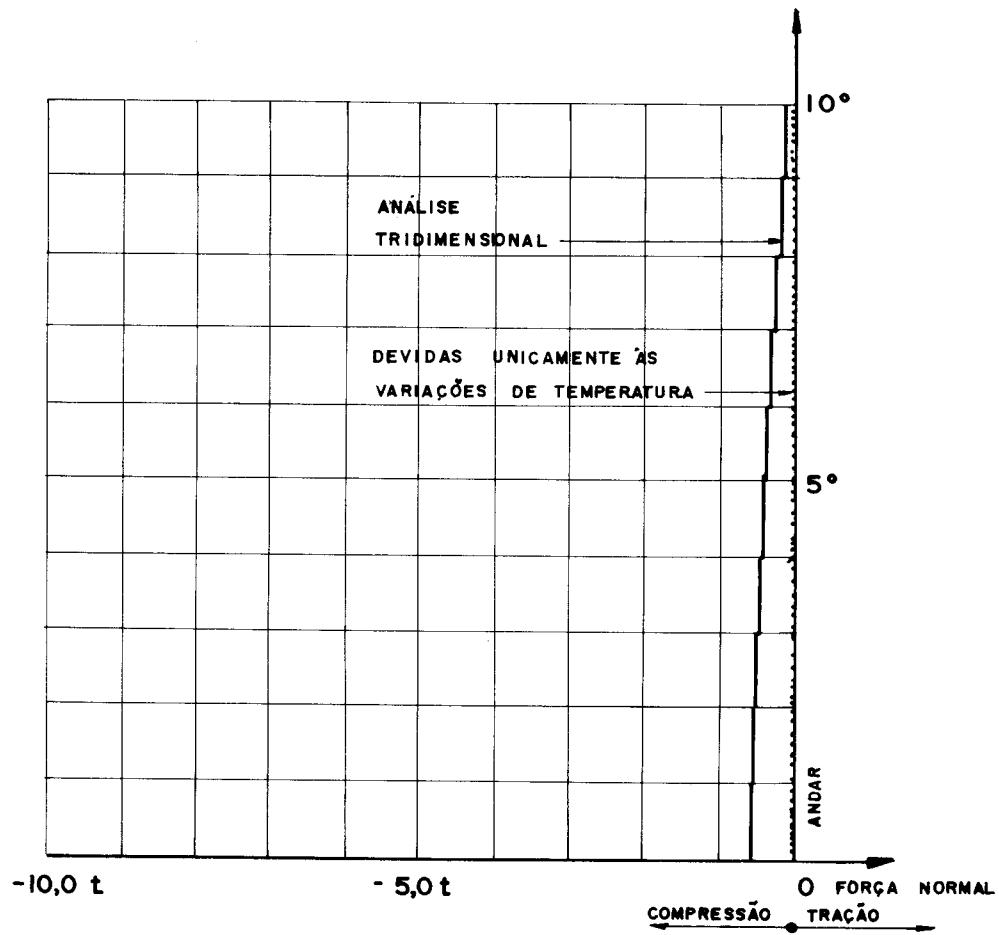
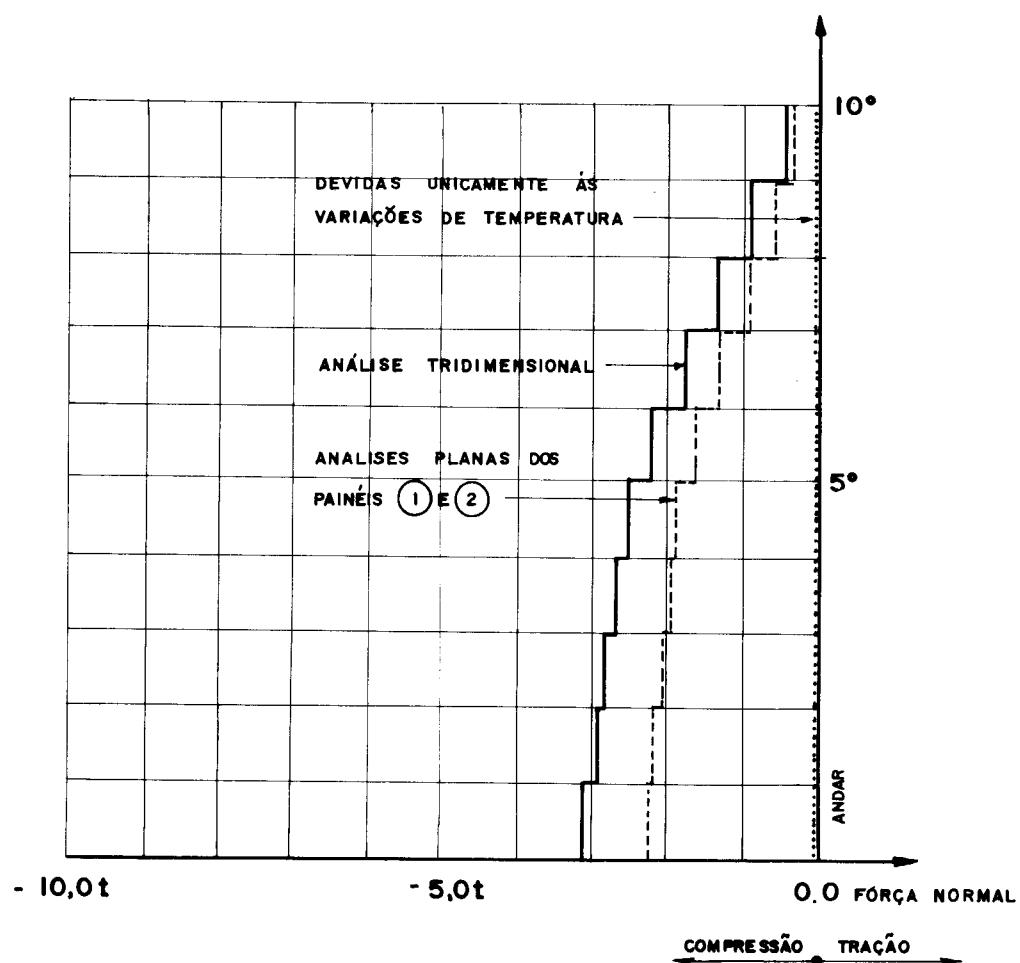
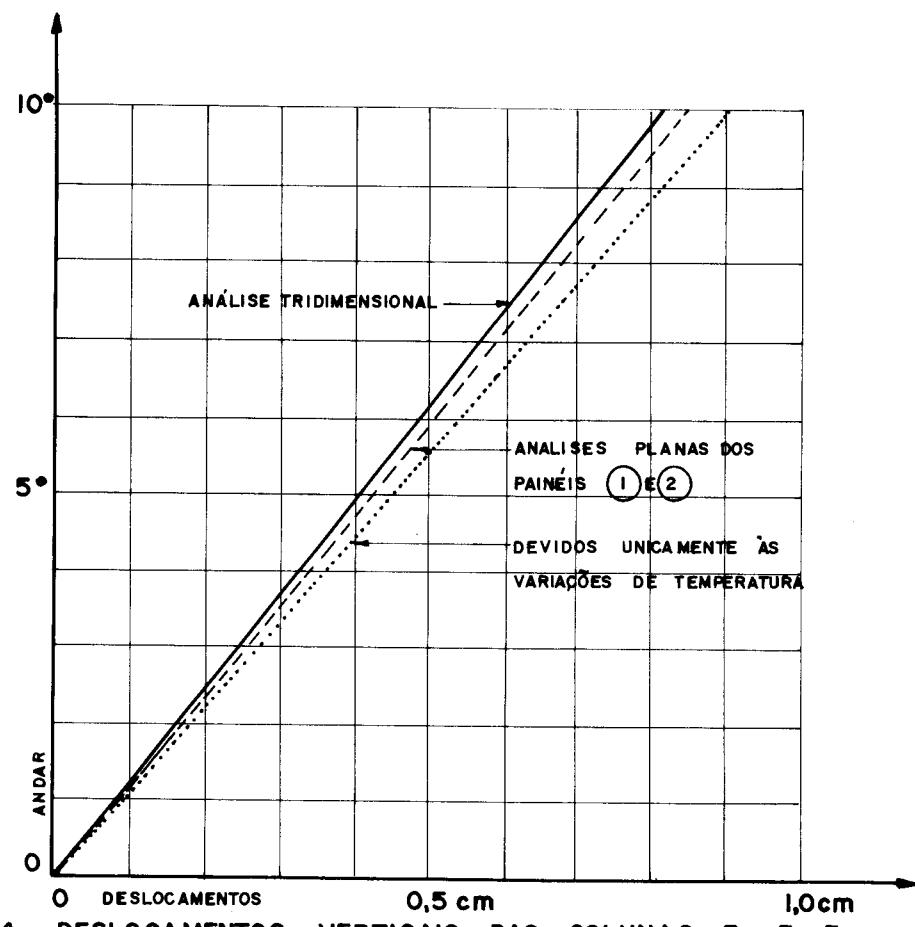


FIG. 4.23 - FORÇAS NORMAIS NA COLUNA C



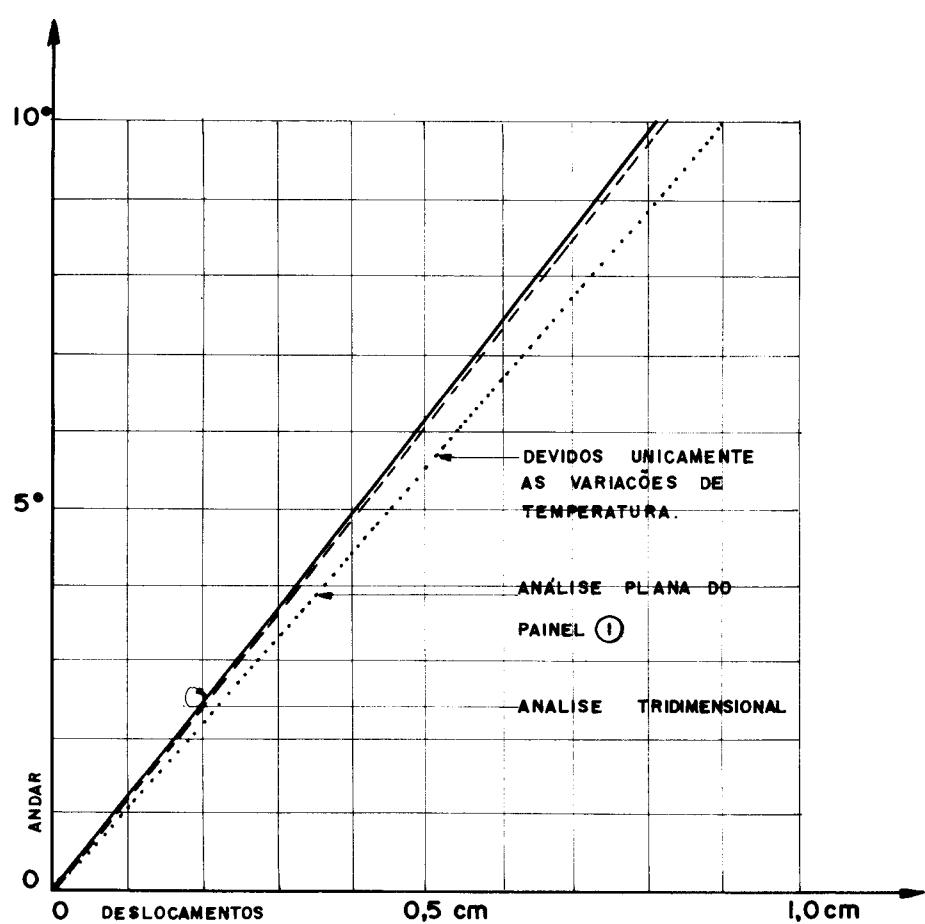


FIG. 4.26 - DESLOCAMENTOS VERTICAIS DA COLUNA E'

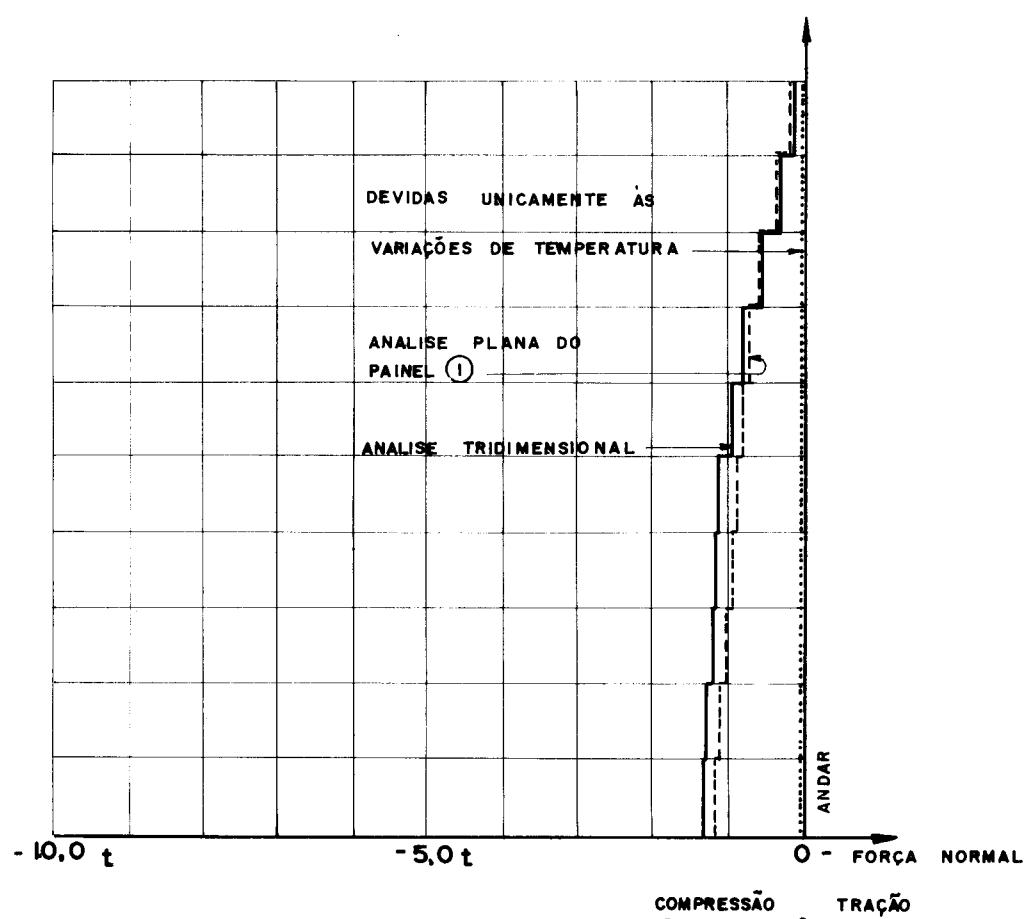


FIG. 4.27 - FORÇAS NORMAIS NA COLUNA E'

nos quadros divisórios, entre as colunas E_1-I por exemplo, passam a ser num andar genérico j :

$$\gamma_j = \frac{(DE_1)_j - (D_I)_j}{\ell_{E_1 I}} \pm \frac{(d)_j - (d)_{j-1}}{h_j} \dots \dots \dots \quad (4.2)$$

onde $(d)_j$ e $(d)_{j-1}$ são os deslocamentos horizontais do painel ① no andar j e no andar imediatamente inferior $j-1$, respectivamente, sendo h_j o pé direito do andar j . As demais notações já foram definidas na expressão (4.1). No segundo membro da expressão (4.2) o sinal + ou o sinal - atribuído à segunda parcela (contribuição dos deslocamentos horizontais na distorção dos quadros divisórios) depende do sentido positivo adotado para os deslocamentos horizontais do painel que contém o quadro divisório em questão.

Primeiramente deve ser observado (figura 4.15) que os deslocamentos horizontais dos painéis ① e ② são bem maiores nas análises planas que na análise tridimensional. Este fato pode ser facilmente explicado tendo em vista que os painéis ① e ② na análise tridimensional, devido a interação entre os diversos painéis, carregam horizontalmente os demais painéis do edifício (painéis periféricos, que, obviamente, não sofrem deslocamentos horizontais provenientes das variações de temperatura, quando isolados).

Um fato interessante que convém ser observado é que, num mesmo painel, em alguns quadros divisórios a contribuição dos deslocamentos horizontais nas distorções aparecem com o sinal positivo na equação 4.2 e em outros quadros divisórios aparecem com o sinal negativo. Este fato pode ser melhor entendido observando-se as figuras 4.15 a), 4.15 b) e 4.15 c). A figura 4.15 a) mostra um painel com 2 quadros divisórios em seu estado inicial, sem solicitação; a figura 4.15 b) salienta as distorções que aparecem provenientes dos deslocamentos verticais (1^a parcela da equação 4.2). A figura 4.15 c) exibe as distorções devidas unicamente aos deslocamentos horizontais (2^a parcela da equação 4.2). Deve ser notado, que no quadro divisório A, as duas distorções consideradas se subtraem, enquanto no quadro divisório B, elas se somam.

Na figura 4.17 vê-se que as distorções no quadro divisório E_1-I e E_2-I são maiores na análise tridimensional. Todavia as distorções no quadro divisório E'_1-I (figura 4.18) são maiores na análise plana do painel ①. Estas constatações indicam que o fato de haverem deslocamentos horizontais e estes deslocamentos afe-

tarem significativamente as distorções dos quadros divisórios (expressão 4.2) no sentido de aumentar ou diminuir, conforme o quadro divisório, torna-se impossível prever, a priori, em qual das análises (planas ou tridimensional) as distorções serão maiores ou menores.

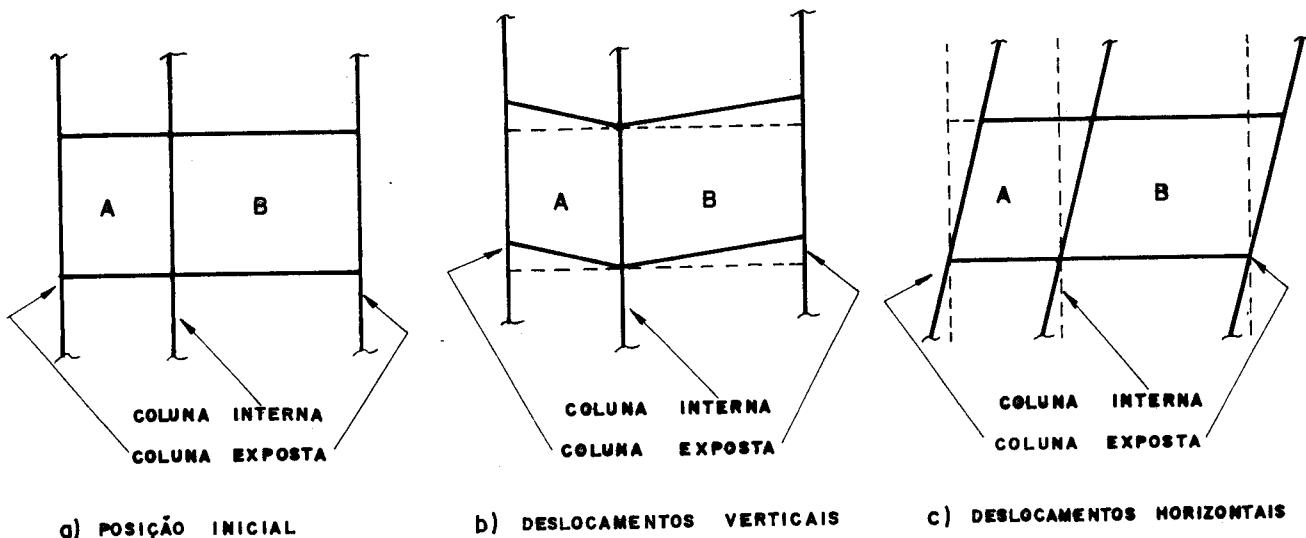


FIG. 4.15 - PARCELAS NA DISTORÇÃO DOS QUADROS DIVISÓRIOS

De modo semelhante ao exemplo anterior observa-se pela figura 4.19 que as distorções nos quadros divisórios E₁-C e E₂-C na análise tridimensional são muito pequenas quando comparadas com as distorções dos outros quadros divisórios (segundo as análises planas dos painéis periféricos que contêm estes quadros divisórios, as distorções são, obviamente, nulas).

Nas figuras 4.20, 4.21, 4.22 e 4.23 vê-se que, apesar dos deslocamentos horizontais apresentados, as constatações observadas no primeiro exemplo com relação às colunas I e C continuam aqui também válidas.

Estudando o comportamento das colunas E₁ e E₂ (figuras 4.24 e 4.25), constata-se neste exemplo, que ao contrário do que aconteceu nas colunas correspondentes do exemplo anterior, aqui, os deslocamentos e forças normais são maiores (algebricamente)

nas análises planas.

Os resultados encontrados para a coluna E'_1 (figuras 4.25 e 4.26) são análogos aos das colunas E_1 e E_2 . Este fato vem mostrar uma semelhança qualitativa no comportamento das colunas expostas, com excessão das de canto, mesmo existindo deslocamentos horizontais.

Uma justificativa em termos qualitativos dos resultados encontrados para os deslocamentos verticais e forças normais nas colunas deste segundo exemplo é algo muito difícil. Em primeiro lugar a analogia com o problema de estaqueamentos, usada no primeiro exemplo, aqui já não tem mais sentido, pois os deslocamentos horizontais, tanto na estrutura tridimensional como nas planas (painéis isolados), dependem primordialmente das relações existentes entre as rigidezes das vigas e pilares (os deslocamentos horizontais podem ser ora num sentido, ora em outro e também nulos, conforme as citadas relações). Em segundo lugar os deslocamentos horizontais, naturalmente, têm influência significativa nos deslocamentos verticais e forças normais das colunas.

As constatações neste exemplo podem ser assim resumidas:

. 1º) - Para os deslocamentos horizontais

a) - Os deslocamentos horizontais na análise tridimensional são bem menores que os obtidos nas análises planas (figura 4.16).

2º) - Para as colunas I e C

b) - Mesmas constatações do primeiro exemplo, embora tenham ocorrido deslocamentos horizontais (figura 4.20, 4.21, 4.22 e 4.23).

3º) - Para as colunas E_1 e E_2

c) - Deslocamentos verticais ligeiramente menores na análise tridimensional, contudo, tanto os da análise tridimensional como os das planas, são próximos aos devidos unicamente às variações de temperatura (figura 4.24).

d) - Forças normais na análise tridimensional ligeiramente maiores, algebricamente, que as obtidas nas análises planas (figura 4.25).

4º) - Para a coluna E'_1

e) - Deslocamentos verticais na análise tridimensional ligeiramente menores que os obtidos na análise plana do painel 1 (figura 4.26). Contudo, tanto na análise tridimensional como na

plana do painel ①, os deslocamentos verticais são próximos dos devidos unicamente às variações de temperatura.

- f) - Forças normais na análise tridimensional do painel ① ligeiramente maiores, algebricamente, que as obtidas na análise plana do painel ① (figura 4.27).

5º) - Para as distorções

- g) - Nos quadros divisórios E_1-I e E_2-I as distorções são maiores na análise tridimensional (figura 4.17), entretanto, no quadro divisório $E_1'-I$ são maiores nas análises planas (figura 4.18).

- h) - Nos quadros divisórios E_1-C e E_2-C as distorções na análise tridimensional são pequenas quando comparadas com as que ocorrem nos outros quadros divisórios (as análises planas dos painéis periféricos que contêm estes quadros divisórios levam a distorções nulas - figura 4.18).

CAPÍTULO V

PROGRAMAS PARA CÁLCULO AUTOMÁTICO

5.1 - INTRODUÇÃO

De acordo com o procedimento sugerido por GERE e WEAVER¹⁶, foram elaborados dois programas automáticos em linguagem FORTRAN para o computador IBM-1130 do Centro de Processamento da Dados da E.E.S.C.. Um destes programas é o que permite a obtenção das matrizes de rigidez dos painéis, conforme o exposto no parágrafo 3.4, constituindo, de certa forma, parte do programa de análise de estruturas planas mais geral, assunto do outro programa. Tendo em vista que o procedimento em forma matricial via deslocamentos sugerido por GERE e WEAVER¹⁶ já encontra em nosso meio grande divulgação e da mesma forma a respectiva programação automática, julga-se desnecessária a apresentação aqui destes programas.

Segundo o procedimento exposto no capítulo III, foi elaborado também um programa em linguagem FORTRAN para o computador IBM-1130 do Centro de Processamento de Dados da E.E.S.C.. Este programa tem por base, como já foi dito no parágrafo 4.1, a versão em linguagem FORTRAN elaborada por OLIVEIRA²² a partir do programa original em linguagem ALGOL apresentada por STAMATO²¹. Na versão elaborada por OLIVEIRA foram introduzidos alguns procedimentos de computação, visando uma maior economia de memória interna do computador. No programa elaborado pelo autor, novas modificações foram introduzidas, não somente quanto a introdução de novos procedimentos de computação, como também a eliminação de certos trechos desnecessários do programa original, tendo em vista os problemas aqui tratados.

Apresenta-se a seguir uma sumária descrição do programa de análise de estruturas tridimensionais de edifícios altos, fornecendo as informações necessárias para a sua compreensão e também a sua utilização.

5.2 - ORGANIZAÇÃO DO PROGRAMA

O programa no seu todo é composto de quatro sub-programas, ligados entre si através de comandos de carregamento LINK²³.

Estes comandos permitem o fracionamento do programa global, diminuindo, desta forma, a área de memória interna do computador reservada para o programa na execução do mesmo, aumentando, por conseguinte, a área de memória disponível para as variáveis envolvidas. O conjunto destes quatro sub-programas faz uso de vinte e três sub-rotinas. Por motivos ligados às restrições impostas pelos comandos que definem as dimensões das matrizes no computador, comandos DIMENSION²⁴, foram necessárias várias sub-rotinas idênticas para uma mesma finalidade, onde varia apenas os valores constantes destes comandos (as dimensões das matrizes no programa de origem e na sub-rotina devem ser as mesmas). Por isto foram necessárias 4 sub-rotinas para multiplicação de matrizes, 3 sub-rotinas que tornam nulos os elementos de uma matriz, 11 sub-rotinas que transferem os elementos de uma matriz para outra e duas sub-rotinas para transposição de matrizes. Com exceção dos valores constantes nos comandos DIMENSION, as sub-rotinas são:

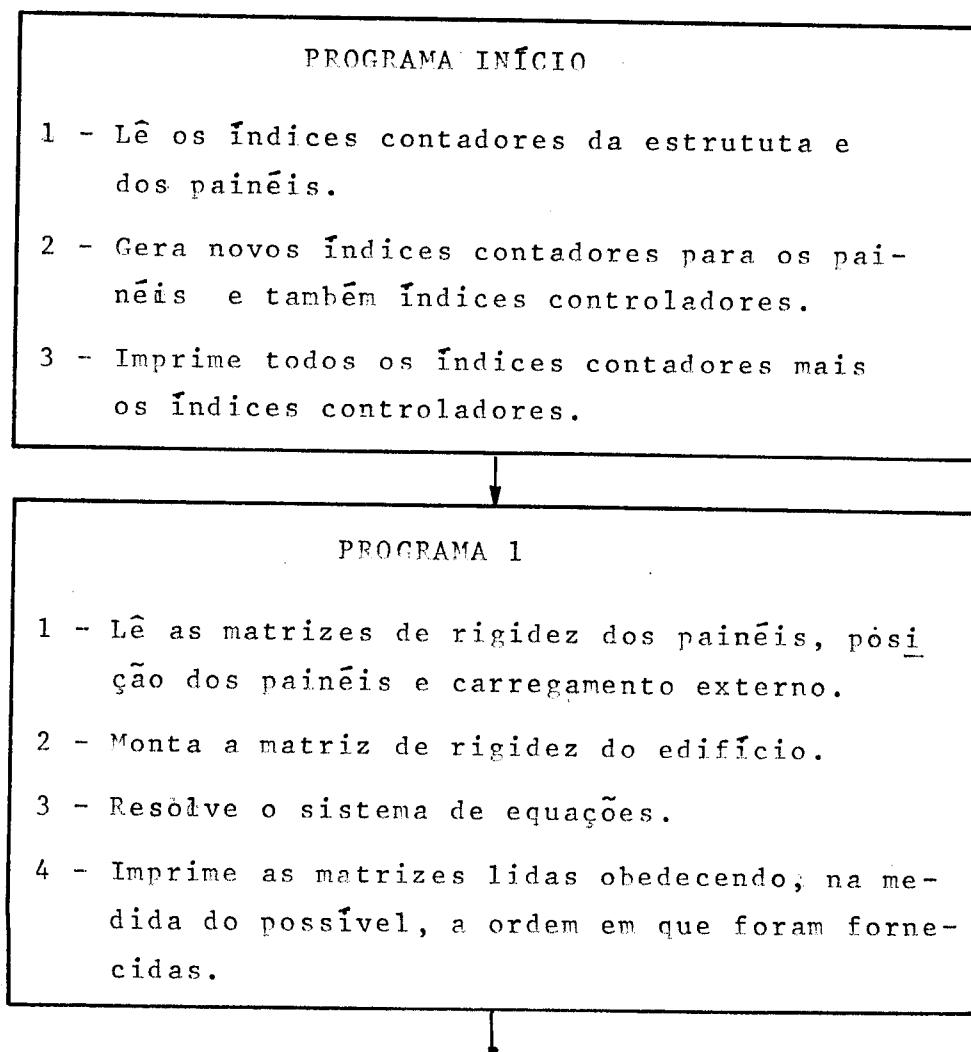
- 1 - MULT (A,B,C,N1,N2,N3) - Efetua a multiplicação da matriz A , de ordem N1 x N2 , pela matriz B , de ordem N2 x N3 , obtendo a matriz C , de ordem N1 x N3 .
- 2 - CLEA (A,M,N) - Torna nulos os elementos da matriz A , de ordem M x N .
- 3 - COME (A,I,J,B,K,L,M,N) - Retira da matriz A , a partir de um certo elemento A(I,J) para baixo e para a direita, uma sub-matriz de ordem M x N , que é levada para a matriz B , a partir de um certo elemento B(K,L) para baixo e para a direita.
- 4 - TRAN (A,B,M,N) - Transpõe a matriz A , de ordem M x N , armazenando a transposta na matriz B , de ordem N x M .
- 5 - ADDC (A,I,J,B,K,L,M,N) - Adiciona na matriz B , a partir de um certo elemento B(K,L) para baixo e para a direita, uma sub-matriz, de ordem M x N , retirada da matriz A , a partir de um certo elemento A(I,J) para baixo e para a direita.
- 6 - SOLVE (A,B,HB,N,NL) - Resolve pelo processo de GAUSS um sistema de equações A * y = B , fazendo com que a matriz solução X , de ordem N x NL , ocupe a mesma área de memória reservada para a matriz B , também de ordem N x NL . A matriz A , de ordem N x N , é simétrica e em banda diagonal, sendo fornecida sob forma de meia banda,

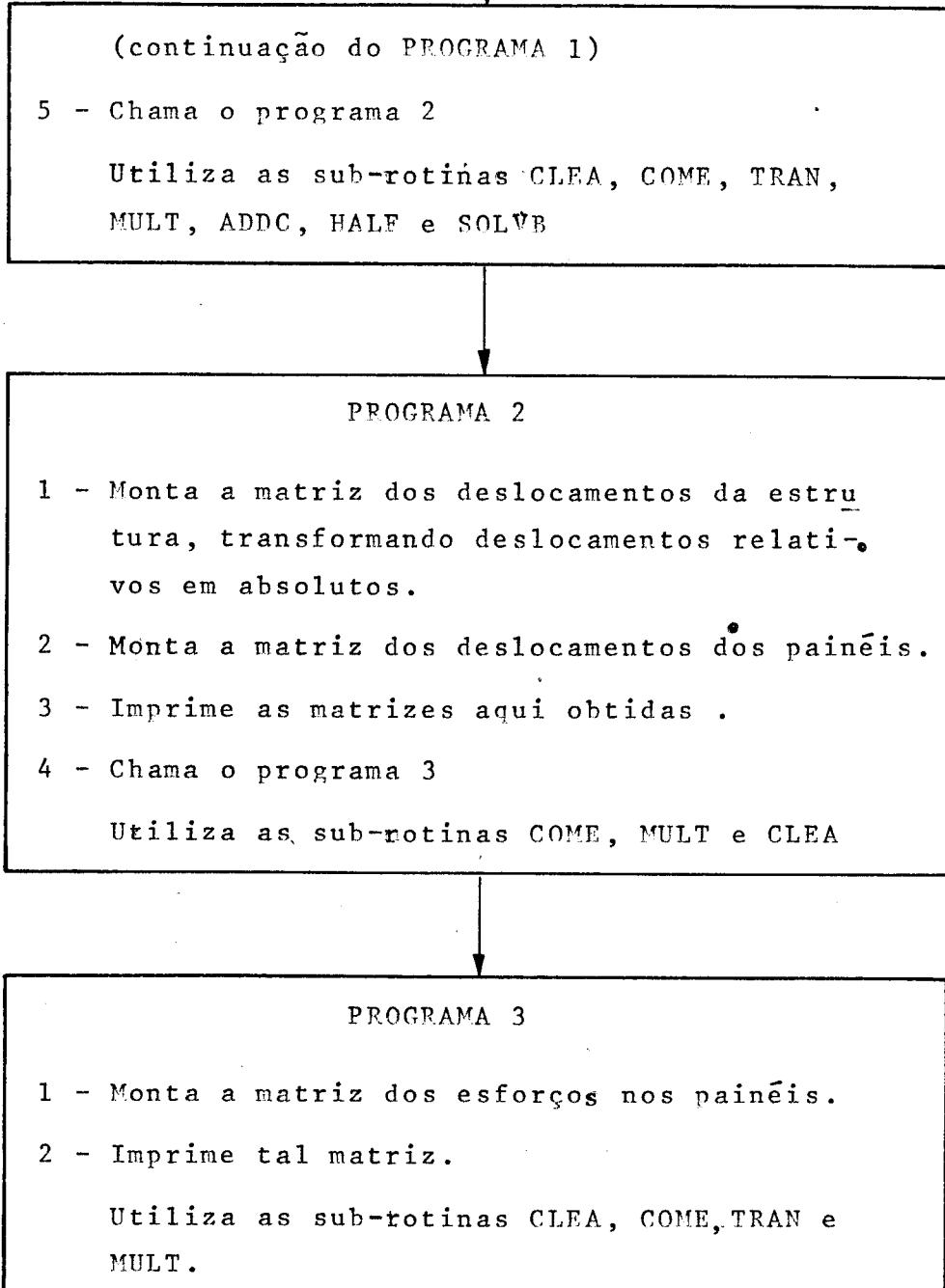
de ordem HB x M.

- 7 - HALF (A,NF,NU,NFI) - Elimina na matriz A , de ordem NF*NU x NFI*NU, composta, portanto, de NF*NFI sub-matrizes quadradas A(I,J), de ordem NU*NU, os elementos situados abaixo das diagonais principais das sub-matrizes A(I,1) e reagrupa "in situ", deslocando as linhas para a esquerda, de modo que a primeira coluna de A fique com as diagonais principais de A(I,1), completando com elementos nulos a direita.

5.2.1 - Diagramas de Blocos

A seguir, apresenta-se o diagrama de blocos do programa no seu todo, indicando as operações básicas e as sub-rotinas utilizadas em cada um dos sub-programas. Dispensa-se uma apresentação mais detalhada, pois a listagem do programa em linguagem FORTRAN, apresentada adiante (§ 5.6), esclarece qualquer particularidade (a linguagem FORTRAN é bastante próxima da linguagem científica usual).





5.3 - NOTAÇÃO DAS VARIÁVEIS

A tabela V-1 apresenta a notação utilizada para as variáveis envolvidas no programa. A menos de ligeiras modificações, notadamente por força da limitação do número de caracteres permitido pelo sistema de computação utilizado para a identificação das variáveis, a notação utilizada é a mesma do programa original em linguagem ALGOL .

As outras notações que aparecem no decorrer do programa,

T A B E L A V - 1

NOTAÇÃO

IDENTIFICADORES

NE	Número de andares.
NP	Número de painéis.
NL	Número de sistemas de carregamentos.
NFI	Número de andares onde a interação é considerada.
NU	Número de deslocamentos do edifício considerados por andar.
MU(I)	Número de deslocamentos do painel I considerados por andar.
MUMAX	O maior dos valores MU(I)
TYPE(I)	Tipo do painel I.
MUAC(J)	Soma dos MU(I), acumulada de 1 até J só considerando os painéis de tipo diferente.
MUT	Soma dos MU(I) para todos os painéis.
PS(I,J)	Matriz de rigidez dos painéis, fornecida só para tipos diferentes de painéis em forma de meia banda e por coluna.
P(I,J)	Matriz de posição dos painéis, constituída das sub-matrizes $b(I)$ (exp. (3.18)) fornecidas segundo a numeração dos painéis.
LOAD(I,J)	Matriz de carga externa da estrutura segundo os deslocamentos considerados.
TS(I,J)	Matriz de rigidez do edifício, determinada e armazenada em forma de meia banda análoga à de PS(I,J), também por coluna.
PMOV(I,J)	Matriz de deslocamentos dos painéis, constituída de sub-matrizes relativas aos painéis na mesma sequência adotada para a numeração dos deslocamentos.
PLLOAD(I,J)	Matriz de cargas nos painéis, determinada de modo análogo à PMOV(I,J)

e não estão mostradas na tabela V-1, são auxiliares e seus significados ficam evidentes pela maneira como são introduzidas. As dimensões das matrizes encontram-se em cartões comentários apresentados oportunamente ao longo da listagem do programa apresentada adiante (§ 5.6).

5.4 - PREPARAÇÃO DOS DADOS PARA O PROGRAMA

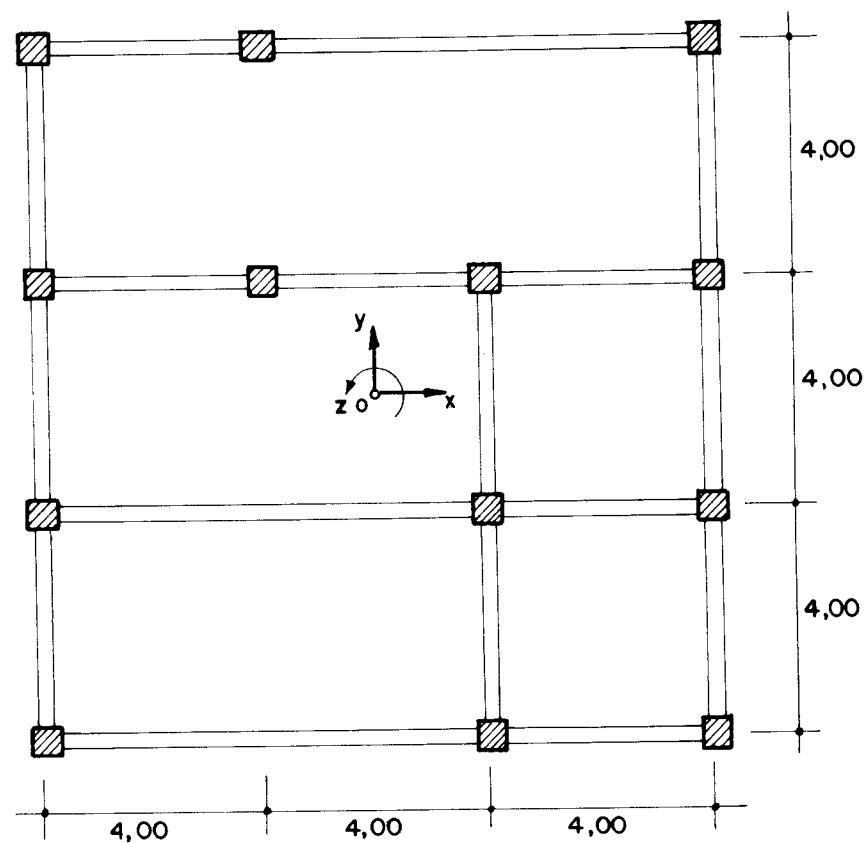
A tabela V-2 exibe a maneira como deve ser alimentado o programa com os dados. Inicialmente são fornecidos os índices contadores da estrutura (número de andares, painéis, carregamentos, andares que se interagem e deslocamentos incógnitos por andar) e a seguir são fornecidos os índices contadores de cada painel (número de deslocamentos por andar e tipo do painel). Os próximos dados são as matrizes de rigidez dos painéis, posição dos painéis, e, finalmente, a matriz do carregamento externo. Todos estes dados devem ser fornecidos na mesma sequência adotada para a numeração dos painéis, andares, deslocamentos incógnitos e carregamentos.

No intuito de facilitar a exposição, exemplifica-se a elaboração dos dados a serem fornecidos ao programa com o exemplo da estrutura mostrada na figura 5.1. O edifício é constituído de 10 andares idênticos, possuindo pés direito de 3.0m.. O sistema de referência dextrorso $Oxyz$ foi escolhido com origem 0 no centro geométrico da base do prédio, onde os eixos Ox e Oy são paralelos às duas "famílias" ortogonais de painéis, e o eixo Oz é vertical (sentido positivo para cima). Numeram-se os deslocamentos incógnitos do edifício de baixo para cima, conforme a figura 5.2. De modo similar são numerados os deslocamentos incógnitos nos painéis, conforme a figura 5.3. A numeração dos painéis deve ser feita na mesma sequência adotada para os tipos. No presente exemplo esta numeração está indicada pelos números dentro de pequenos círculos. O carregamento, como nos exemplos apresentados no capítulo IV, constitui-se de forças verticais, para cima, aplicadas no topo de edifício em todos os pilares de periferia.

O primeiro grupo de dados é constituído dos índices contadores da estrutura, sendo fornecidos em um único cartão, onde são reservadas 10 posições para cada um dos valores. No presente exemplo tem-se: $NF = 10$, $NP = 7$, $NL = 3$ (estudou-se dois outros sistemas de solicitação, só para ilustrar que isto também é possível, e como se procede), $NFI = 3$ e $NU = 16$.

T A B E L A V - 2

	DADOS	Nº DE CARTÕES	VALORES NUMÉRICOS
A	Índices contadores da estrutura (Número de andares, painéis, carregamentos, andares que se interagem, deslocamentos por andar)	1	NF, NP, NL, NEI, NU
B	Índices contadores dos painéis (Número de deslocamentos incôgnitos por andar e tipo do painel na sequência da numeração adotada para os painéis - um cartão para cada painel)	NP	MU(I), TYPE(I)
C	Matriz de rigidez dos painéis (Deve ser fornecida somente meia banda e por coluna, segundo a numeração adotada para os deslocamentos considerados e tipos)	2*NUAC(NP+1)*NF	PS
D	Matriz de posição dos painéis (Deve ser fornecida linha por linha, uma em cada cartão)	MUT	P
E	Matriz do carregamento externo (Deve ser fornecida segundo a numeração adotada para os andares, um cartão para cada andar, e na sequência adotada para os carregamentos)	NF*NL	LOAD



- TODOS OS PILARES COM SEÇÃO DE 30cm x 30cm

- TODAS AS VIGAS COM SEÇÃO DE 12cm x 40cm

FIG. 5.2 - PLANTA DA ESTRUTURA DE UM EDIFÍCIO DE 10 ANDARES

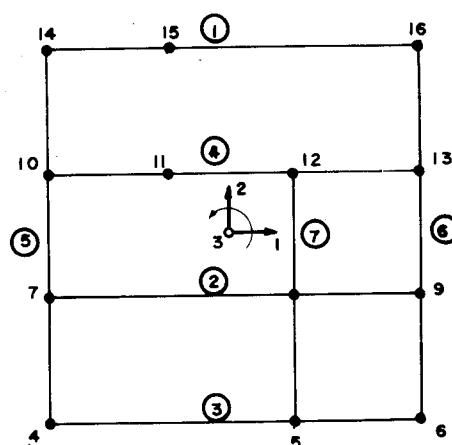


FIG. 5.3 - NUMERAÇÃO DOS DESLOCAMENTOS DA ESTRUTURA POR ANDAR.

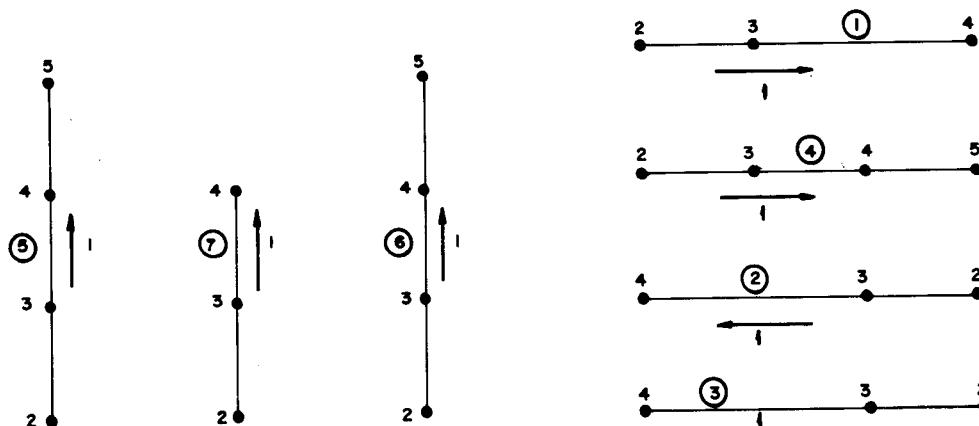


FIG. 5.4 - NUMERAÇÃO DOS DESLOCAMENTOS DOS PAINÉIS POR ANDAR.

Em seguida, são fornecidos os índices contadores dos painéis, um cartão para cada painel, portanto, no presente exemplo em 7 cartões, onde são reservadas também 10 posições para cada um destes valores. No exemplo em questão tem-se: painéis ①, ② e ③ possuem $MU(I) = 4$ e $TYPE(I) = 1$; os painéis ④, ⑤ e ⑥ possuem $MU(I) = 5$ e $TYPE(I) = 2$; finalmente o painel ⑦ possue $MU(I) = 4$ e $TYPE(I) = 3$.

As matrizes de rigidez dos painéis, que constituem os próximos dados, são fornecidas somente para tipos diferentes de painéis na mesma sequência adotada para os tipos. No exemplo em questão, cada linha destas matrizes é fornecida em dois cartões, onde são reservadas 10 posições para cada elemento. No parágrafo 5.5 mostra-se, através da impressão feita pelo computador, as matrizes de rigidez dos painéis do mesmo modo como foram fornecidas, com exceção do formato. (Na leitura dos dados adota-se o formato de ponto decimal e na impressão adota-se o formato exponencial). A matriz "posição dos painéis", dado seguinte, é fornecida como composta de todas as matrizes $b(I)$ (§ 3.3.2 - expressão (3.12)), onde cada linha é fornecida em um cartão. São reservadas 5 posições para cada coeficiente desta matriz.

Finalmente, o último grupo de dados constitui a matriz do carregamento externo LOAD (§ 3.5 - expressão 3.18)). Esta matriz é fornecida de modo que cada cartão contenha as solicitações segundo os deslocamentos de um andar. A sequência destes cartões deve respeitar a numeração dos andares e dos carregamentos. Para cada elemento desta matriz são reservadas 5 posições nos cartões.

5.5 - IMPRESSÃO DOS DADOS FORNECIDOS AO COMPUTADOR

Procurou-se, na medida do possível, imprimir os dados fornecidos ao computador na mesma sequência e do mesmo modo em que são fornecidos, tendo em vista, obviamente, facilitar a consultação e eventuais erros aí cometidos.

5.5.1 - Primeiro grupo de dados impresso

- Índices contadores da estrutura

- Índices contadores dos painéis

- Índices controladores

ANALISE PELO METODO STAMATO

NF	NP	NL	NFI	NU
10	7	3	3	16
PAINEL	MU(I)	MUAC(II)	SMU(II)	TYPE(III)
1	4	4	4	1
2	4	4	8	1
3	4	4	12	1
4	5	9	17	2
5	5	9	22	2
6	5	9	27	2
7	4	13	31	3
MUMAX	MUT			
5	31			

5.5.2 - Segundo grupo de dados impresso

- Matrizes de rigidez dos painéis

(nas próximas páginas)

Matrizes de rigides dos painéis

(segundo grupo de dados impresso)

MATRIZ DE RIGIDEZ DOS PAINÉIS
(NA ORDEM DA NÚMEROAÇÃO ADITADA)

(continuação do segundo grupo de dados impresso)

(continuação do segundo grupo de dados impresso)

(continuação do segundo grupo de dados impresso)

5.5.3 - Terceiro grupo de dados impresso

- Matriz posição dos painéis

5.5.4 - Quarto grupo de dados impresso

- Matriz do carregamento externo

**CARREGAMENTO EXTERNO
(SEGUNDO AS INCÓGNITAS DESLOCAMENTOS DO PREDIO)**

(continuação do quarto grupo de dados impressos)

5.6 - IMPRESSÃO DOS RESULTADOS

A seguir, apresenta-se a impressão dos resultados fornecida pelo computador. O primeiro grupo de resultados é constituído dos deslocamentos do edifício. Convém salientar que estes deslocamentos são todos absolutos, pois o programa transforma os deslocamentos horizontais relativos em absolutos (§ 5.7.9). O grupo de resultados seguinte constitui-se dos deslocamentos dos painéis, porém, aqui os deslocamentos horizontais são relativos (isto vem facilitar o uso da expressão 4.2). Finalmente, o último grupo de resultados constitui-se nos esforços nos painéis. Tais esforços são todos absolutos, pois o programa transforma os esforços relativos (forças cortantes totais nos painéis) em esforços absolutos (§ 5.7.10).

(Resultados impressos nas próximas páginas)

5.6.1 - Primeiro grupo de resultados impresso

- Deslocamentos do edifício

DESLOCAMENTOS ABSOLUTOS DOS ANDARES
(NA SEQUENCIA DA NUMERACAO ADOTADA)

1	0.4182849E-02	0.7860840E-01	0.2633137E-01
2	0.4549352E-01	0.8752989E-01	0.2081524E-01
3	-0.3934663E-02	0.4125544E-01	0.2692848E-01
4	0.8772143E-00	0.9032211E-00	0.8966339E-00
5	0.1163705E-01	0.7954577E-00	0.8061745E-00
6	0.1406040E-01	0.8307286E-00	0.8821736E-00
7	0.8685152E-00	0.8706026E-00	0.8721236E-00
8	0.1087800E-01	0.1116462E-00	0.2069206E-00
9	0.1034105E-01	0.1260320E-00	0.8025109E-00
10	0.8209412E-00	0.8277905E-00	0.8265233E-00
11	0.1859644E-00	0.1793377E-00	0.1857886E-00
12	0.9472847E-02	-0.1806632E-01	0.1103682E-00
13	-0.1332477E-01	-0.2343773E-01	0.7971106E-00
14	0.8094052E-00	0.8002611E-00	0.9591907E-00
15	0.1599665E-00	0.1583190E-00	0.1528621E-01
16	-0.8010994E-02	-0.4972089E-01	0.8870538E-00
17	0.1700710E-01	0.3193500E-00	0.1073364E-00
18	0.1868005E-00	0.3579068E-00	0.8472503E-01
19	-0.1647503E-01	0.1673438E-00	0.1097507E-00
20	0.1754850E-01	0.1806413E-01	0.1793365E-01
21	0.2303744E-01	0.1592368E-01	0.1613555E-01
22	0.2787529E-01	0.1662477E-01	0.1764496E-01
23	0.1737630E-01	0.1741733E-01	0.1744764E-01
24	0.2153879E-01	0.2213374E-00	0.4099511E-00
25	0.2051855E-01	0.2498687E-00	0.1606612E-01
26	0.1643266E-01	0.1656867E-01	0.1654233E-01
27	0.3688840E-00	0.3557444E-00	0.3683535E-00
28	0.1866289E-01	-0.3606434E-01	0.2185932E-00
29	-0.2644665E-01	-0.4654666E-01	0.1596041E-01
30	0.1620398E-01	0.1602254E-01	0.1917069E-01
31	0.3166311E-00	0.3133934E-00	0.3061400E-01
32	-0.1589412E-01	-0.9858930E-01	0.1774392E-01
33	0.3826186E-01	0.7279313E-00	0.2455697E-00
34	0.4276430E-00	0.8175299E-00	0.1926138E-00
35	-0.3772611E-01	0.3812918E-00	0.2505105E-00
36	0.2633343E-01	0.2709527E-01	0.2690276E-01
37	0.3407291E-01	0.2396318E-01	0.2427742E-01
38	0.4119018E-01	0.2500119E-01	0.2651063E-01
39	0.2607975E-01	0.2613962E-01	0.2618434E-01
40	0.3185281E-01	0.3277589E-00	0.6092264E-00
41	0.3035596E-01	0.3697795E-00	0.2414938E-01
42	0.2468389E-01	0.2488528E-01	0.2484381E-01
43	0.5456818E-00	0.5262641E-00	0.5444511E-00
44	0.2729503E-01	-0.5387253E-01	0.3225502E-00
45	-0.3912965E-01	-0.6895858E-01	0.2398666E-01
46	0.2434586E-01	0.2407749E-01	0.2872300E-01
47	0.4666717E-00	0.4619532E-00	0.4602554E-01
48	-0.2351908E-01	-0.1456856E-00	0.2662354E-01
49	0.6756192E-01	0.1300865E-01	0.4413059E-00
50	0.7670062E-00	0.1463209E-01	0.3435923E-00
51	-0.6750679E-01	0.6817675E-00	0.4488183E-00
52	0.3513099E-01	0.3612506E-01	0.3587448E-01
53	0.4449488E-01	0.3206013E-01	0.3247033E-01
54	0.5368073E-01	0.3340612E-01	0.3537983E-01
55	0.3480120E-01	0.3487812E-01	0.3493634E-01
56	0.4160252E-01	0.4285473E-00	0.7982177E-00
57	0.3961120E-01	0.4829781E-00	0.3228090E-01
58	0.3297633E-01	0.3323964E-01	0.3318157E-01
59	0.7132400E-00	0.6879098E-00	0.7108130E-00
60	0.3510341E-01	-0.7133188E-01	0.4201344E-00
61	-0.5111874E-01	-0.9029147E-01	0.3206775E-01
62	0.3253527E-01	0.3218480E-01	0.3823546E-01
63	0.6095252E-00	0.6034531E-00	0.6159399E-01
64	-0.3074290E-01	-0.1900421E-00	0.3551229E-01
65	0.1045003E-00	0.2039113E-01	0.6964198E-00
66	0.1207311E-01	0.2247832E-01	0.5378320E-00
67	-0.1059394E-00	0.1069897E-01	0.7061902E-00
68	0.4394533E-01	0.4515262E-01	0.4484946E-01
69	0.5411044E-01	0.4023354E-01	0.4073116E-01
70	0.6507161E-01	0.4185938E-01	0.4426329E-01
71	0.4354655E-01	0.4363831E-01	0.4370865E-01
72	0.5061034E-01	0.5217047E-00	0.9732033E-00
73	0.4808251E-01	0.5872401E-00	0.4048031E-01
74	0.4132447E-01	0.4164502E-01	0.4156900E-01
75	0.8682401E-00	0.8374831E-00	0.8640197E-00
76	0.4185332E-01	-0.8823928E-01	0.5091986E-00
77	-0.6216270E-01	-0.1101407E-00	0.4022279E-01
78	0.4079061E-01	0.4036460E-01	0.4771267E-01
79	0.7424490F-00	0.7351821E-00	0.7737179E-01

(continuação do primeiro grupo de resultados impresso)

80	-0.3742828E-01	-0.2307235E 00	0.4441308E 01
81	0.1484102E 00	0.2941453E 01	0.1012500E 01
82	0.1748950E 01	0.3321967E 01	0.7751251E 00
83	-0.1529578E 00	0.1545846E 01	0.1023801E 01
84	0.5278059E 01	0.5417777E 01	0.5382815E 01
85	0.6273081E-01	0.4850254E 01	0.4907695E 01
86	0.7506924E-01	0.5037386E 01	0.5316454E 01
87	0.5232146E 01	0.5242552E 01	0.5250614E 01
88	0.5870202E-01	0.6051862E 00	0.1130357E 01
89	0.5554419E-01	0.6801893E 00	0.4876575E 01
90	0.4974285E 01	0.5011451E 01	0.5001993E 01
91	0.1007213E 01	0.9716399E 00	0.1000554E 01
92	0.4734621E-01	-0.1042950E 00	0.5876526E 00
93	-0.7198758E-01	-0.1280660E 00	0.4847102E 01
94	0.4912890E 01	0.4863575E 01	0.5714586E 01
95	0.8626725E 00	0.8543940E 00	0.9341154E 01
96	-0.4342818E-01	-0.2667581E 00	0.5332846E 01
97	0.1985047E 00	0.4007735E 01	0.1391576E 01
98	0.2395525E 01	0.4538066E 01	0.1055518E 01
99	-0.2086254E 00	0.2110454E 01	0.1403500E 01
100	0.6164108E 01	0.6319914E 01	0.6281100E 01
101	0.7017208E-01	0.5688733E 01	0.5752597E 01
102	0.8337768E-01	0.5896330E 01	0.6208687E 01
103	0.6113168E 01	0.6124525E 01	0.6133378E 01
104	0.6570613E-01	0.6768206E 00	0.1265614E 01
105	0.6175956E-01	0.7593164E 00	0.5715664E 01
106	0.5824718E 01	0.5866244E 01	0.5854980E 01
107	0.1126406E 01	0.1086744E 01	0.1116692E 01
108	0.5143328E-01	-0.1191090E 00	0.6533818E 00
109	-0.8030712E-01	-0.1435816E 00	0.5683279E 01
110	0.5756797E 01	0.5701799E 01	0.6652502E 01
111	0.9672544E 00	0.9581578E 00	0.1097683E 02
112	-0.4859226E-01	-0.2971736E 00	0.6226085E 01
113	0.2537878E 00	0.5238189E 01	0.1834560E 01
114	0.3150815E 01	0.5949875E 01	0.1378919E 01
115	-0.2732496E 00	0.2764730E 01	0.1847435E 01
116	0.7053132E 01	0.7221634E 01	0.7179853E 01
117	0.7626238E-01	0.6540919E 01	0.6609764E 01
118	0.8968836E 01	0.6764189E 01	0.7103305E 01
119	0.6998298E 01	0.7010317E 01	0.7019675E 01
120	0.7146017E-01	0.7343133E 00	0.1374661E 01
121	0.6646884E-01	0.8219668E 00	0.6567359E 01
122	0.6685403E 01	0.6730393E 01	0.6717551E 01
123	0.1221754E 01	0.1178840E 01	0.1208484E 01
124	0.5402600E-01	-0.1321640E 00	0.7042766E 00
125	-0.8680921E-01	-0.1561419E 00	0.6532938E 01
126	0.6612623E 01	0.6553173E 01	0.7583885E 01
127	0.1053107E 01	0.1043382E 01	0.1265000E 02
128	-0.5276328E-01	-0.3209769E 00	0.7121235E 01
129	0.3127663E 00	0.6632381E 01	0.2339053E 01
130	0.4016005E 01	0.7558176E 01	0.1744468E 01
131	-0.3470571E 00	0.3509074E 01	0.2357288E 01
132	0.7945562E 01	0.8122818E 01	0.8079093E 01
133	0.8084911E-01	0.7409085E 01	0.7481318E 01
134	0.9367465E-01	0.7642446E 01	0.8000520E 01
135	0.7888093E 01	0.7900492E 01	0.7909989E 01
136	0.7581484E-01	0.7752218E 00	0.1452883E 01
137	0.6937938E-01	0.8653059E 00	0.7433868E 01
138	0.7558115E 01	0.7605492E 01	0.7591568E 01
139	0.1288814E 01	0.1243588E 01	0.1271710E 01
140	0.5510719E-01	-0.1427893E 00	0.7382266E 00
141	-0.9114724E-01	-0.1651279E 00	0.7398324E 01
142	0.7482276E 01	0.7419832E 01	0.8507413E 01
143	0.1116981E 01	0.1106787E 01	0.1436671E 02
144	-0.5577576E-01	-0.3371506E 00	0.8018444E 01
145	0.3732095E 00	0.8185110E 01	0.2919264E 01
146	0.4959080E 01	0.9336320E 01	0.2152312E 01
147	-0.4258977E 00	0.4342561E 01	0.2934013E 01
148	0.8842025E 01	0.9023292E 01	0.8978839E 01
149	0.8374889E-01	0.8294422E 01	0.8368114E 01
150	0.9483613E-01	0.8533090E 01	0.8900436E 01
151	0.8783285E 01	0.8795850E 01	0.8804914E 01
152	0.7861270E-01	0.7957201E 00	0.1490454E 01
153	0.7001544E-01	0.8852813E 00	0.8318410E 01
154	0.8445558E 01	0.8493959E 01	0.8479961E 01
155	0.1321251E 01	0.1274786E 01	0.1299868E 01
156	0.5448529E-01	-0.1502546E 00	0.7520716E 00
157	-0.9281225E-01	-0.1698773E 00	0.8282764E 01
158	0.8368627E 01	0.8304979E 01	0.9420862E 01
159	0.1146755E 01	0.1136289E 01	0.1612736E 02
160	-0.5746275E-01	-0.3441577E 00	0.8918016E 01

5.6.2 - Segundo grupo de Resultados impresso

Deslocamentos dos Painéis

DESLOCAMENTOS DOS PAINÉIS
(DESLOCAMENTOS HORIZONTAIS RELATIVOS)

DESLOCAMENTOS DO PAINEL 1
(DESLOCAMENTOS NA NUMERACAO ADOTADA)

1	0.4942818E-01	0.4627445E-01	-0.6113243E-02
2	0.8094052E 00	0.8002611E 00	0.9591907E 00
3	0.1599665E 00	0.1583190E 00	0.1528621E 01
4	-0.8010994E-02	-0.4972089E-01	0.8870538E 00
5	0.1538473E 00	0.1442885E 00	-0.1891242E-01
6	0.1620398E 01	0.1602254E 01	0.1917069E 01
7	0.3166311E 00	0.3133934E 00	0.3061400E 01
8	-0.1589412E-01	-0.9858930E-01	0.1774392E 01
9	0.2620936E 00	0.2456751E 00	-0.3287100E-01
10	0.2434586E 01	0.2407749E 01	0.2872300E 01
11	0.4666717E 00	0.4619532E 00	0.4602540E 01
12	-0.2351908E-01	-0.1456856E 00	0.2662354E 01
13	0.3691439E 00	0.3452036E 00	-0.4732940E-01
14	0.3253527E 01	0.3218480E 01	0.3823546E 01
15	0.6095252E 00	0.6034531E 00	0.6159399E 01
16	-0.3074290E-01	-0.1900421E 00	0.3551229E 01
17	0.4784380E 00	0.4464937E 00	-0.6313209E-01
18	0.4079061E 01	0.4036460E 01	0.4771267E 01
19	0.7424490E 00	0.7351821E 00	0.7737179E 01
20	-0.3742828E-01	-0.2307235E 00	0.4441308E 01
21	0.5889574E 00	0.5481851E 00	-0.8031840E-01
22	0.4912890E 01	0.4863575E 01	0.5714586E 01
23	0.8626725E 00	0.8543940E 00	0.9341154E 01
24	-0.4342818E-01	-0.2667581E 00	0.5332846E 01
25	0.7022427E 00	0.6514925E 00	-0.9930564E-01
26	0.5756797E 01	0.5701799E 01	0.6652502E 01
27	0.9672544E 00	0.9581578E 00	0.1097683E 02
28	-0.4859226E-01	-0.2971736E 00	0.6226085E 01
29	0.8199148E 00	0.7575318E 00	-0.1205341E 00
30	0.6612623E 01	0.6553173E 01	0.7583885E 01
31	0.1053107E 01	0.1043382E 01	0.1265000E 02
32	-0.5276328E-01	-0.3209769E 00	0.7121235E 01
33	0.9389973E 00	0.8639568E 00	-0.1443032E 00
34	0.7482276E 01	0.7419832E 01	0.8507413E 01
35	0.1116981E 01	0.1106787E 01	0.1436671E 02
36	-0.5577576E-01	-0.3371506E 00	0.8018444E 01
37	0.1021915E 01	0.9446573E 00	-0.1688806E 00
38	0.8368627E 01	0.8304979E 01	0.9420862E 01
39	0.1146755E 01	0.1136289E 01	0.1612736E 02
40	-0.5746275E-01	-0.3441577E 00	0.8918016E 01

A impressão dos deslocamentos dos demais painéis é análoga a esta apresentada para o primeiro painel. Omite-se, por isto, a apresentação das demais impressões.

5.6.3 - Terceiro grupo de Resultados impresso

Forças nos Painéis

FORCA NOS PAINEIS
(FORCAS SEGUNDO OS DESLOCAMENTOS CONSIDERADOS)
FORCAS HORIZONTAIS ABSOLUTAS

FORCAS NO PAINEL	1	
1 0.5299505E 00	0.5480045E 00	-0.4111101E 00
2 0.2267006E 00	0.2037000E 00	-0.3202486E 00
3 -0.9016371E-04	-0.7623888E-04	-0.6165395E-03
4 0.1121268E-01	-0.1047023E 00	-0.1479933E 00
5 0.5495209E 00	0.5682771E 00	-0.4202972E 00
6 0.4493126E 00	0.4010984E 00	-0.6471227E 00
7 0.1204448E 01	0.1190994E 01	0.1423922E 01
8 0.1690589E-01	-0.2245889E 00	-0.3074442E 00
9 0.5333479E 00	0.5543779E 00	-0.4247940E 00
10 0.6715506E 00	0.5971107E 00	-0.9617564E 00
11 -0.7775515E-05	-0.7625677E-04	-0.2987051E-03
12 0.3798313E-01	-0.3344472E 00	-0.4536384E 00
13 0.5571969E 00	0.5781990E 00	-0.4456229E 00
14 0.9339569E 00	0.8344186E 00	-0.1002534E 01
15 -0.1243553E-03	-0.4473213E-04	-0.1957087E-02
16 0.5246487E-01	-0.4467543E 00	-0.6057134E 00
17 0.5621529E 00	0.5850130E 00	-0.4632087E 00
18 0.1176943E 01	0.1051916E 01	-0.1234984E 01
19 -0.1535923E-03	-0.1934207E-03	-0.7946621E-03
20 0.6964468E-01	-0.5601148E 00	-0.7594559E 00
21 0.5777865E 00	0.6023703E 00	-0.4883056E 00
22 0.1430861E 01	0.1281481E 01	-0.1478139E 01
23 -0.1561922E-03	-0.1188687E-03	-0.2459705E-03
24 0.8874848E-01	-0.6709467E 00	-0.9140213E 00
25 0.5973330E 00	0.6237856E 00	-0.5185118E 00
26 0.1693535E 01	0.1520700E 01	-0.1730810E 01
27 -0.1137104E-03	-0.1012857E-03	-0.1284400E-02
28 0.1109830E 00	-0.7806040E 00	-0.1069740E 01
29 0.3019829E 00	0.3331413E 00	-0.3942266E 00
30 0.1964547E 01	0.1768429E 01	-0.1987965E 01
31 -0.1016179E-03	-0.1186967E-03	-0.4348240E-02
32 0.1374753E 00	-0.8883992E 00	-0.1222424E 01
33 0.2634193E 01	0.2706173E 01	-0.1964478E 01
34 0.2386852E 01	0.2149566E 01	-0.2399005E 01
35 -0.3503596E-04	0.2981511E-05	0.1406055E-02
36 0.1658570E 00	-0.1072048E 01	-0.1439033E 01
37 -0.7109413E 01	-0.7375561E 01	0.5735280E 01
38 0.1369436E 03	0.1367730E 03	0.1322669E 03
39 -0.1569810E-03	-0.1395254E-03	0.2699989E 03
40 0.2149662E 00	-0.6333874E 00	0.1337462E 03

A impressão das forças nos demais painéis é análoga a apresentada para o primeiro painel. Omite-se, por isto, a apresentação das demais impressões.

5.7 - LISTAGEM DO PROGRAMA EM LINGUAGEM FORTRAN

A seguir, apresenta-se a listagem do programa nos seus diversos sub-programas e suas sub-rotinas. Uma explicação sumária de suas diversas fases é apresentada. No caso de haverem várias sub-rotinas idênticas com a mesma finalidade a explicação é fornecida apenas uma vez, pois a única diferença existente entre elas reside na alteração dos valores constantes nos comandos que definem as dimensões das matrizes no computador.

5.7.1 - Sub-Rotina MULT

- 1 - Linhas 1 e 2 - Comandos iterativos em J1 e J3.
- 2 - Linha 3 - Torna nulos o elemento C(J1,J3) da matriz C .
- 3 - Linha 4 - Comando iterativo em J2
- 4 - Linha 5 - Efetua o produto da matriz A pela B
 (A(J1,J2) * B(J2,J3)), acumulando resultados parciais no elemento C(J1,J2) da matriz C .
- 5 - Linhas 6 e 7 - Retorno ao programa de origem e fim da execução da sub-rotina.

5.7.2 - Sub-Rotina CLEA

- 1 - Linhas 1 e 2 - Comandos iterativos em J e K.
- 2 - Linha 3 - Torna nulo o elemento A(J,K) da matriz A .
- 3 - Linhas 4 e 5 - Retorno do programa de origem e fim da execução da sub-rotina.

5.7.3 - Sub-Rotina COME

- 1 - Linhas 1 e 2 - Comandos iterativos em C e H.
- 2 - Linhas 3 até 6 - Rearranjo de índices.
- 3 - Linha 7 - Torna, segundo a reorganização dos índices, um elemento da matriz B igual a um da matriz A .

A - Sub-Rotinas para multiplicação de matrizes

1 - Sub-Rotina MULT1

```
// FOR
*ONE WORD INTEGERS
*LIST SOURCE PROGRAM
    SUBROUTINE MULT1 (A,B,C,N1,N2,N3)
    DIMENSION A(5,5),B(5,16),C(5,16)
C A=APS(MUMAX,MUMAX) B=AP(MUMAX,NU) C=PROD(MUMAX,NU)
1    DO 1 J1=1,N1
2    DO 1 J3=1,N3
3    C(J1,J3)=0.
4    DO 1 J2=1,N2
5    1 C(J1,J3)=C(J1,J3)+A(J1,J2)*B(J2,J3)
6    RETURN
7    END
```

2 - Sub-Rotina MULT2

```
// FOR
*ONE WORD INTEGERS
*LIST SOURCE PROGRAM
    SUBROUTINE MULT2 (A,B,C,N1,N2,N3)
    DIMENSION A(16,5),B(5,16),C(16,16)
C A=TRAP(NU,MUMAX) B=PROD(MUMAX,NU) C=ATS(NU,NU)
    DO 1 J1=1,N1
    DO 1 J3=1,N3
    C(J1,J3)=0.
    DO 1 J2=1,N2
1    C(J1,J3)=C(J1,J3)+A(J1,J2)*B(J2,J3)
    RETURN
    END
```

3 - Sub-Rotina MULT3

```
// FOR
*ONE WORD INTEGERS
*LIST SOURCE PROGRAM
    SUBROUTINE MULT3 (A,B,C,N1,N2,N3)
    DIMENSION A(5,16),B(16,3),C(5,3)
C A=API(MUMAX,NU) B=AMUV(NU,NL) C=DIJ(MUMAX,NL)
    DO 1 J1=1,N1
    DO 1 J3=1,N3
    C(J1,J3)=0.
    DO 1 J2=1,N2
1    C(J1,J3)=C(J1,J3)+A(J1,J2)*B(J2,J3)
    RETURN
    END
```

4 - Sub-Rotina MULT4

```
// FOR
*ONE WORD INTEGERS
*LIST SOURCE PROGRAM
    SUBROUTINE MULT4 (A,B,C,N1,N2,N3)
    DIMENSION A(5,25),B(25,3),C(5,3)
C A=PSIJ(MUMAX,MUMAX*(2*NFI-1)) B=DIJ2(MUMAX*(2*NFI-1),NL)
C C=PLOAI(MUMAX,NL)
    DO 1 J1=1,N1
    DO 1 J3=1,N3
    C(J1,J3)=0.
    DO 1 J2=1,N2
1    C(J1,J3)=C(J1,J3)+A(J1,J2)*B(J2,J3)
    RETURN
    END
```

B - Sub-Rotinas que tornam nulos os elementos de uma matriz.

1 - Sub-Rotina CLEA1

```
// FOR
*ONE WORD INTEGERS
*LIST SOURCE PROGRAM
    SUBROUTINE CLEA1 (A,M,N)
    DIMENSION A(160,48)
C A=TS(NU*NF,NU*NFI)
1|   DO 1 J=1,M
2|   DO 1 K=1,N
3|   1 A(J,K)=0.
4|   RETURN
5|   END
```

2 - Sub-Rotina CLEA2

```
// FOR
*ONE WORD INTEGERS
*LIST SOURCE PROGRAM
    SUBROUTINE CLEA2 (A,M,N)
    DIMENSION A(434,3)
C A=APMOV(MUT*(NF+2*NFI-2),NL)
    DO 1 J=1,M
    DO 1 K=1,N
1|   A(J,K)=0.
    RETURN
    END
```

3 - Sub-Rotina CLEA3

```
// FOR
*ONE WORD INTEGERS
*LIST SOURCE PROGRAM
    SUBROUTINE CLEA3 (A,M,N)
    DIMENSION A(60,15)
C A=PSIHB(MUMAX*(NF+NFI-1),MUMAX*NFI)
    DO 1 J=1,M
    DO 1 K=1,N
1|   A(J,K)=0.
    RETURN
    END
```

C - Sub-Rotinas que transferem os elementos de uma matriz para outra.

(listagem na outra folha)

1 - Sub-Rotina COME1

```
// FOR
*ONE WORD INTEGERS
*LIST SOURCE PROGRAM
    SUBROUTINE COME1(A,I,J,B,K,L,M,N)
    INTEGER G,H
    DIMENSION A(31,16),B(5,16)
C A=P(MUT,NU) B=API(MUMAX,NU)
1   DO 1 G=1,M
2   DO 1 H=1,N
3   KG1=K+G-1
4   LH1=L+H-1
5   IG1=I+G-1
6   JH1=J+H-1
7   1 B(KG1,LH1)=A(IG1,JH1)
8   RETURN
9   END
```

2 - Sub-Rotina COME2

```
// FOR
*ONE WORD INTEGERS
*LIST SOURCE PROGRAM
    SUBROUTINE COME2(A,I,J,B,K,L,M,N)
    INTEGER G,H
    DIMENSION A(130,15),B(5,5)
C A=PS(MUAC(NP+1)*NF,MUMAX*NFI) B=APS(MUMAX,MUMAX)
    DO 1 G=1,M
        DO 1 H=1,N
        KG1=K+G-1
        LH1=L+H-1
        IG1=I+G-1
        JH1=J+H-1
1   B(KG1,LH1)=A(IG1,JH1)
    RETURN
    END
```

3 - Sub-Rotina COME4

Obs: A sub-rotina COME3 do programa original
foi excluida.

```
// FOR
*ONE WORD INTEGERS
*LIST SOURCE PROGRAM
    SUBROUTINE COME4(A,I,J,B,K,L,M,N)
    INTEGER G,H
    DIMENSION A(160,3),B(16,3)
C A=LOAD(NU*NF,NL) B=AMOV(NU,NL)
    DO 1 G=1,M
        DO 1 H=1,N
        KG1=K+G-1
        LH1=L+H-1
        IG1=I+G-1
        JH1=J+H-1
1   B(KG1,LH1)=A(IG1,JH1)
    RETURN
    END
```

4 - Sub-Rotina COME5

```
// FOR
*ONE WORD INTEGERS
*LIST SOURCE PROGRAM
    SUBROUTINE COME5(A,I,J,B,K,L,M,N)
    INTEGER G,H
    DIMENSION A(5,3),B(310,3)
C A=DIJ(MUMAX,NL) B=PMOV(MUT*NF,NL)
    DO 1 G=1,M
        DO 1 H=1,N
        KG1=K+G-1
        LH1=L+H-1
        IG1=I+G-1
        JH1=J+H-1
1   B(KG1,LH1)=A(IG1,JH1)
    RETURN
    END
```

5 - Sub-Rotina COME6

```
// FOR
*ONE WORD INTEGERS
*LIST SOURCE PROGRAM
    SUBROUTINE COME6(A,I,J,B,K,L,M,N)
    INTEGER G,H
    DIMENSION A(310,3),B(50,3)
C A=PMOV(MUT*NF,NL) B=BMOV(MUMAX*NF,NL)
    DO 1 G=1,M
    DO 1 H=1,N
    KG1=K+G-1
    LH1=L+H-1
    IG1=I+G-1
    JH1=J+H-1
1 B(KG1,LH1)=A(IG1,JH1)
    RETURN
END
```

6 - Sub-Rotina COME7

```
// FOR
*ONE WORD INTEGERS
*LIST SOURCE PROGRAM
    SUBROUTINE COME7(A,I,J,B,K,L,M,N)
    INTEGER G,H
    DIMENSION A(50,3),B(434,3)
C A=BMOV(MUMAX*NF,NL) B=APMOV(MUT*(NF+2*NFI-2),NL)
    DO 1 G=1,M
    DO 1 H=1,N
    KG1=K+G-1
    LH1=L+H-1
    IG1=I+G-1
    JH1=J+H-1
1 B(KG1,LH1)=A(IG1,JH1)
    RETURN
END
```

7 - Sub-Rotina COME8

```
// FOR
*ONE WORD INTEGERS
*LIST SOURCE PROGRAM
    SUBROUTINE COME8(A,I,J,B,K,L,M,N)
    INTEGER G,H
    DIMENSION A(130,15),B(60,15)
C A=PS(MUAC(NP+1)*NF,MUMAX*NFI) B=PSIHB(MUMAX*(NF+NFI-1),MUMAX*NFI)
    DO 1 G=1,M
    DO 1 H=1,N
    KG1=K+G-1
    LH1=L+H-1
    IG1=I+G-1
    JH1=J+H-1
1 B(KG1,LH1)=A(IG1,JH1)
    RETURN
END
```

8 - Sub-Rotina COME9

```
// FOR
*ONE WORD INTEGERS
*LIST SOURCE PROGRAM
    SUBROUTINE COME9(A,I,J,B,K,L,M,N)
    INTEGER G,H
    DIMENSION A(60,15),B(5,25)
C A=PSIHB(MUMAX*(NF+NFI-1),MUMAX*NFI) B=PSIJ(MUMAX,MUMAX*(2*NFI-1))
    DO 1 G=1,M
    DO 1 H=1,N
    KG1=K+G-1
    LH1=L+H-1
    IG1=I+G-1
    JH1=J+H-1
1 B(KG1,LH1)=A(IG1,JH1)
    RETURN
END
```

9 - Sub-Rotina COM10

Obs: Exclue-se aqui um dos caracteres do nome da sub-rotina pela limitação imposta pelo sistema de computação utilizado.

```
// FOR
*ONE WORD INTEGERS
*LIST SOURCE PROGRAM
  SUBROUTINE COM10(A,I,J,B,K,L,M,N)
    INTEGER G,H
    DIMENSION A(5,5),B(5,25)
C A=PROV2(MUMAX,MUMAX) B=PSIJ(MUMAX,MUMAX*(2*NFI-1))
    DO 1 G=1,M
    DO 1 H=1,N
      KG1=K+G-1
      LH1=L+H-1
      IG1=I+G-1
      JH1=J+H-1
  1   B(KG1,LH1)=A(IG1,JH1)
    RETURN
  END
```

10 - Sub-Rotina COM11

(mesma observação da sub-rotina anterior)

```
// FOR
*ONE WORD INTEGERS
*LIST SOURCE PROGRAM
  SUBROUTINE COM11(A,I,J,B,K,L,M,N)
    INTEGER G,H
    DIMENSION A(434,3),B(25,3)
C A=APMOV(MUT*(NF+2*NFI-2),NL) B=DIJ2(MUMAX*(2*NFI-1),NL)
    DO 1 G=1,M
    DO 1 H=1,N
      KG1=K+G-1
      LH1=L+H-1
      IG1=I+G-1
      JH1=J+H-1
  1   B(KG1,LH1)=A(IG1,JH1)
    RETURN
  END
```

11 - Sub-Rotina COM12

(mesma observação das sub-rotinas anteriores)

```
// FOR
*ONE WORD INTEGERS
*LIST SOURCE PROGRAM
  SUBROUTINE COM12(A,I,J,B,K,L,M,N)
    INTEGER G,H
    DIMENSION A(5,3),B(310,3)
C PLOAI(MUMAX,NL) B=PLOAD(MUT*NF,NL)
    DO 1 G=1,M
    DO 1 H=1,N
      KG1=K+G-1
      LH1=L+H-1
      IG1=I+G-1
      JH1=J+H-1
  1   B(KG1,LH1)=A(IG1,JH1)
    RETURN
  END
```

D = Sub-Rotinas para transposição de matrizes,
onde as transpostas são armazenadas em novas matrizes.

(listagem na próxima página)

1 - Sub-Rotina TRAN

```
// FOR
*ONE WORD INTEGERS
*LIST SOURCE PROGRAM
    SUBROUTINE TRAN (A,B,M,N)
        DIMENSION A(5,16),B(16,5)
C A=AP(MUMAX,NU) B=TRAP(NU,MUMAX)
1|   DO 1 K=1,N
2|   DO 1 J=1,M
3|   1 B(K,J)=A(J,K)
4|   RETURN
5|   END
```

2 - Sub-Rotina TRAN1

```
// FOR
*ONE WORD INTEGERS
*LIST SOURCE PROGRAM
    SUBROUTINE TRAN1(A,B,M,N)
        DIMENSION A(5,5),B(5,5)
C A=PROV1(MUMAX,MUMAX) B=PROV2(MUMAX,MUMAX)
        DO 1 J=1,M
        DO 1 K=1,N
1|   1 B(K,J)=A(J,K)
        RETURN
1|   END
```

E - Sub-Rotina para adição de matrizes.

Obs: Esta sub-rotina foi obtida como adaptação
da sub-rotina COME3 do programa original.

1 - Sub-Rotina ADDC

```
// FOR
*ONE WORD INTEGERS
*LIST SOURCE PROGRAM
    SUBROUTINE ADDC(A,I,J,B,K,L,M,N)
    INTEGER G,H
    DIMENSION A(16,16),B(160,48)
C A=ATS(NU,NU) B=TS(NU*NF,NU*NFI)
1|   DO 1 G=1,M
2|   DO 1 H=1,N
3|   KG1=K+G-1
4|   LH1=L+H-1
5|   IG1=I+G-1
6|   JH1=J+H-1
7|   1 B(KG1,LH1)=B(KG1,LH1)+A(IG1,JH1)
8|   RETURN
9|   END
```

F - Sub-Rotina para rearranjar a matriz de
rigidez do edifício TS .

1 - Sub-Rotina HALF

```
// FOR
*ONE WORD INTEGERS
*LIST SOURCE PROGRAM
    SUBROUTINE HALF(A,NF,NU,NFI)
    DIMENSION A(160,48)
C A=TS(NU*NF,NU*NFI)
1|   DO 1 J=1,NF
2|   DO 1 K=2,NU
3|   JINUK=(J-1)*NU+K
4|   K1=K-1
5|   NUNFI=NU*NFI
6|   DO 2 I=K,NUNFI
7|   IK1=I-K+1
8|   2 A(JINUK,IK1)=A(JINUK,I)
9|   DO 3 I=1,K1
10|   NUNFI=NU*NFI-I+1
11|   3 A(JINUK,NUNFI)=0.
12|   1 CONTINUE
13|   RETURN
14|   END
```

G - Sub-Rotina para solução do sistema de
equações TS D = LOAD

1 - Sub-Rotina SOLVE

```
// FOR
*ONE WORD,INTEGERS
*LIST SOURCE PROGRAM
SUBROUTINE SOLVB(A,B,HB,N,NL)
INTEGER HB
DIMENSION A(160,48),B(160,3)
C A=TS(NU*NF,NU*NFI) B=LOAD(NU*NF,NL)
1 IF(HB-1)17,2,1
2 DO 3 K=1,N
3 DO 3 L=1,NL
3 B(K,L)=B(K,L)/A(K,1)
GO TO 17
1 NHB1=N-HB+1
DO 4 K=1,NHB1
K1=K+1
KHB1=K+HB-1
DO 4 I=K1,KHB1
IK1=I-K+1
DO 5 L=1,NL
5 B(I,L)=B(I,L)-B(K,L)*A(K,IK1)/A(K,1)
KHB1=K+HB-1
DO 6 J=1,KHB1
IKJ=I-K+J
6 A(I,J)=A(I,J)-A(K,IKJ)*A(K,IK1)/A(K,1)
4 CONTINUE
IF(HB-2)17,8,7
7 NHB2=N-HB+2
N1=N-1
DO 9 K=NHB2,N1
K1=K+1
DO 9 I=K1,N
IK1=I-K+1
NI1=N-I+1
DO 10 L=1,NL
10 B(I,L)=B(I,L)-B(K,L)*A(K,IK1)/A(K,1)
DO 11 J=1,NI1
IKJ=I-K+J
11 A(I,J)=A(I,J)-A(K,IKJ)*A(K,IK1)/A(K,1)
9 CONTINUE
8 DO 12 L=1,NL
B(N,L)=B(N,L)/A(N,1)
IF(HB-2)17,14,13
13 N1=N-1
NHB2=N-HB+2
DO 14 IX=NHB2,N1
I=NHB2-IX+NI1
SOM=0.
NI1=N-I+1
DO 15 J=2,NI1
IJ1=I+J-1
15 SOM=SOM+A(I,J)*B(IJ1,L)
18 B(I,L)=(B(I,L)-SOM)/A(I,1)
14 NHB1=N-HB+1
DO 19 IY=1,NHB1
I=NHB1-IY+1
SGM=0.
DO 20 J=2,HB
IJ1=I+J-1
16 SOM=SGM+A(I,J)*B(IJ1,L)
19 B(I,L)=(B(I,L)-SOM)/A(I,1)
12 CONTINUE
17 RETURN
END
```

H - Programa UM

Monta a matriz de rigidez do edifício
e resolve o sistema de equações.
(listagem na próxima página)

1 - PROC1

```
// FOR
*ONE WORD INTEGERS
*I0CS(CARD,1403PRINTER)
*LIST SOURCE PROGRAM
1   INTEGER SMU(8),TYPE(8)
2   REAL LOAD(160,3)
3   DIMENSION ATS(16,16),AP(5,16),TRAP(16,5),PROD(5,16),TS(160,48),APS
4   1(5,5)
5   COMMON P(31,16),LOAD,PS(130,15),APMOV(434,3)
6   COMMON SMU,TYPE,MU(7),MUAC(8)
7   COMMON NF,NP,NL,NFI,NU,MUMAX,MUT
8   NP1=NP+1
9   IPS=MUAC(NP1)*NF
10  JPS=MUMAX*NFI
11  ILOAD=NU*NF
12  READ(2,1)((PS(I,J),J=1,JPS),I=1,IPS)
13  1 FORMAT(8F10.0/7F10.0)
14  READ(2,42)((P(I,J),J=1,NU),I=1,MUT)
15  READ(2,42)((LOAD(I,J),I=1,ILOAD),J=1,NL)
16  42 FORMAT(16F5.0)
17  CALL CLEA1(TS,NU*NF,NU*NFI)
18  DO 16 I=1,NP
19  I1=I+1
20  CALL COME1(P,SMU(I )+1,1,AP,1,1,MU(I),NU)
21  CALL TRAN(AP,TRAP,MU(I),NU)
22  DO 17 J=1,NF
23  DO 17 K=1,NFI
24  CALL COME2(PS,(MUAC(I1)-MU(I))*NF+(J-1)*MU(I)+1,(K-1)*MU(I)+1,APS,
25  11,1,MU(I),MU(I))
26  CALL MULTI(APS,AP,PROD,MU(I),MU(I),NU)
27  CALL MULT2(TRAP,PROD,ATS,NU,MU(I),NU)
28  CALL ADDC(ATS,1,1,TS,(J-1)*NU+1,(K-1)*NU+1,NU,NU)
29  17 CONTINUE
30  16 CONTINUE
31  CALL HALF(TS,NF,NU,NFI)
32  WRITE(5,18)
33  18 FORMAT(1X'CARGAMENTO EXTERNO'/1X'(SEGUNDO AS INCOGNITAS DESLOCAM
34  ENTOS DO PREDIO')//)
35  DO 101 I=1,ILOAD
36  101 WRITE(5,102)I,(LOAD(I,J),J=1,NL)
37  102 FORMAT(1X,I3,8E14.7/4X,8E14.7)
38  WRITE(5,100)
39  100 FORMAT('1')
40  WRITE(5,19)
41  19 FORMAT(1X'MATRIZ DE RIGIDEZ DOS PAINEIS'/1X'(NA ORDEM DA NUMERACAO
42  1 ADOTADA')//)
43  DO 103 I=1,IPS
44  103 WRITE(5,102)I,(PS(I,J),J=1,JPS)
45  WRITE(5,100)
46  WRITE(5,20)
47  20 FORMAT(1X'POSICAO DOS PAINEIS'/1X'(MATRIZ QUE TRANSFORMA DESLOCAME
48  NTOS'/1X'DO SISTEMA NOS DOS PAINEIS')//)
49  DO 105 I=1,MUT
50  105 WRITE(5,102)I,(P(I,J),J=1,NU)
51  WRITE(5,100)
52  CALL SOLVB(TS,LOAD,NU*NFI,NU*NF,NL)
53  CALL LINK (PROG2)
54  END
```

I - Programa DOIS

Monta a matriz dos deslocamentos do edifício transformando os relativos em absolutos e monta também a matriz dos deslocamentos dos painéis, onde os horizontais são relativos.

(listagem na próxima página)

1 - PROG2

```
// FOR
*ONE WORD INTEGERS
*IICCS(CARD,1403PRINTER)
*LIST SOURCE PROGRAM
1   INTEGER SMU(8),TYPE(8)
2   REAL LOAD(160,3)
3   DIMENSION PMOV(310,3),AMOV(16,3),API(5,16),BMOV(50,3),DIJ(5,3)
4   COMMON P(31,16),LOAD,PS(130,15),APMOV(434,3)
5   COMMON SMU,TYPE,MU(7),MUAC(8)
6   COMMON NF,NP,NL,NFI,NU,MUMAX,MUT
7   DO 22 I=1,NP
8   CALL COME1(P,SMU(I)+1,1,API,1,1,MU(I),NU)
9   DO 22 J=1,NF
10  CALL COME4(LOAD,(J-1)*NU+1,1,AMOV,1,1,NU,NL)
11  CALL MULT3(API,AMOV,DIJ,MU(I),NU,NL)
12  CALL COME5(DIJ,1,1,PMOV,SMU(I)*NF+(J-1)*MU(I)+1,1,MU(I),NL)
13  22 CONTINUE
14  CALL CLEA2(APMOV,MUT*(NF+2*NFI-2),NL)
15  DO 23 I=1,NP
16  CALL COME6(PMOV,SMU(I)*NF+1,1,BMOV,1,1,MU(I)*NF,NL)
17  CALL COME7(BMOV,1,1,APMOV,SMU(I)*(NF+2*NFI-2)+MU(I)*(NFI-1)+1,1,MU
18  1(I)*NF,NL)
19  23 CONTINUE
20  DO 24 J=2,NF
21  DO 24 I=1,3
22  DO 24 K=1,NL
23  J1NUI=(J-1)*NU+I
24  J2NUI=(J-2)*NU+I
25  LOAD(J1NUI,K)=LOAD(J1NUI,K)+LOAD(J2NUI,K)
26  WRITE(5,25)
27  25 FORMAT(1X'DESLOCAMENTOS ABSOLUTOS DOS ANDARES'/1X'(NA SEQUENCIA DA
1  1 NUMERACAO ADOTADA')//)
29  NUNF=NU*NF
30  DO 100 I=1,NUNF
31  100 WRITE(5,101)I,(LOAD(I,J),J=1,NL)
32  101 FORMAT(1X,I3,6E18.7)
33  WRITE(5,150)
34  150 FORMAT(1X'DESLOCAMENTOS DOS PAINEL'S/1X'(DESLOCAMENTOS HORIZONTAIS
35  1 RELATIVOS')//)
36  KI=0
37  DO 151 I=1,NP
38  WRITE(5,152)I
39  152 FORMAT(1X'DESLOCAMENTOS DO PAINEL'110/1X'(DESLOCAMENTOS NA NUMERAC
40  1AO ADOTADA')//)
41  MUNF=MU(I)*NF
42  DO 153 J=1,MUNF
43  KIJ=KI+J
44  153 WRITE(5,101)J,(PMOV(KIJ,K),K=1,NL)
45  KI=KI+MUNF
46  151 CONTINUE
47  CALL LINK (PROG3)
48  END
```

J - Programa TRÊS

Monta a matriz dos esforços nos painéis, transformando os esforços relativos (forças cortantes) em esforços absolutos.

- PROG3

```
// FOR
*ONE WORD INTEGERS
*IICCS(CARD,1403PRINTER)
*LIST SOURCE PROGRAM
1   INTEGER SMU(8),TYPE(8)
2   REAL LOAD(160,3)
3   DIMENSION PLOAD(310,3),PSIHB(60,15),PSIJ(5,25),PLOAT(5,3),PROV1(5,
15),PROV2(5,5),DIJ2(25,3)
4   COMMON P(31,16),LOAD,PS(130,15),APMOV(434,3)
5   COMMON SMU,TYPE,MU(7),MUAC(8)
6   COMMON NF,NP,NL,NFI,NU,MUMAX,MUT
7   DO 26 I=1,NP
8   I1=I+1
```

PAGE 12 LAIER J.

```

3 CALL CLEA3(PSIHB,MU(I)*(NF+NFI-1),MU(I)*NFI)
4 CALL COME8(PS,(MUAC(I1)-MU(I))*NF+1,1,PSIHB,(NFI-1)*MU(I)+1,1,MU(I)
5 1)*NF,MU(I)*NFI)
6 DO 27 J=1,NF
7 CALL COME9(PSIHB,(J+NFI-2)*MU(I)+1,1,PSIJ,1,(NFI-1)*MU(I)+1,MU(I),
8 1NFI*MU(I))
9 NFI1=NFI-1
10 DO 28 K=1,NFI1
11 CALL COME9(PSIHB,(J+NFI-K-2)*MU(I)+1,K*MU(I)+1,PROV1,1,1,MU(I),MU(
12 1I))
13 CALL TRAN1(PROV1,PROV2,MU(I),MU(I))
14 CALL COM10(PROV2,1,1,PSIJ,1,(NFI-K-1)*MU(I)+1,MU(I),MU(I))
15 28 CONTINUE
16 CALL COM11(APMOV,SMU(I)*(NF+2*NFI-2)+(J-1)*MU(I)+1,1,DIJ2,1,1,MU(I
17 1)*(2*NFI-1),NL)
18 CALL MULT4(PSIJ,DIJ2,PLOAI,MU(I),MU(I)*(2*NFI-1),NL)
19 CALL COM12(PLOAI,1,1,PLOAD,SMU(I)*NF+(J-1)*MU(I)+1,1,MU(I),NL)
20 27 CONTINUE
21 26 CONTINUE
22 DO 29 I=1,NP
23 NFI=NF-1
24 DO 30 J=1,NFI
25 J1=SMU(I)*NF+(J-1)*MU(I)+1
26 DO 31 K=1,NL
27 J1MU=J1+MU(I)
28 PLOAD(J1,K)=PLOAD(J1,K)-PLOAD(J1MU,K)
29 31 CONTINUE
30 30 CONTINUE
31 29 CONTINUE
32 WRITE(5,33)
33 FORMAT(1X'FORCA NOS PAINEIS'/1X'(FORCAS SEGUNDO OS DESLOCAMENTOS C
34 ONSIDERADOS')/1X'FORCAS HORIZONTAIS ABSULUTAS'///)
35 KI=1
36 DO 150 I=1,NP
37 WRITE(5,152)I
38 152 FORMAT(1X'FORCAS NO PAINEL'10)
39 MUNF=MU(I)*NF
40 DO 153 J=1,MUNF
41 KIJ=KI+J
42 153 WRITE(5,154)J,(PLOAD(KIJ,K),K=1,NL)
43 154 FORMAT(1X,13,3E18.7)
44 KI=KI+MUNF
45 150 CONTINUE
46 CALL EXIT
47 END

```

K - Programa Início

'Prepara os índices contadores da estrutura e dos
'painéis e prepara também os índices controladores

Obs: Dimensões das matrizes em cartões comentários

1 - Programa Início

```

// FOR
*ONE WORD INTEGERS
*IUCS(CARD,1403PRINTER)
*LIST SOURCE PROGRAM
INTEGER SMU(8),TYPE(8)
REAL LOAD(160,3)
COMMON P(31,16),LOAD,PS(130,15),APMOV(434,3)
COMMON SMU,TYPE,MU(7),MUAC(8)
COMMON NF,NP,NL,NFI,NU,MUMAX,MUT
*****DIMENSÕES DAS MATRIZES ENVOLVIDAS AO LONGO DO PROGRAMA*****
C SMU(NP+1) TYPE(NP+1) LOAD(NU*NF,NL) P(MUT,NU)
C PS(MUAC(NP+1)*NF,NFI*MUMAX)
C APMOV(MUT*(NF+2*NFI-2),NL) MU(NP) MUAC(NP+1) ATS(NU,NU)
C APS(MUMAX,MUMAX)
C AP(MUMAX,NU) TRAP(NU,MUMAX) PROD(MUMAX,NU) TS(NU*NF,NU*NFI)
C PMOV(MUT*NF,NL)
C AMOV(NU,NL) DIJ(MUMAX,NL) API(MUMAX,NU) BMOV(MUMAX*NF,NL)
C PLOAD(MUT*NF,NL)
C PSIHB(MUMAX*(NF+NFI-1),MUMAX*NFI) PSIJ(MUMAX,MUMAX*(2*NFI-1))
C PLOAI(MUMAX,NL)
C DIJ2(MUMAX*(2*NFI-1),NL) PROV1(MUMAX,MUMAX) PROV2(MUMAX,MUMAX)

```

PAGE 13 LAIER J.

```

1 ****
2      WRITE(5,100)
3      100 FORMAT('1')
4      WRITE(5,1000)
5      1000 FORMAT(10X'ANALISE PELO METODO STAMATO')
6      READ(2,1)NF,NP,NL,NFI,NU
7      1 FORMAT(5I10)
8      WRITE(5,11)
9      11 FORMAT(//8X'NF'8X'NP'8X'NL'7X'NFI'8X'NU'//)
10     WRITE(5,12)NF,NP,NL,NFI,NU
11     12 FORMAT(5I10)
12     MUAC(1)=0
13     SMU(1)=0
14     MUT=0
15     MUMAX=0
16     TYPE(1)=0
17     NP1=NP+1
18     DO 2 I=1,NP
19     I1=I+1
20     READ(2,3)MU(I),TYPE(I1)
21     3 FORMAT(2I10)
22     IF(TYPE(I1)-TYPE(I))4,5,4
23     5 MUAC(I1)=MUAC(I)
24     GO TO 6
25     4 MUAC(I1)=MUAC(I)+MU(I)
26     6 SMU(I1)=SMU(I)+MU(I)
27     IF(MU(I)-MUMAX)2,2,8
28     8 MUMAX=MU(I)
29     2 CONTINUE
30     MUT=SMU(NP1)
31     WRITE(5,13)
32     13 FORMAT(//7X'PAINEL'6X'MU(I)'2X'MUAC(I1)'3X'SMU(I1)'2X'TYPE(I1)'//
33     1)
34     DO 9 I=1,NP
35     I1=I+1
36     9 WRITE(5,15)I,MU(I),MUAC(I1),SMU(I1),TYPE(I1)
37     15 FORMAT(5I10)
38     WRITE(5,14)
39     14 FORMAT(//8X'MUMAX'7X'MUT'//)
40     WRITE(5,10)MUMAX,MUT
41     10 FORMAT(3X2I10)
42     WRITE(5,100)
43     CALL LINK (PROG1)
        END

```

(Fim da listagem)

4 - Linhas 8 e 9 - Retorno ao programa de origem e fim da execução da sub-rotina.

5.7.4 - Sub-Rotina TRAN

1 - Linhas 1 e 2 - Comandos iterativos em K e J.

2 - Linha 3 - Torna o elemento B(K,J) da matriz B igual ao elemento A(J,K) da matriz A.

3 - Linhas 4 e 5 - Retorno do programa de origem e fim da execução da sub-rotina.

5.7.5 - Sub-Rotina ADDC

1 - Linhas 1 e 2 - Comandos iterativos em G e H.

2 - Linhas 3 até 6 - Rearranjo de índices.

3 - Linha 7 - Adiciona, segundo a reorganização dos índices, um elemento da matriz A a um elemento da matriz B, armazenando o resultado na matriz B.

4 - Linhas 8 e 9 - Retorno ao programa de origem e fim da execução da sub-rotina.

5.7.6 - Sub-Rotina HALF

1 - Linhas 1 e 2 - Comandos iterativos em J e K.

2 - Linhas 3, 4 e 5 - Obtem as variáveis auxiliares J1NUK, K1 e NUNFI.

3 - Linha 6 - Comando iterativo em I.

4 - Linha 7 - Obtem a variável auxiliar IK1.

5 - Linha 8 - Rearrange a matriz A composta de NF*NFI sub-matrizes A(I,J), de modo a deixar as diagonais principais de A(I,1) na primeira coluna de A, fazendo o elemento A(J1NUK,IK1) igual ao elemento A(J1NUK,I).

6 - Linha 9 - Novo comando iterativo em I.

- 7 - Linha 10 - Obtem a variável auxiliar NUNF1.
- 8 - Linha 11 - Torna nulo o elemento à direita A(J1NUK, NUNF1).
- 9 - Linhas 13 e 14 - Retorno ao programa de origem e fim da execução da sub-rotina.

5.7.7 - Sub-Rotina SOLVE

- 1 - Linha 1 - Testa o número de colunas da matriz A ; caso for nulo volta ao programa de origem, se for um passa ao comando 2 (linha 2), executando a solução de modo imediato (linhas 2, 3 e 4), voltando em seguida ao programa de origem (linha 5); caso for mais que um passa ao comando 1 (linha 6).
- 2 - Linhas 6 até 32 - Efetua a triangulação da matriz A , tendo em vista que esta matriz é fornecida em só mente meia banda por coluna.
- 3 - Linhas 33 até 54 - Resolve o sistema de equações tendo por base a matriz dos coeficientes A já triangular, ainda assim em forma de meia banda por coluna.
- 4 - Linhas 55 e 56 - Retorno ao programa de origem e fim da execução da sub-rotina.

5.7.8 - Programa UM (PROG1)

- 1 - Linhas 1 até 7 - Comandos que especificam matrizes e variáveis.
- 2 - Linhas 8 até 11 - Obtem as variáveis auxiliares NP1, IPS, JPS e ILOAD
- 3 - Linhas 12 até 16 - Lê as matrizes de rigidez dos painéis PS , posição dos painéis P , e carregamento externo LOAD .
- 4 - Linha 17 - Chama a sub-rotina CLEA1 para a matriz de rigidez do edifício TS .

- 5 - Linhas 18 até 30 - Monta a matriz de rigidez do edifício TS a partir da dos painéis PS e de posição dos painéis P. É efetuado andar por andar com base nas expressões (3.25) e (3.26).
- 6 - Linha 31 - Chama a sub-rotina HALF para a matriz de rigidez do edifício TS, para posterior intervenção da sub-rotina SOLVB.
- 7 - Linhas 32,33 e 34 - Imprime cabeçalho para a posterior impressão da matriz do carregamento externo.
- 8 - Linhas 35 até 38 - Imprime matriz do carregamento externo LOAD, onde cada coluna corresponde a um carregamento, numerando as linhas.
- 9 - Linhas 39 até 42 - Imprime cabeçalho para posterior impressão das matrizes de rigidez dos painéis.
- 10- Linhas 43 e 44 - Imprime as matrizes de rigidez dos painéis PS, linha por linha numerando as mesmas.
- 11- Linhas 45 até 48 - Imprime cabeçalho para posterior impressão da matriz de posição dos painéis.
- 12- Linhas 49,50 e 51- Imprime a matriz de posição dos painéis P, linha por linha, numerando as mesmas.
- 13- Linha 52 - Chama a sub-rotina SOLVB para o sistema de equações $TS \times D = LOAD$.
- 14- Linha 53 - Chama o programa dois (PROG2).
- 15- Linha 54 - Fim da execução do programa UM.

5.7.9 - Programa DOIS (PROG2)

- 1 - linhas 1 até 6 - Comandos que especificam matrizes e variáveis.
- 2 - Linhas 7 até 13 - Obtem a matriz dos deslocamentos dos painéis PMOV a partir da do edifício, contidas em LOAD, com base na expressão (3.28), andar por andar.
- 3 - Linha 14 - Chama a sub-rotina CLEA2 para a matriz auxiliar APMOV, que vem generalizar o uso da expressão (3.29).

- 4 - Linhas 15 até 19 - Obtem a matriz APMOV , onde são acrescentados deslocamentos nulos para dois andares fictícios acima do topo e abaixo da base do edifício.
- 5 - Linhas 20 até 25 - Transforma os deslocamentos relativos do edifício, contidos em LOAD , em deslocamentos absolutos na própria LOAD , efetuando somas acumuladas da base para o topo do edifício.
- 6 - Linhas 26,27 e 28- Imprime cabeçalho para os deslocamentos absolutos dos andares contidos em LOAD .
- 7 - Linhas 29 até 32 - Imprime a matriz LOAD , onde cada coluna corresponde a um carregamento, numerando as linhas.
- 8 - Linhas 33,34 e 35- Imprime cabeçalho para os deslocamentos dos painéis contidos em PMOV .
- 9 - Linhas 36 até 46 - Imprime cabeçalhos intermediários para os deslocamentos dos painéis,e, em seguida, os deslocamentos, observando,porém, que os deslocamentos horizontais são aí relativos.
- 10~ Linha 47 - Chama o programa TRES.
- 11 - Linha 48 - Fim da execução do programa 2.

5.7.10 - Programa TRÊS (PROG3)

- 1 - Linhas 1 até 21 - Obtem a matriz dos esforços nos painéis PLOAD , com base na expressão (3,29) , andar por andar, fazendo uso da matriz APMOV, que generaliza o uso de tal expressão.
- 2 - Linhas 22 até 31 - Transforma os esforços relativos (força constante) em esforços absolutos, fazendo somas acumuladas do topo para a base do painel.
- 3 - Linhas 32,33 e 34- Imprime cabeçalhos para posterior impressão da matriz dos esforços nos painéis.
- 4 - Linhas 35 até 45 - Imprime a matriz dos esforços nos painéis PLOAD , painel por painel e respectivos cabeçalhos intermediários.

- 5 - Linhas 46 e 47 - Término do programa global e fim do programa 3.

5.7.11 - Programa Início

- 1 - Linhas 1 até 4 - Imprime o título do trabalho.
- 2 - Linhas 5 e 6 - Leitura dos índices contadores da estrutura (NF, NP, NL, NFI e NU).
- 3 - Linhas 7 e 8 - Imprime cabeçalho para posterior impressão dos índices contadores da estrutura.
- 4 - Linhas 9 e 10 - Imprime índices contadores da estrutura (NF, NP, NL, NFI e NU).
- 5 - Linhas 11 até 15 - Torna nulos os primeiros valores dos índices contadores dos painéis MU, SMU e TYPE. Torna nulos também os índices controladores MUT e MUMAX.
- 6 - Linha 16 - Obtem variável auxiliar NP1.
- 7 - Linhas 17 até 28 - Lê os índices contadores dos painéis MU e TYPE e gera os novos índices contadores MUAC e SMU e o índice controlador MUMAX.
- 8 - Linha 29 - Obtem o índice controlador MUT.
- 9 - Linhas 30,31 e 32 - Imprime cabeçalhos para os índices contadores dos painéis.
- 10- Linhas 33 até 36 - Imprime índices contadores dos painéis segundo a numeração dos mesmos.
- 11- Linhas 37 e 38 - Imprime cabeçalho para os índices controladores.
- 12- Linhas 39,40 e 41 - Imprime índices controladores MUMAX e MUT.
- 13- Linha 42 - Chama o programa UM.
- 14- Linha 43 - Término do programa início.

CAPÍTULO VI

OBSERVAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES

O presente trabalho, como já se salientou, tem por objetivo principal apresentar uma solução tridimensional para as estruturas de edifícios altos sujeitas às variações de temperatura. Neste sentido sugere-se o procedimento desenvolvido por STAMATO e SMITH¹³, no qual, conforme ficou constatado, o problema em questão pode também ser enquadrado. A escolha deste procedimento na solução do problema aqui tratado está aliada ao fato de que o mesmo, além de conduzir a um sistema de equações bem condicionado, não aborda o problema através de um número proibitivo de parâmetros, tendo em vista, naturalmente, o processamento em computadores de pequeno porte (utilizou-se no desenvolvimento deste trabalho o computador IBM-1130).

De início convém salientar que as soluções planas sugeridas por KHAN e FINTEL⁶, expostas no capítulo II, não se aplicam integralmente aos dois exemplos apresentados, pois admite-se, a priori, que os pórticos do edifício têm no mínimo quatro prumadas de pilares (fig. 2.1); desta forma, somente o pórtico que se constitui no painel ① do primeiro exemplo pode ser aí enquadrado. Além disso, não se cogita naquelas soluções o fato da coluna interna estar conectada diretamente a duas ou mais colunas externas (exposta), como acontece nos dois exemplos apresentados. Contudo, a hipótese básica de considerar a estrutura do edifício como um conjunto de estruturas planas independentes é viável, pelo menos na obtenção de alguns resultados, conforme evidencia-se pelos resultados encontrados.

Constata-se, pelos dois exemplos apresentados, que a análise tridimensional exibe alguns resultados sensivelmente diferentes dos apresentados pelas análises planas, como por exemplo, deslocamentos verticais e forças normais, tanto nas colunas internas do primeiro exemplo (figs. 4.2 e 4.3), como na coluna interna do segundo exemplo (figs. 4.20 e 4.21). Obviamente, tais discrepâncias provêm do fato de que nas análises planas negligenciam-se as interações verticais que ocorrem entre os painéis que contêm estas colunas, que são, por outro lado, consideradas na análise tridimensional. O segundo exemplo exibe deslocamentos horizontais obtidos na análise tridimensional bastante discrepantes dos obti-

dos nas análises planas (fig. 4.16). Estas últimas discrepâncias encontram justificativa no fato de que nas análises planas também negligenciam-se as interações horizontais entre os painéis.

Pelos resultados obtidos no primeiro exemplo, verifica-se (§ 4.2) que os deslocamentos verticais e forças normais nas colunas internas encontrados na análise tridimensional podem ser alcançados, por excesso, superpondo os resultados obtidos nas análises planas dos painéis concorrentes nestas colunas. Nas demais colunas os deslocamentos verticais e forças normais nas análises planas são bastante próximos dos obtidos na análise tridimensional. As distorções dos quadros divisórios na análise tridimensional também apresentam discrepâncias em relação às obtidas nas análises planas. Todavia, considerando nas colunas internas a superposição dos resultados obtidos nas análises planas, com respeito aos deslocamentos verticais, resultam distorções bastante próximas das obtidas na análise tridimensional.

No segundo exemplo (§ 4.3), com relação aos deslocamentos verticais e forças normais nas colunas, constatam-se também os mesmos fatos observados para as colunas no primeiro exemplo. Todavia, tais constatações no segundo exemplo não encontram as mesmas justificativas apresentadas no primeiro exemplo (simulação com o problema de estaqueamentos). Conforme já se argumentou (§ 4.3) uma justificativa destas constatações no segundo exemplo constitui algo bastante difícil. Este fato vem corroborar, de certa forma, o objetivo principal do presente trabalho (sugerir uma análise tridimensional para as estruturas de edifícios altos sujeitas às variações de temperatura).

A análise tridimensional apresenta na prática um grande inconveniente, que se constitui na necessidade de utilização de computadores, pois o número de parâmetros aí envolvidos é bastante elevado, sendo impraticável a utilização de procedimentos manuais, mesmo no tratamento de estruturas de pequeno porte. Por outro lado, as análises planas podem ser levadas a efeito através de procedimentos manuais em um bom número de estruturas (vide cap. II) e, de acordo com as constatações observadas nos exemplos apresentados, os seus resultados criteriosamente combinados podem levar a uma boa aproximação dos resultados obtidos na análise tridimensional.

Retomando as hipóteses adotadas por KHAN e FINTEL⁶ e acrecentando as constatações observadas nos exemplos apresentados, um bom número de estruturas de edifícios podem ser abordadas através de análises planas, sem a necessidade de se recorrer à

análise tridimensional.

Seja por exemplo a estrutura de um edifício, cuja planta mostra-se na figura 6.1. Nesta figura indica-se por número dentro de pequenos círculos os painéis e por letras maiúsculas indexadas as colunas.

Os deslocamentos verticais e forças normais nas colunas I_1 e I_4 podem ser obtidos superpondo os correspondentes resultados obtidos nas análises planas dos painéis ①, ② e ⑤. Convém salientar que a análise plana do painel ① admite o procedimento exposto no capítulo II. Os deslocamentos verticais e forças normais nas colunas I_2 e I_3 são os próprios resultados obtidos nas análises planas dos painéis ③ e ④, respectivamente. Os resultados das colunas C_1 , C_2 , C_3 e C_4 são alcançados admitindo-as isoladas do restante da estrutura: deslocamentos devidos unicamente às variações de temperatura e forças normais nulas. Finalmente os deslocamentos verticais e forças normais nas colunas E_1 , E_2 , E_3 , E_4 e E_5 são os próprios resultados obtidos nas análises planas dos painéis ②, ③, ④, ⑤ e ① analogamente são obtidos os resultados das colunas E_7 , E_8 , E_9 , E_{10} e E_5 .

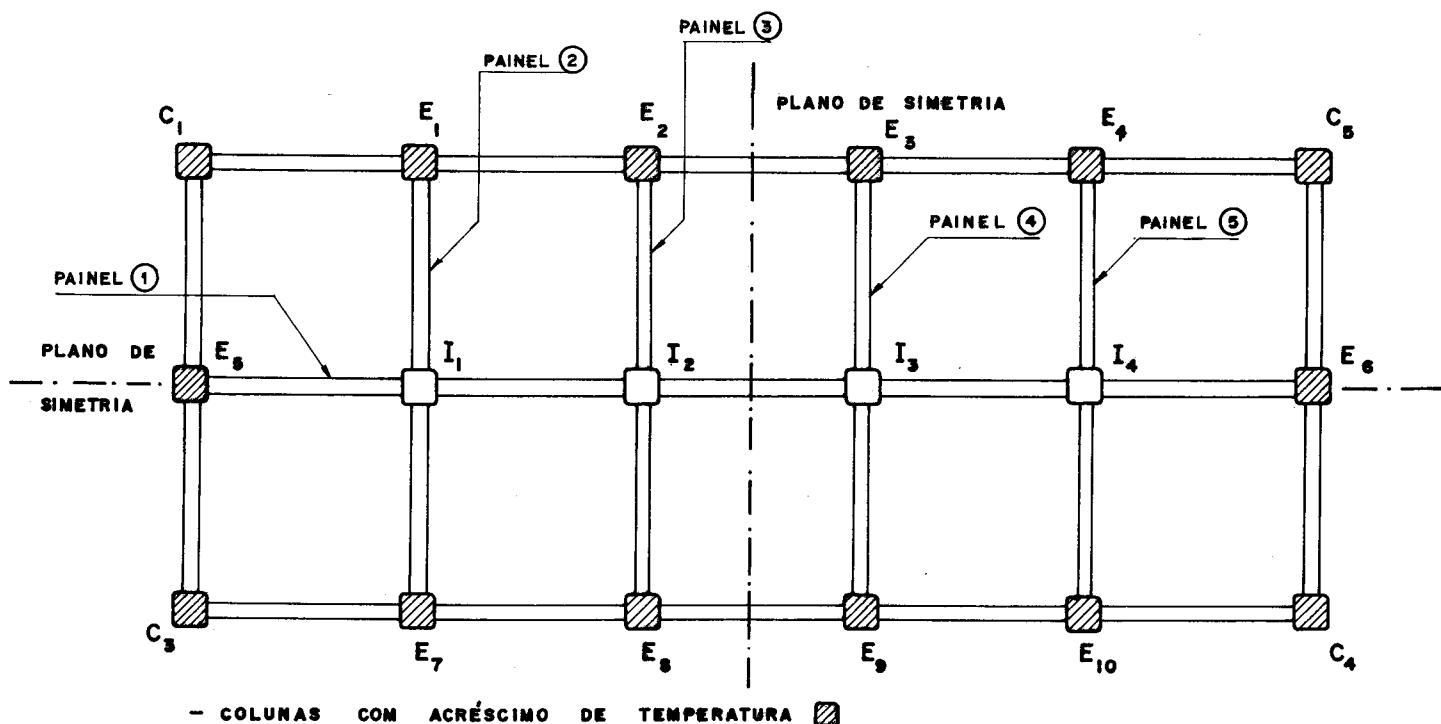


FIG. 6.1 - PLANTA DE UMA ESTRUTURA DE EDIFÍCIO COM 2 PLANOS ORTOGONIAIS DE SIMETRIA

Um outro exemplo que merece atenção é o da estrutura de um edifício, cuja planta mostra-se na figura 6.2. Nesta estrutura as análises planas podem ser levadas a efeito através do procedimento proposto por KRAN E FINTEL⁶.

Os deslocamentos verticais e forças normais nas colunas I₁, I₂, I₃ e I₄ são obtidos superpondo os correspondentes resultados obtidos nas análises planas dos painéis nelas concorrentes. Os deslocamentos verticais e forças normais nas demais colunas, com exceção das de canto, são os próprios resultados obtidos nas análises planas dos painéis que as contém, obviamente só considerando os painéis perpendiculares aos periféricos. Para as colunas de canto os resultados são alcançados admitindo-as isoladas do restante da estrutura: deslocamentos verticais devidos unicamente às variações de temperatura e forças normais nulas.

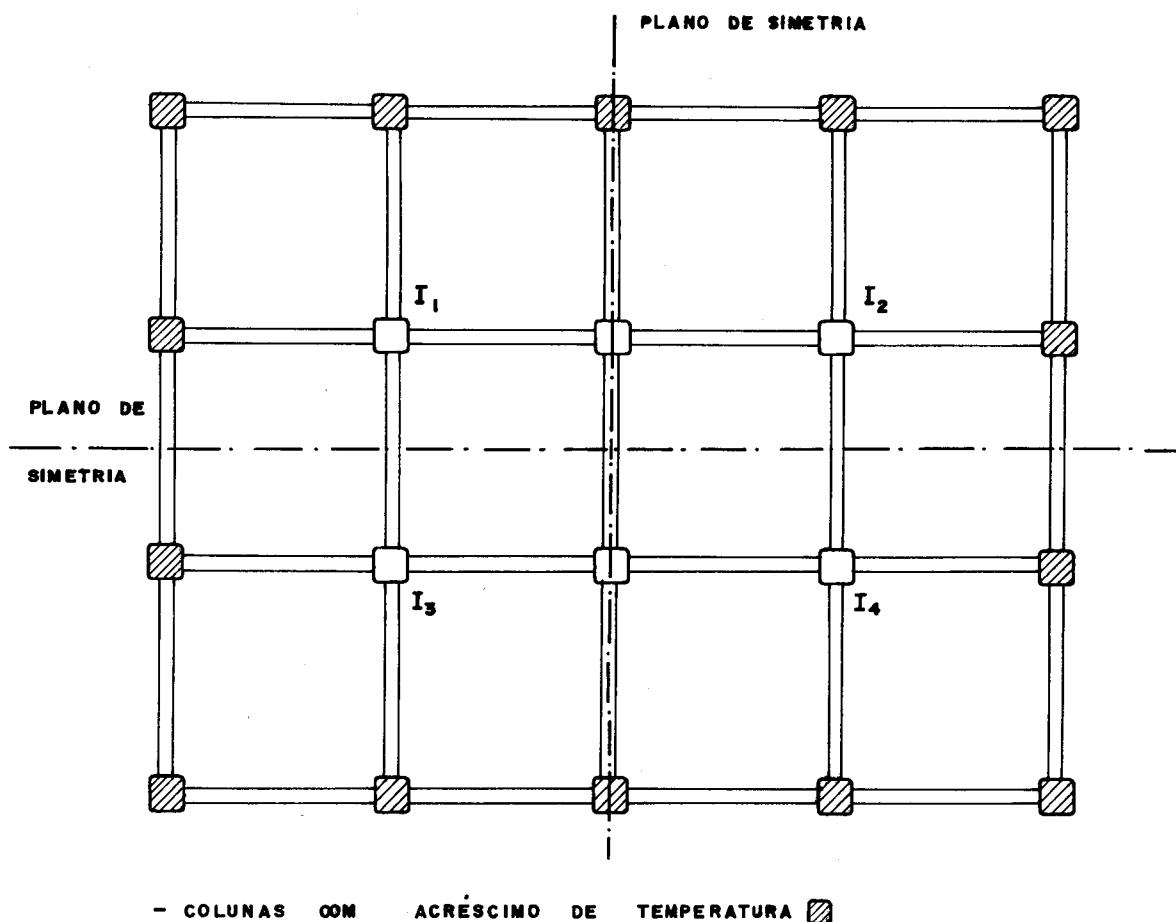


FIG. 6.2 - PLANTA DE UMA ESTRUTURA DE EDIFÍCIO COM 2 PLANOS ORTOGONIAIS DE SIMETRIA

Como se percebe, a superposição de análises planas apresentada para a estrutura da figura 6.2 pode ser estendida a outras estruturas com maior número de pilares, obviamente, respeitando a simetria com respeito a dois planos ortogonais e que proveniente das variações de temperatura não apresentem deslocamentos horizontais.

Nas estruturas que não possuem dois planos ortogonais de simetria o procedimento apresentado, a rigor, não se aplica. Todavia em estruturas maiores os deslocamentos horizontais podem ser desprezíveis, pois estes deslocamentos provêm da assimetria das partes mais externas da estrutura, por outro lado, o esforço horizontal oriundo da assimetria destas partes distribui-se em toda a estrutura através das lajes. Desta forma, percebe-se que para as estruturas assimétricas de grande porte a superposição de análises planas exposta para as estruturas com dois planos ortogonais de simetria também se aplica, podendo levar a ligeiras discrepâncias.

Finalizando convém salientar que neste trabalho não foi dada nenhuma atenção às forças cortantes nas vigas, que de acordo com WEIDLINGER¹ (3º aspecto-CAP-I) assumem importância considerável. Esta omissão justifica-se tendo em vista que qualitativamente tais esforços têm ao longo da altura do edifício o mesmo comportamento das distorções dos quadros divisórios. Com isto, tal omissão não vem afetar os objetivos do presente trabalho (sugerir análise tridimensional para o estudo dos efeitos das variações de temperatura em estruturas de edifícios altos).

BIBLIOGRAFIA

- 1 - WEIDLINGER, P. - "Temperature Stresses in tall reinforced concrete buildings", Civil Engineering A.S.C.E., ago/1964, pp. 58.
- 2 - FINTEL, M. e KHAN, F.R. - "Effects of column exposure in tall structures - Temperature variations and their effects", jul. A.C.I., vol. 62, dez/1965, nº 12, pp. 1554.
- 3 - WEIDLINGER, P. - op. cit. (1), pp. 58-60.
- 4 - FINTEL, M. e KHAN, F.R. - op. cit. (2), pp. 1550-1553.
- 5 - WEIDLINGER, P. - op. cit. (1), pp. 60-61.
- 6 - KHAN, F.R. e FINTEL, M. - " Effects of column esposure in tall structures - Analysis for length changes of exposed columns", jul. A.C.I., vol. 63, ago/1966, nº 8, pp. 843-854.
- 7 - KHAN, F.R. e FINTEL, M. - op. cit. (6), pp. 844.
- 8 - FINTEL, M. e KHAN, F.R. - op. cit. (2), pp. 1534-1540.
- 9 - WEIDLINGER, P. - op. cit. (1), pp. 59-60.
- 10- FINTEL, M. e KHAN, F.R. - op. cit. (2), pp. 1540-1550.
- 11- WEIDLINGER, P. - op. cit. (1), pp. 61.
- 12- GERE, J.M. e WEAVER, W.Jr. - "Analisis de estructuras reticulares", Compañia Editorial Continental, S.A. - Mexico-Espanha, pp. 225-345.
- 13- STAMATO, M.C. e SMITH, B.S. - "Análise aproximada de estruturas tridimensionais de edifícios elevados", E.E.S.C. 1968.
- 14- WEIDLINGER, P. - op. cit. (1) pp. 60-61.
- 15- KHAN, F.R. e FINTEL, M. - op. cit. (6), pp. 843-854.
- 16- GERE, J.M. e WEAVER, W.Jr. - op. cit. (12), pp. 225-450.
- 17- LAIER, J.E. - "Relatório de atividades", FAPESP-Tecnológicos e Industriais nº 71/1336 - período mar/ago/1972.
- 18- STAMATO, M.C. e SMITH, B.S. - op. cit. (13), pp. 2-16.
- 19- STAMATO, M.C. e SMITH, B.S. - op. cit. (13), pp. 10-13.
- 20- GERE, J.M. e WEAVER, V. Jr. - op. cit. (12), pp. 393-404.
- 21- STAMATO, M.C. - "Torção de estruturas de edifícios elevados", E.E.S.C. 1972.
- 22- OLIVEIRA, C.S.M. - "Relatório de atividades", F.A.P.E.S.P. - Tecnológicos e Industriais nº 70/653 - período julho-dezembro de 1971.
- 23- PACITTI, T. - "Munitor FORTRAN - Princípios", Ao Livro Técnico S.A., pp. 218.
- 24- PACITTI, T. - op. cit. (23), pp. 147.