

**ANLOG**

**ANÁLISE NÃO LINEAR DE OBRAS GEOTÉCNICAS**

**por**

**Zornberg, J. G.**

**Azevedo, R. F.**

**RELATÓRIO INTERNO, RI 03/90**

**Departamento de Engenharia Civil**

**Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro**

**Rio de Janeiro, maio**

**1990**

# ANLOG

## ANÁLISE NÃO LINEAR DE OBRAS GEOTÉCNICAS

### ÍNDICE

<b>1 - Introdução.....</b>	<b>4</b>
<b>2 - Macro-comandos introducidos no programa.....</b>	<b>6</b>
2.1 - Considerações iniciais.....	6
2.2 - Macro-comandos básicos de um problema de elementos finitos.....	7
2.3 - Macro-comandos de ativação e desativação de elementos bidimensionais.....	9
2.4 - Macro-comandos de ativação e desativação de elementos de barra.....	10
2.5 - Macro-comandos para pré-fixação e alteração de variáveis.....	11
2.6 - Macro-comandos de leitura e criação de arquivos...	13
<b>3 - Características do programa.....</b>	<b>16</b>
<b>4 - Elaboração do arquivo de dados.....</b>	<b>19</b>
4.1 - Estrutura geral da entrada de dados.....	21
4.2 - Macro-comando 'DADOS'.....	22
4.3 - Macro-comando 'LARIN'.....	33

4.4	- Macro-comando 'TINKØ'.....	34
4.5	- Macro-comando 'TINIS'.....	34
4.6	- Macro-comando 'CRREG'.....	36
4.7	- Macro-comando 'ESCAV'.....	38
4.8	- Macro-comando 'ATERR'.....	38
4.9	- Macro-comando 'BARAT'.....	40
4.10	- Macro-comando 'BARDE'.....	40
4.11	- Macro-comando 'ALTCB'.....	42
4.12	- Macro-comando 'CGRAF'.....	43
4.13	- Macro-comando 'CARIN'.....	43
4.14	- Macro-comando 'MUDMT'.....	44
4.15	- Macro-comando 'SPPRE'.....	44
4.16	- Macro-comando 'SOLVE'.....	46
4.17	- Macro-comandos que não precisam do fornecimento de variáveis.....	47
4.18	- Parâmetros pré-fixados.....	49
4.19	- Variáveis pré-fixadas.....	50
5	- Arquivos de dados num exemplo de aplicação.....	52
6	- Referências bibliográficas.....	59
Apêndice - Significado de Variáveis na Saída de		
	Resultados ao Executar o Macro-Comando 'Solve'...	61

## 1 - INTRODUÇÃO

O programa *ANLOG* aqui apresentado foi desenvolvido visando a análise numérica de problemas geotécnicos de característica bidimensional (deformação plana e axissimétricos).

Duas questões foram consideradas prioritárias na abordagem por elementos finitos de uma obra geotécnica:

- (a) Uma caracterização correta da lei tensão-deformação do solo e,
- (b) Uma simulação apropriada da sequência de etapas inerentes ao processo construtivo particular de cada obra.

Visando atender a primeira destas, o modelo elasto-plástico de Lade (1977, 1979) (Zornberg, 1989; capítulo 3) foi implementado tendo em vista o bom desempenho observado por este na representação do comportamento de solos quando submetido a diferentes trajetórias de tensões. Diversas técnicas foram implementadas para a resolução do problema de elementos finitos não-linear resultante (Zornberg, 1989; Capítulo 4).

Em segundo lugar, procurou-se definir um código suficientemente versátil para permitir a representação de diferentes sequências de construção e características de uma

obra. Para isso, uma linguagem de macro-comandos (Taylor, 1977) foi utilizada com o objetivo de que o programa computacional implementado pudesse abordar problemas de características diversas. A linguagem de macro-comandos consiste na utilização de um conjunto de sub-programas compactos que desenvolvem uma ou algumas poucas funções no processo de resolução de um problema de elementos finitos. Assim, a abordagem das diversas etapas ou processos básicos que permitem simular características próprias do processo construtivo de uma obra geotécnica foi implementada no programa ANLOG através da utilização dos diferentes macro-comandos, cujas características serão apresentadas a seguir.

Para armazenamento das matrizes e vetores utilizados pelo programa, adotou-se um esquema de alocação dinâmica (Jennings, 1977; Taylor, 1977). Desta forma, é feita a partição de um único vetor (vetor de trabalho) para armazenar tanto as matrizes de dados quanto as matrizes globais do problema (Zornberg, 1989; seção 5.3).

O programa possibilita a resolução de problemas bi-dimensionais, sejam estes caracterizados por um estado de deformação plana, ou bem se tratando de problemas axissimétricos. O código foi desenvolvido na linguagem FORTRAN 77. A sua versão atual se encontra implementada para utilização em um Computador Central CDC Cyber 170-835 e em microcomputadores compatíveis do tipo IBM-PC / XT/AT.

## 2 - MACRO-COMANDOS IMPLEMENTADOS NO PROGRAMA

### 2.1 Considerações Iniciais

Como já foi mencionado, o programa aqui desenvolvido consiste no gerenciamento por parte do usuário de diversos sub-programas, fato que facilita a sua aplicação em problemas práticos de engenharia geotécnica. Nos programas baseados na utilização de algoritmos fixos para resolução de um problema, o usuário se vê obrigado a modificar continuamente o código para adaptá-lo ao seu problema particular. Um programa organizado em forma de módulos permite, por outro lado, uma abordagem mais fácil por parte de novos usuários que venham a aumentar o número de facilidades existentes no programa.

No caso de problemas constituídos por uma sequência de análises de elementos finitos que simulam as diferentes etapas construtivas de uma obra, a estrutura aqui implementada permite manter armazenadas as variáveis que definem o estado final de um problema e que representarão o estado inicial de um segunda análise, de características provavelmente diferentes às do problema inicial. O arquivo de dados do programa consistirá de uma sequência de macro-comandos que indicarão cada uma das funções a serem desenvolvidas na análise. Cada um destes comandos será acompanhado por dados de entrada e parâmetros de

controle requeridos para a sua execução. Na sua versão atual, o programa possui 19 macro-comandos implementados, cujas características principais são apresentadas a seguir.

## 2.2 Macro-Comandos Básicos de um Problema de Elementos Finitos

Definem-se aqui os comandos gerais, comuns a todos os problemas de elementos finitos que venham a ser executados, os quais efetuam a leitura dos dados e processam a resolução do problema propriamente dito.

**DADOS.** Como o seu próprio nome sugere, a utilização deste comando permite a leitura das características do problema. Dados gerais, tais como o tipo de problema bi-dimensional (de deformação plana ou axissimétrico), o número de pontos nodais e o número de elementos, são inicialmente incorporados. Procede-se, a seguir, à leitura das características da malha de elementos finitos (coordenadas dos pontos nodais, incidência dos elementos, etc.), valores que podem ser lidos individualmente ou por meio de uma rotina de geração automática da malha caso os elementos se encontrem distribuídos regularmente. Posteriormente, são lidos os dados correspondentes aos parâmetros dos materiais a serem utilizados na análise. Finalmente, são incorporadas as condições de contorno do problema, seja de forma individual para cada ponto nodal, ou automaticamente, caso os pontos estejam distribuídos regularmente. A leitura inicial dos dados de todo problema a

ser analisado deve ser sempre efetuada através deste macro-comando *DADOS*. Como se verá posteriormente, a leitura de estágios intermediários de um problema poderá ser efetuada com o macro-comando *LARIN*.

*CRREG*. Este macro-comando efetua a leitura das forças externas a serem aplicadas no problema em estudo. Podem ser caracterizadas forças aplicadas diretamente nos pontos nodais da malha, forças de massa ou forças distribuídas na superfície dos elementos (Zornberg, 1989; seção 2.2.8).

*SOLVE*. Este macro-comando é quem efetua a resolução do problema não-linear de elementos finitos. Em primeiro lugar é chamada a subrotina *PERFIL* que, em função do número atual de graus de liberdade do problema, definirá a altura das colunas que formam o perfil de banda variável da matriz de rigidez do problema em estudo. Posteriormente, é chamada a subrotina homônima deste macro-comando que gerenciará o processo de resolução incremental-iterativo do problema de elementos finitos (Zornberg, 1989; seção 4.3.3).

*FEXEC*. Corresponde sempre ao último macro-comando a ser executado. Indica o Final da Execução da análise desenvolvida, fornecendo o valor do tempo total de execução do problema e o tamanho do vetor de trabalho utilizado.



### 2.3. Macro-Comandos de Ativação e Desativação de Elementos Bi-Dimensionais

Para simular etapas de processos construtivos típicas de obras geotécnicas, foi implementada a possibilidade de eliminação de elementos planos da malha de elementos finitos, representando desta forma um processo de escavação e, por outro lado, foi considerada a possibilidade de incorporação de novos elementos na malha para conseguir simular, por exemplo, um processo de aterro (Zornberg, 1989; seção 2.2).

**ESCAV.** Este comando define a eliminação de elementos da malha permitindo a execução de uma etapa de escavação através da aplicação das forças nodais equivalentes propostas por Mana (1978) (Zornberg, 1989; seção 2.3.3). Para cada elemento a ser escavado devem ser fornecidos, como dados de entrada, os números dos pontos nodais que formam o contorno da região a ser escavada e nas quais serão aplicadas as forças calculadas. Os elementos eliminados da malha serão desativados, não sendo considerados em nenhuma das análises posteriores. Os pontos nodais da região escavada passam a ser considerados fixos com o que será diminuído o tamanho da matriz de rigidez do problema após a renumeração interna dos graus de liberdade.

**ATERR.** A utilização deste macro-comando permite a ativação de elementos definidos inicialmente como desativados. As características destes elementos (materiais, conectividade dos nós) devem ter sido previamente definidas com o macro-comando

*DADOS* da mesma forma que as coordenadas dos seus respectivos pontos nodais. Estes pontos nodais deixarão de ter os seus deslocamentos restritos, procedendo-se à renumeração interna dos graus de liberdade do problema. Diversos procedimentos foram propostos na literatura para simular um processo de aterro (Kulhawy, 1977; Naylor and Pande, 1981). No presente trabalho, o processo de aterro consiste na aplicação das forças nodais equivalentes à pressão exercida por uma nova camada de material, função efetuada com a utilização do macro-comando *CRREG*. O problema é então resolvido através da utilização do comando *SOLVE*, sendo finalmente utilizado o macro-comando *ATERR* para considerar a rigidez da nova camada nas análises posteriores.

#### **2.4. Macro-Comandos de Ativação e Desativação de Elementos de Barra**

A utilização de elementos de barra com dois pontos nodais (Zienkiewicz, 1977; Cook, 1981) foi adotada neste trabalho para simular tanto a presença de estroncas quanto de tirantes numa estrutura de contenção. Neste caso, a utilização de um perfil de banda variável para armazenamento da matriz de rigidez do problema (Zornberg, 1989; seção 4.1.3) evita o aumento considerável na quantidade de memória que seria requerido caso se tivesse utilizado a técnica de armazenamento em banda da matriz de rigidez global.

**BARAT.** Permite a ativação de um elemento de barra considerado inicialmente desativado. O efeito de um pré-esforço tanto numa estronca quanto num tirante, pode ser representado por meio da aplicação de forças iguais e opostas nos dois pontos nodais que serão conectados pelo elemento de barra unidimensional. A rigidez do elemento de barra deverá ser considerada apenas na etapa de construção subsequente a ser desenvolvida na análise do problema.

**BARDE.** Possibilita a desativação de um elemento de barra. A remoção de uma estronca ou de um tirante pode ser simulada através do cálculo da força nodal equivalente devido à tensão axial presente no elemento de barra e aplicando posteriormente forças de sentido contrário às calculadas sobre os dois pontos nodais do elemento. A rigidez deste elemento passa a ser desconsiderada nas análises posteriores.

## **2.5. Macro-Comandos para Pré-Fixação e Alteração de Variáveis**

Estes comandos permitem atribuir valores determinados a certas variáveis em qualquer etapa da análise em desenvolvimento, permitindo uma fácil manipulação, por parte do usuário, dos valores necessários.

**TINKØ.** Possibilita a pré-fixação de um estado de tensões geostático nos elementos planos da malha de elementos finitos para um determinado número de camadas horizontais considerado

no problema. O estado de tensão é definido a partir do fornecimento das espessuras das camadas, do seu peso específico e do coeficiente de empuxo em repouso  $K_0$  de cada estrato horizontal. Para cada ponto de Gauss de integração será calculado o valor do estado de tensões. São também calculadas as forças nodais equivalentes ao estado de tensões iniciais, valores a serem utilizados posteriormente no processo de resolução iterativa do problema.

**TINIS.** Permite pré-definir um estado de Tensões Iniciais Isotrópico nos elementos planos da malha. O estado assim caracterizado possibilita representar, por exemplo, o estado inicial hidrostático de uma amostra de solo anterior ao cisalhamento num ensaio convencional de compressão triaxial. São também definidas, neste caso, as forças nodais equivalentes a este estado inicial de tensões.

**SPPRE.** Este comando possibilita a pré-fixação do nível de tensões correspondente à localização das superfícies de plastificação. Quando não utilizado, os níveis de tensões  $S1MAX(i_{gaus}, i_{elem})$  e  $S2MAX(i_{gaus}, i_{elem})$  corresponderão aos valores máximos alcançados pelas matrizes  $SUP1(i_{gaus}, i_{elem})$  e  $SUP2(i_{gaus}, i_{elem})$ , respectivamente. Em particular, no início de uma análise, os valores destas variáveis são definidos em cada ponto de Gauss de Integração, pelo estado de tensões iniciais do problema, ou seja, considerando o material como normalmente adensado. Caso os elementos estejam caracterizados por um material pré-adensado, os níveis de tensões das

superfícies de plastificação poderão ser pré-fixados em valores maiores aos correspondentes ao estado inicial de tensões através da utilização deste macro-comando.

**MUDMT.** Permite a mudança do material de certo(s) elemento(s) numa determinada etapa do problema em análise. Este comando é utilizado, por exemplo, para mudar os parâmetros de um elemento de solo, em parâmetros que caracterizam o comportamento da parede de contenção de uma escavação.

**ALTCB.** Este macro-comando possibilita a alteração das condições de borda inicialmente fixadas para o problema. A renumeração interna dos graus de liberdade é efetuada posteriormente.

**ZDESL.** Zera a matriz que armazena os deslocamentos totais. Em princípio, os deslocamentos obtidos após duas análises sucessivas por elementos finitos, correspondem aos valores totais, soma dos deslocamentos originados nas duas etapas do problema. Caso se deseje analisar apenas o valor dos deslocamentos da segunda análise, os valores originados na primeira delas poderão ser zerados com o uso deste macro-comando.

## **2.6. Macro-Comandos de Leitura e Criação de Arquivos**

**LFORN.** Este macro-comando permite a leitura dos valores das forças externas aplicadas nos pontos nodais. Estes valores são

impressos, para cada grau de liberdade, no arquivo de saída do problema em estudo.

**LVETT.** Possibilita a leitura do vetor de trabalho total do problema, sendo normalmente utilizado apenas em fases de implementação e teste do programa.

**CARIN.** Permite a Criação de um ARquivo INtermediário numa determinada etapa do problema em análise. As variáveis de controle do problema junto com a totalidade do vetor de trabalho são armazenados num arquivo não-formatado.

**LARIN.** Possibilita a Leitura de um ARquivo INtermediário previamente criado pelo macro-comando *CARIN*. Desta forma, as variáveis de controle e o vetor de trabalho do problema que definiu o arquivo intermediário são novamente armazenados, permitindo a continuação da análise anterior. A utilização dos comandos *CARIN* e *LARIN* se torna vantajosa para a análise dos resultados intermediários de um problema consistente em várias etapas onde cada uma delas dispense um elevado tempo de processamento.

**CGRAF.** Permite a criação dos arquivos necessários para o pós-processamento gráfico dos resultados. O tratamento gráfico dos valores obtidos numa análise se torna uma providência indispensável para a correta interpretação dos resultados quando o problema possui um número elevado de graus de liberdade. A partir dos arquivos criados por este

macro-comando, o programa *GRAFOG* desenvolvido permitirá representar graficamente o campo de deslocamentos considerando os resultados definidos em cada ponto nodal da malha de elementos finitos utilizada, assim como as tensões principais obtidas para cada ponto de integração do problema.

### 3 - CARACTERÍSTICAS DO PROGRAMA

A seguir, são apresentadas as características do programa *ANLOG* desenvolvido. Estas características são:

- Utilização do elemento isoparamétrico de oito pontos nodais para representar elementos de solo e da parede da estrutura de suporte.

- Utilização de elementos de barra de dois pontos nodais para simular a presença de estroncas ou tirantes.

- Utilização do modelo elasto-plástico de Lade (1977) para a modelagem de areias.

- Utilização da formulação do modelo de Lade (1979) para a caracterização do comportamento de argilas normalmente adensadas.

- Possibilidade de modelagem de argilas pré-adensadas com base em considerações sugeridas (Zornberg, 1989).

- Utilização de um modelo de comportamento bilinear nos elementos de barra.

- Armazenamento em perfil de banda variável (Skyline) da matriz de rigidez de problemas simétricos ou não-simétricos.

- Utilização de métodos compactos para resolução de sistemas lineares de equações algébricas simétricas ou não-simétricas.

- Possibilidade de simetrização da matriz de rigidez



resultante da utilização do modelo elasto-plástico utilizado por meio de diversas técnicas aqui propostas.

- Utilização dos métodos de Euler, Newton-Raphson Standard e Newton-Raphson Modificado para resolução da não-linearidade do problema de elementos finitos.

- Cálculo do estado final de tensões em cada etapa do processo iterativo por meio de uma técnica de integração explícita.

- Utilização de uma linguagem de macro-comandos para a sistematização, por parte do usuário, da sequência de tarefas a serem desenvolvidas durante uma análise.

- Desativação de elementos bidimensionais para simulação de um processo de escavação, considerando a aplicação de forças definidas segundo a metodologia proposta por Mana (1978) e a renumeração dos graus de liberdade do problema.

- Ativação de elementos bidimensionais para simular um processo de aterro, procedendo à renumeração dos graus de liberdade do problema.

- Ativação e desativação de elementos de barra para representar a instalação e remoção de estroncas e/ou tirantes.

- Possibilidade de aplicação de pré-esforço durante a ativação de elementos de barra.

- Definição de um estado geostático ou isotrópico de tensões iniciais no problema em estudo.

- Possibilidade de redefinição durante o transcurso de uma análise dos níveis de tensões correspondentes às superfícies de plastificação, dos materiais dos elementos e das condições de contorno do problema.

- Criação e leitura de arquivos intermediários para permitir a análise em etapas de um problema.

- Criação de arquivos de saída gráfica.

- Armazenamento das matrizes e vetores por meio de alocação dinâmica de memória.

#### 4 - ELABORAÇÃO DO ARQUIVO DE DADOS

Será aqui indicada a forma de elaborar o arquivo de dados necessário na execução do programa *ANLOG*. A execução se processa da seguinte maneira:

O programa solicitará se forneça (na tela) a variável *ARQ* que identificará os arquivos de entrada e saída do programa. Assim, após o programa efetuar a solicitação:

*Arquivo de entrada (até 6 caracteres):*

o usuário deverá fornecer a variável que caracterizará os arquivos a serem utilizados. Seja que o usuário forneça, por exemplo, o valor:

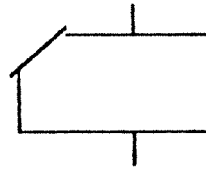
*STEC*

*<ENTER>*

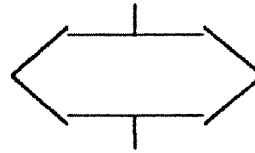
desta forma, o programa considerará como arquivo de entrada o arquivo *STECD*, que deverá ter sido criado previamente pelo usuário, e originará o arquivo *STECS*, com os resultados do problema analisado.

A seguir, será indicada a forma de elaboração do arquivo de dados (arquivo *STECD* do exemplo acima mencionado). Um fluxograma de entrada de dados será apresentado para cada um dos macro-comandos implementados. Os símbolos utilizados nestes diagramas de fluxo são:

● Registro de entrada:



● Processo iterativo:



Cada registro de entrada indicado num diagrama de fluxo representa uma linha (ou registro) do arquivo de dados. Portanto, todos os valores indicados nestes registros de entrada poderão encontrar-se apenas numa linha única do arquivo de entrada, separados por espaços em branco (para os quais deve ser utilizada a barra de espaçamento).

O programa foi escrito em linguagem FORTRAN e, portanto, os diferentes valores nos arquivos de entrada podem corresponder a variáveis inteiras, reais ou character. Na definição do nome das variáveis respeitou-se a convenção pré-definida do FORTRAN: o nome das variáveis inteiras começa com as letras I, J, K, L, M ou N; o nome das variáveis reais começa com qualquer uma das letras restantes. Quando a variável é do tipo character, este fato é explicitamente estabelecido na definição da mesma, indicando que se trata de um string. Foi sempre considerado o formato livre na entrada de dados do programa.

#### 4.1 Estrutura geral da entrada de dados (fig.1)

COMAND :String que indica o Macro-comando a ser executado.  
A seguir, devem ser definidos os dados correspondentes a este Macro-comando comand.

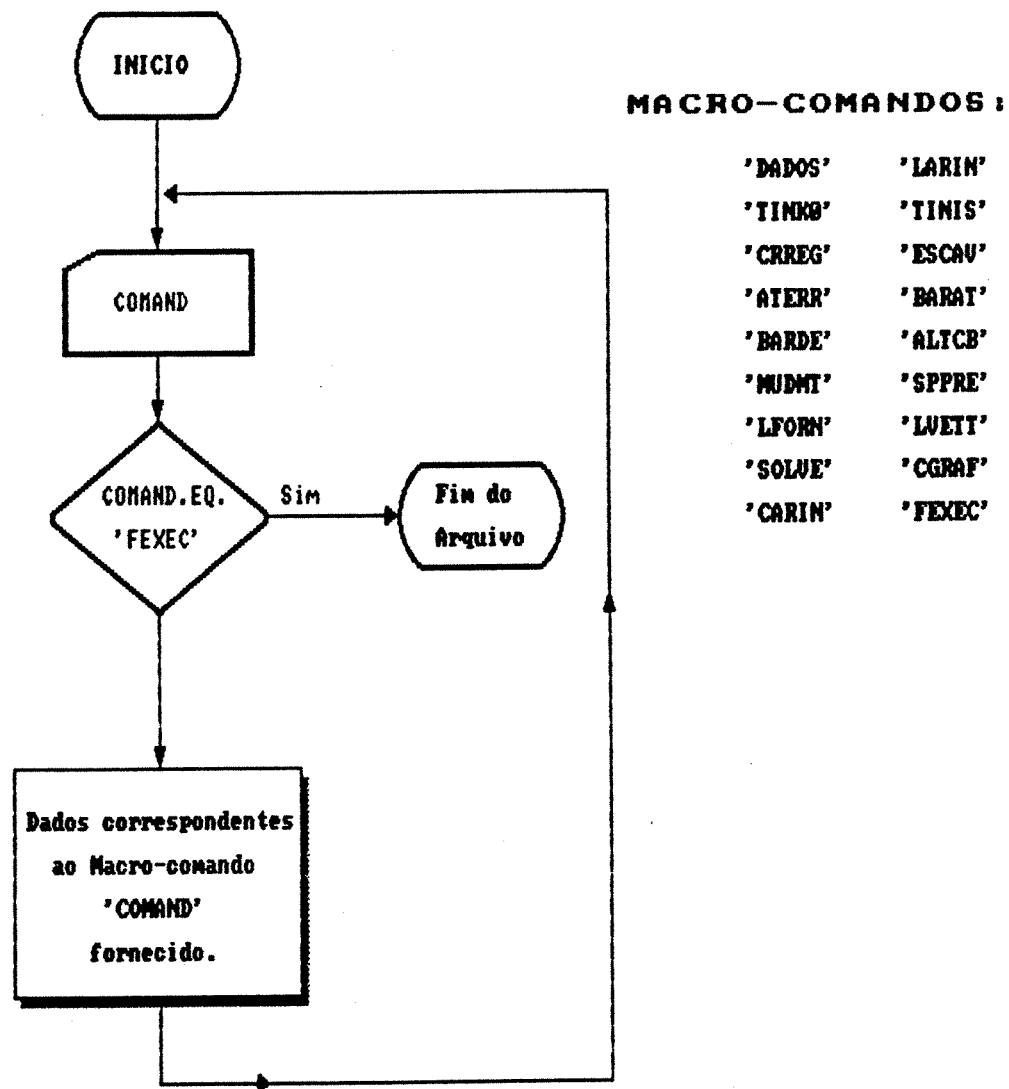


Fig.1 - Estrutura Geral da Entrada de Dados

#### 4.2 Macro-comando 'DADOS' (fig.2)

**IDENT** :String de identificação do problema (até 70 caracteres)

**NPOIN** :Número de pontos nodais

**NELEM** :Número de elementos

**NMATS** :Número de materiais

**LLTYPE** :Variável de controle - Tipo de problema

LLTYPE=1 :Problema de deformação plana

LLTYPE=2 :Problema axissimétrico

**LLSIM** :Variável de controle - Tipo de simetria (Vide Zornberg, 1989; seção 4.2.2)

LLSIM=1 :Matriz simétrica (em Lade: Mat. equivalente)

LLSIM=2 :Matriz simétrica (em Lade:  $C' = \frac{1}{2}(C + C^{transp.})$ )

LLSIM=3 :Matriz simétrica (em Lade:Matriz elástica)

LLSIM=4 :Matriz não simétrica

**NGEAUT** :Número de gerações automáticas de malha (fig.3)

**IGEAUT** :Contador das ngeaut gerações automáticas

**NNEL** :Número do primeiro elemento a ser gerado na geração igeaut

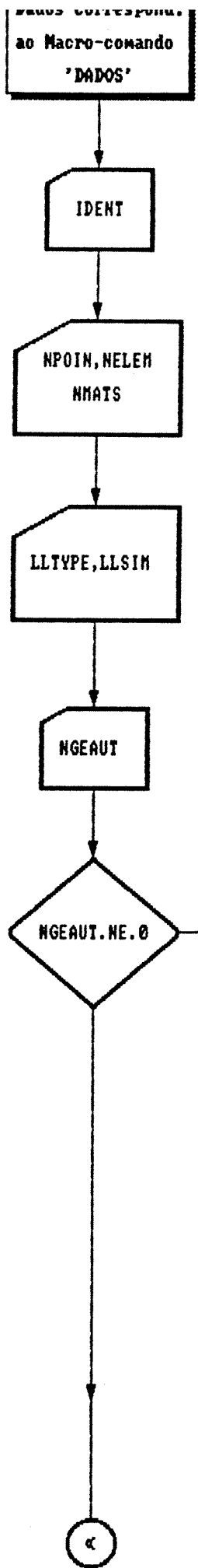
**NNO** :Número do primeiro ponto nodal a ser gerado na geração igeaut

**XGL(i,1)** :Coordenada do ponto nodal i, na direção x

**XGL(i,2)** :Coordenada do ponto nodal i, na direção y

**NDELX** :Número de intervalos segundo x, a serem gerados na geração igeaut

**DELX(i)** :Magnitudo do intervalo i, segundo x, a ser gerado na geração igeaut



  
 Dados da Malha  
 (Subrotina DATMSH)

Fig. 2 -  
Macro-comando 'DADOS'

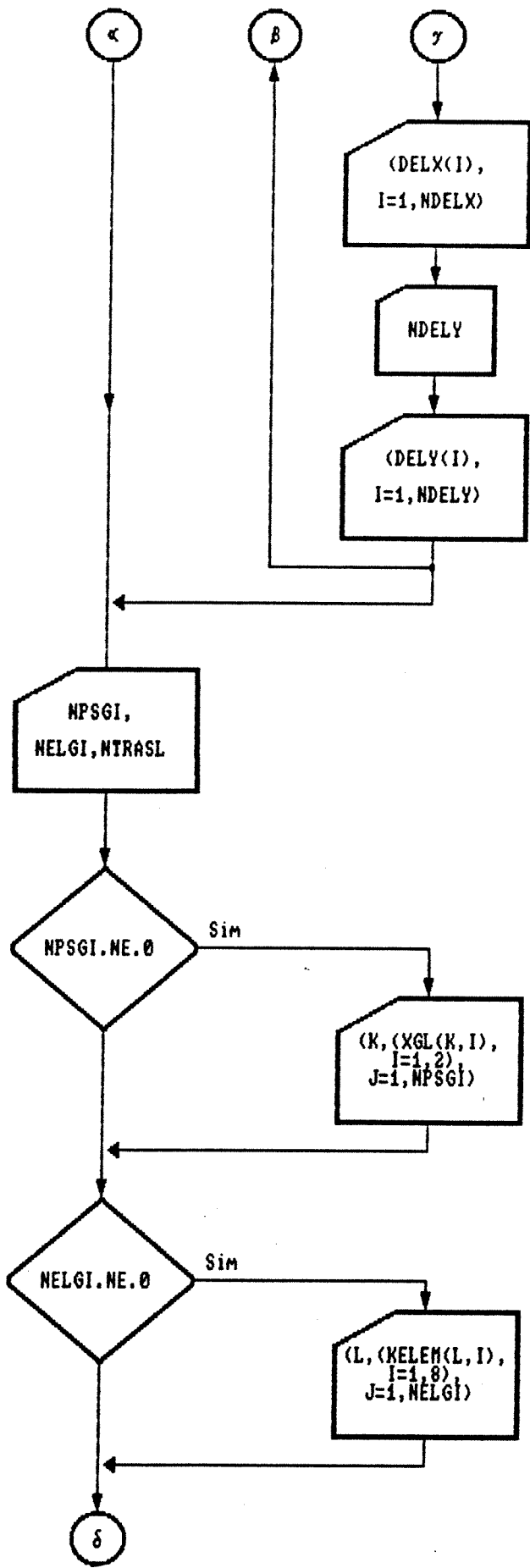


Figura 2 (cont.)



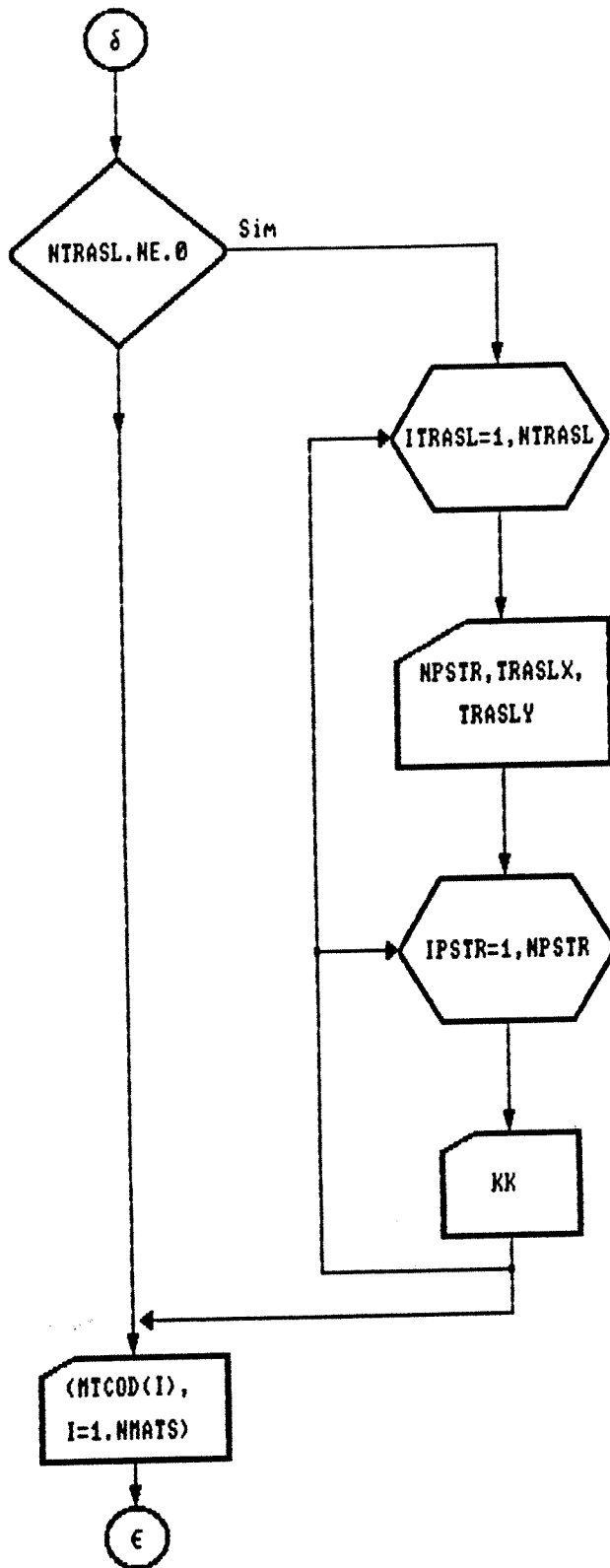


Figura 2 (cont.)

Dados dos Materiais  
(Subrotina DATMAT)

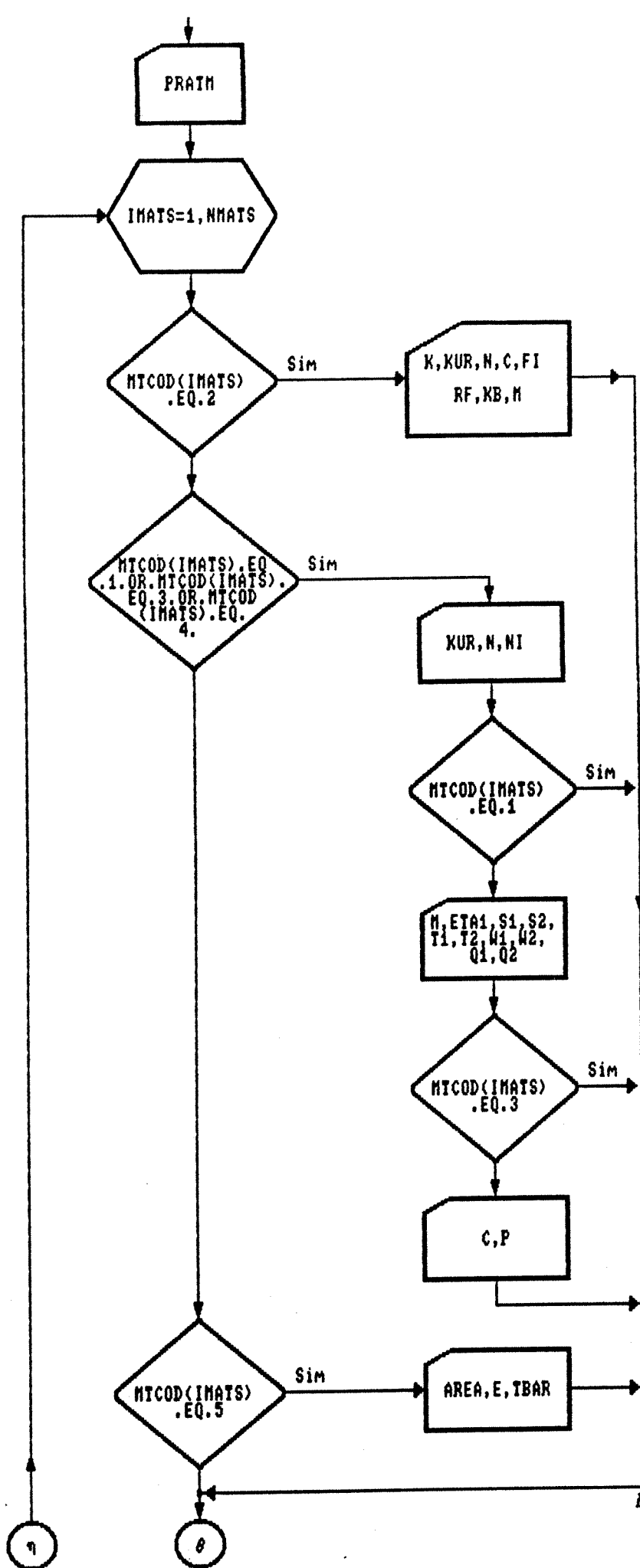
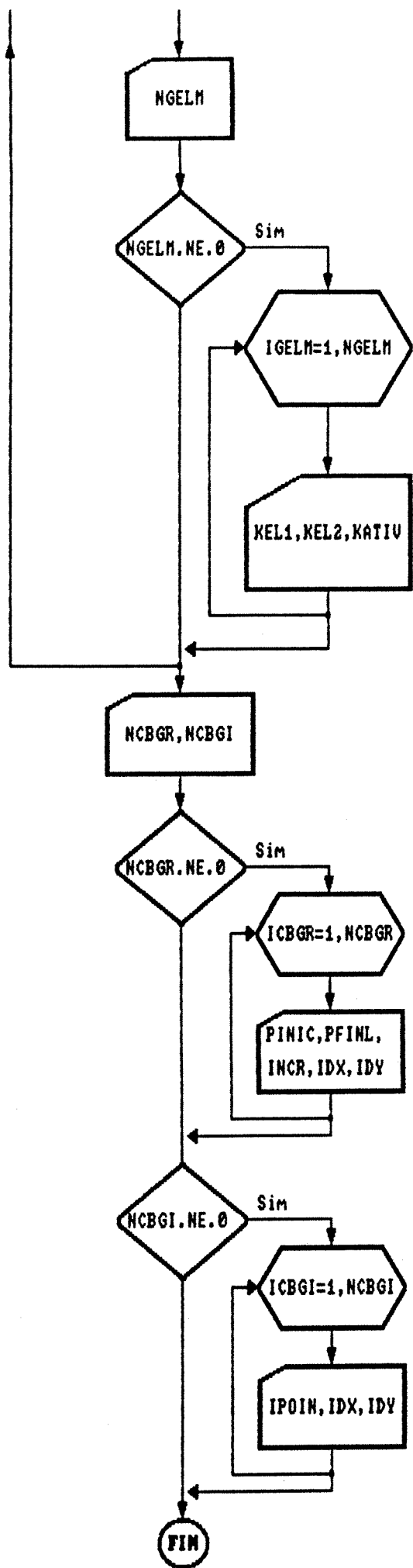


Figura 2 (cont.)



Dados das condicoes de borda  
(Subrotina DATBOU)

Fig. 2 (cont.)

Dados do Arquivo:

```

1      1      0.      0.      ...NNEL,NNO,XGL(NNO,1),XGL(NNO,2)
3
20.    25.    30.      ... (DELX(i), i=1,NDELX)
2
15.    20.      ... (DELY(i), i=1,NDELY)
    
```

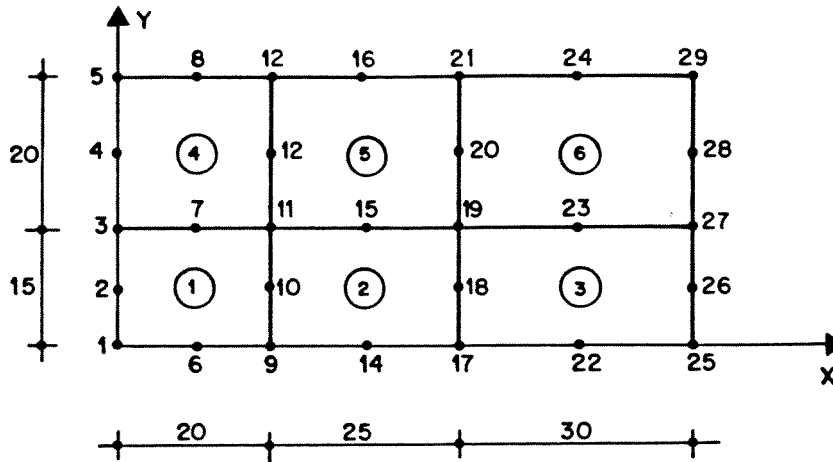


Fig. 3 - Dados de entrada para geração automática de malha

- NDELY** :Número de intervalos segundo y, a serem gerados na geração igeaut
- DELY(i)** :Magnitude do intervalo i, segundo y, a ser gerado na geração igeaut
- NPSGI** :Número de pontos gerados individualmente
- NELGI** :Número de elementos gerados individualmente
- NTRASL** :Número de traslações, nas coordenadas de pontos nodais previamente gerados, a serem efetuadas (fig.4)
- K** :Número do ponto nodal a ser gerado
- L** :Número do elemento a ser gerado

(Malha inicial: vide Fig.3)

Dados do Arquivo:

7.	10	0.0	...NPSTR,TRASLX,TRASLY
5			
8			
13			
16			
21			
24			
29			
4.	5.0	0.0	...NPSTR,TRASLX,TRASLY
4			
12			
20			
28			

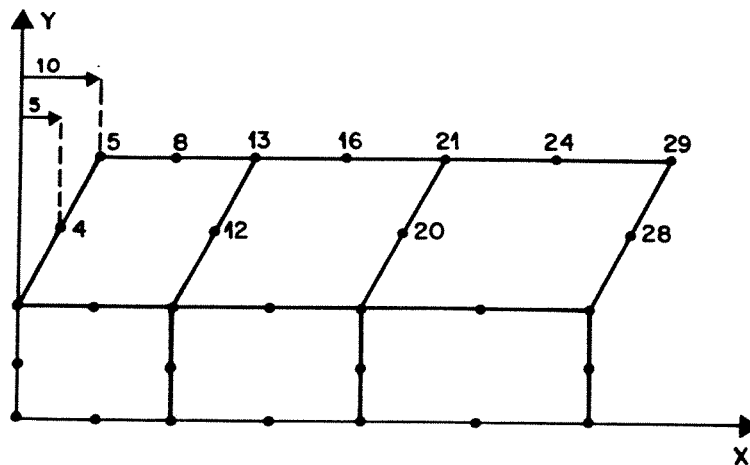


Fig.4 - Dados de entrada para traslação de coordenadas de pontos nodais

KELEM(L,i): Incidência do elemento L (i:1,2...8). No caso do elemento L ser um elemento de barra, as últimas seis (6) incidências (i:3,4...8) deste elemento deverão ser iguais a zero (0).

ITRASL : Contador das ntrasl traslações de coordenadas

NPSTR : Número de pontos nodais cujas coordenadas serão trasladadas na traslação itrasl

TRASLX : Magnitude da traslação itrasl na direção x

**TRASLY** :Magnitude da traslação  $itrasl$  na direção  $y$   
**KK** :Número do ponto nodal a ser trasladado  
**MTCOD(i)** :Vetor que armazena, para cada material  $i$ , o código que caracteriza o tipo de elemento e o modelo constitutivo do material

**MTCOD(i)=1:** Elemento isoparamétrico (de 8 pontos nodais) com modelo elástico  
**MTCOD(i)=2:** Elemento isoparamétrico (de 8 pontos nodais) com modelo hiperbólico  
**MTCOD(i)=3:** Elemento isoparamétrico (de 8 pontos nodais) com modelo Lade (sem cap)  
**MTCOD(i)=4:** Elemento isoparamétrico (de 8 pontos nodais) com modelo lade (com cap)  
**MTCOD(i)=5:** Elemento de barra (de 2 pontos nodais) com modelo elástico

**PRATM** :Pressão atmosférica  
**IMATS** :Contador dos  $imats$  materiais  
**K** :Parâm. do material  $imats$  (modelo hiperbólico)  
**KUR** :Parâm. do material  $imats$  (modelo hiperbólico)  
**N** :Parâm. do material  $imats$  (modelo hiperbólico)  
**C** :Parâm. do material  $imats$  (modelo hiperbólico)  
**FI** :Parâm. do material  $imats$  (modelo hiperbólico)  
**RF** :Parâm. do material  $imats$  (modelo hiperbólico)  
**KB** :Parâm. do material  $imats$  (modelo hiperbólico)  
**M** :Parâm. do material  $imats$  (modelo hiperbólico)  
**KUR** :Parâm. elástico do material  $imats$   
**N** :Parâm. elástico do material  $imats$   
**NI** :Parâm. elástico do material  $imats$

M :Parâm. expansivo do material *imats* (modelo de Lade)  
ETA1 :Parâm. expansivo do material *imats* (modelo de Lade)  
S1 :Parâm. expansivo do material *imats* (modelo de Lade)  
S2 :Parâm. expansivo do material *imats* (modelo de Lade)  
T1 :Parâm. expansivo do material *imats* (modelo de Lade)  
T2 :Parâm. expansivo do material *imats* (modelo de Lade)  
W1 :Parâm. expansivo do material *imats* (modelo de Lade)  
W2 :Parâm. expansivo do material *imats* (modelo de Lade)  
Q1 :Parâm. expansivo do material *imats* (modelo de Lade)  
Q2 :Parâm. expansivo do material *imats* (modelo de Lade)  
C :Parâm. colapsível do material *imats* (modelo de Lade)

Nota: Para  $C < 999.0$ , o programa utilizará a formulação de Lade (1977), considerando o parâmetro  $C$  fornecido. Para  $C \geq 999.0$ , o programa utilizará a formulação de Lade (1979), desconsiderando o valor fornecido do parâmetro  $C$ .

P :Parâm. colapsível do material *imats* (modelo de Lade)  
AREA :Área do material *imats* (elemento de barra)  
E :Mód. de elastic. do material *imats* (elem. de barra)  
TBAR :Tipo de elemento de barra no material *imats*

TBAR=1 :Elemento de barra elástico

TBAR=2 :Elemento de barra bilinear com rigidez muito baixa à tração (estronca)

TBAR=3 :Elemento de barra bilinear com rigidez muito baixa à compressão (tirante)

NGELM :Número de grupos de elementos (de numeração consecutiva) que possuem o material *imat*

**IGELM** :Contador dos ngelm grupos de elementos

**KEL1** :Número do primeiro elemento do grupo igelm

**KEL2** :Número do último elemento do grupo igelm

**KATIV** :Variável que define se os elementos do grupo igelm se encontram ativados ou desativados

**KATIV=1** :Os elementos do grupo igelm se encontram ativados

**KATIV=0** :Os elementos do grupo igelm se encontram desativados

**NCBGR** :Número grupos de condições de borda a serem geradas em conjunto (fig.5).

Nota: Inicialmente, todos os graus de liberdade so considerados livres. Portanto, deverão ser geradas (em grupo ou individualmente) apenas aquelas condições de borda correspondentes a pontos nodais com restrições ao deslocamento.

**NCBGI** :Número de condições de borda geradas individualmente. (Vide nota em ncbgr).

**ICBGR** :Contador dos ncbgr grupos de condições de borda a serem gerados

**PINIC** :Número do ponto nodal inicial do grupo icbgr

**PFINL** :Número do ponto nodal final do grupo icbgr

**INCR** :Incremento na numeração entre dois pontos nodais pertencentes ao mesmo grupo icbgr

**IDX** :Condição de borda, na direção x, de um ponto nodal

**IDX=0** :Grau de liberdade livre

**IDX=1** :Grau de liberdade restringido

**IDY** :Condição de borda, na direção y, do ponto nodal



IDY=0 :Grau de liberdade livre  
 IDY=1 :Grau de liberdade restringido  
 ICBGI :Contador das ncbgi condições de borda geradas individualmente  
 IPOIN :Número do ponto nodal com condição de borda gerada individualmente na geração icbgi

(Malha inicial: vide Fig.3)

Dados do arquivo:

2	1				...NCBGR,NCBGI
1	25	8	1	1	...PINIC,PFINL,INCR,IDX,IDY
2	5	1	1	0	...PINIC,PFINL,INCR,IDX,IDY
29	1	1			...IPOIN,IDX,IDY

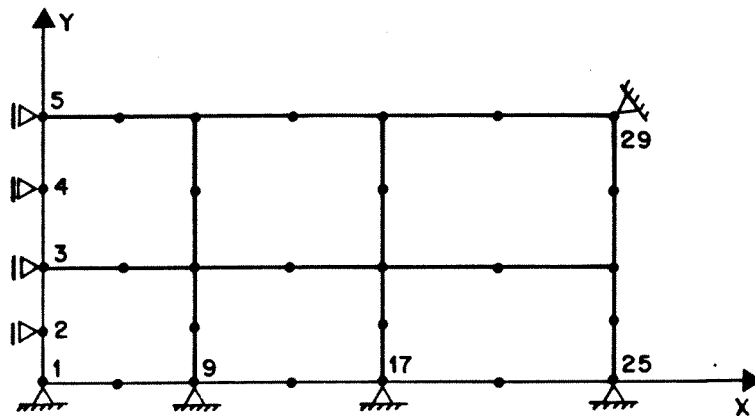


Fig.5 - Dados de entrada para definição das condições de borda

#### 4.3 Macro-comando 'LARIN' (fig.6)

ARIN :String que define o nome do arquivo intermediário a ser lido  
 IDENT :String de identificação da fase do problema a ser executada

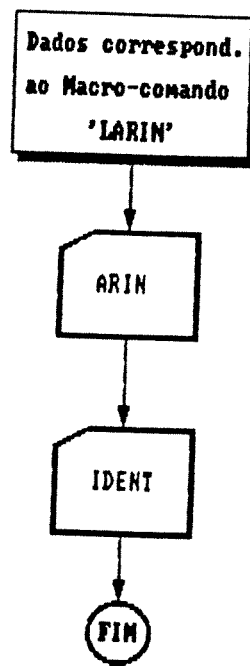


Fig.6 - Macro-comando 'LARIN'

#### 4.4 Macro-comando 'TINKO' (fig.7)

NCAMD :Número de camadas horizontais do problema (fig.8)

ICAMD :Contador das *ncamd* camadas horizontais

COTAS(ICAMD) :Cota superior da camada *icamd*

GAMA(ICAMD) :Peso específico da camada *icamd*

XKOC(ICAMD) :Coeficiente de empuxo lateral em repouso  $K_0$  da camada *icamd*

#### 4.5 Macro-comando 'TINIS' (fig.9)

TISOT :Valor da tensão isotrópica a ser definida em cada ponto de Gauss da malha

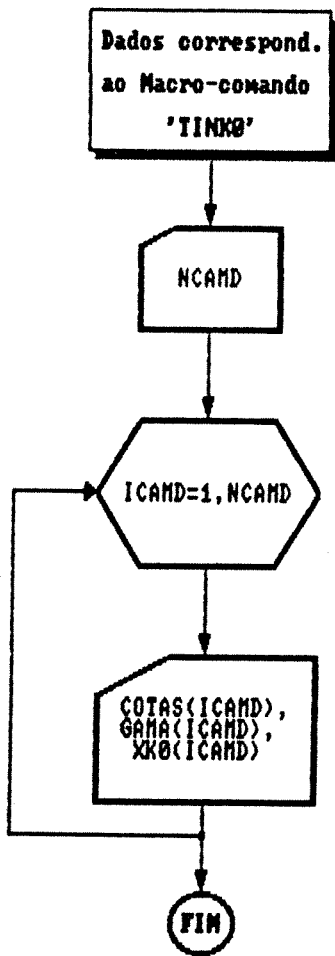


Fig.7 - Macro-comando 'TINKO'

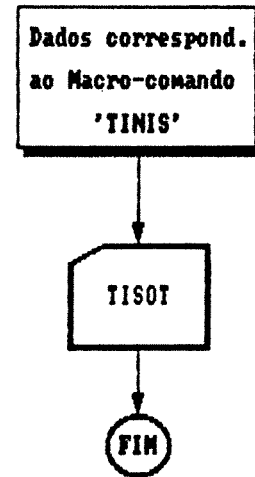


Fig.9 - Macro-comando 'TINIS'

Dados do arquivo:

3		
50.	12.	0.5
30.	10.	0.8
10.	11.	1.2

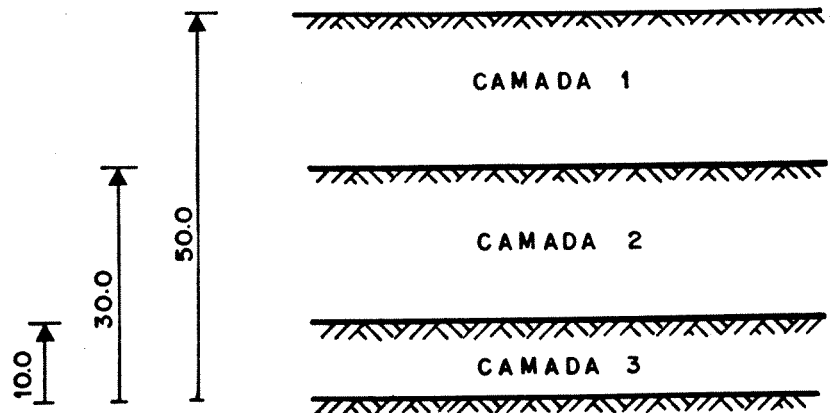


Fig.8 - Dados de entrada para definição de um estado geostático de tensões

#### 4.6 Macro-comando 'CRREG' (fig.10)

**NPLOAD** :Número de pontos nodais a serem carregados com forças concentradas

**NGRAV** :Número de grupos de elementos (de numeração consecutiva) a serem carregados com um mesmo valor de forças de massa

**NEDGE** :Número de lados de elementos a serem carregados com forças de superfície (fig.11)

**IPLOAD** :Contador dos npload pontos nodais a serem carregados com forças concentradas

**LODPT** :Número do ponto nodal iplod

**POINT(1)** :Força concentrada, na direção x, aplicada no ponto nodal lodpt

**POINT(2)** :Força concentrada, na direção y, aplicada no ponto nodal lodpt

**IGRAV** :Contador dos ngrav grupos de elementos a serem carregados com forças de massa

**GCOM(1)** :Componente, segundo x, da força de massa no grupo igrav

**GCOM(2)** :Componente, segundo y, da força de massa no grupo igrav

**KGRAV1** :Número do primeiro elemento do grupo igrav

**KGRAV2** :Número do último elemento do grupo igrav

**IEDGE** :Contador dos nedge lados de elementos a serem carregados com forças de superfície

**NOPRS(1)** :Número do ponto nodal i que define o lado iedge (fig.11)

**PRESS(1,1)**:Tensão normal exercida no ponto nodal i (fig.11)

**PRESS(1,2)**:Tensão tangencial exercida no ponto nodal i (fig.11)

valores correspond.  
ao Macro-comando  
'CRREG'

NLOAD,  
NGRAU,  
NEDGE

NLOAD.GT.0

Sim

IPLOAD=  
1,NLOAD

LODPT,  
POINT(1),  
POINT(2)

NGRAU.GT.0

Sim

IGRAU=1,NGRAU

GCOM(1),  
GCOM(2),  
KGRAU1,KGRAU2

NEDGE.GT.0

Sim

IEDGE=1,NEDGE

(NOPRS(I),  
I=1,3)

((PRESS(I, IDF),  
IDF=1,2),  
I=1,3)

FIM

Fig.10 - Macro-comando 'CRREG'

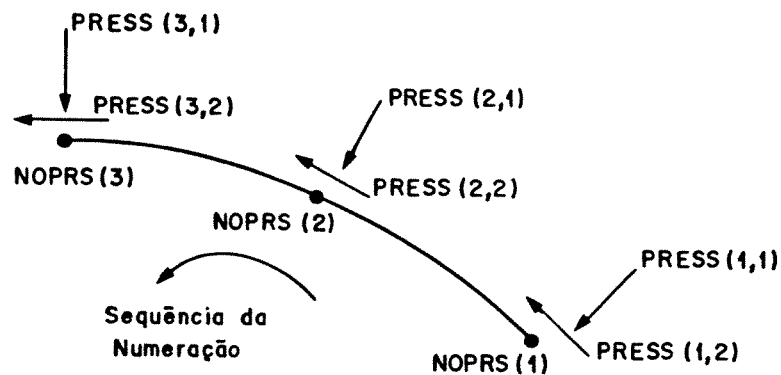


Fig.11 - Lado de elemento carregado com forças de superfície

#### 4.7 Macro-comando 'ESCAV' (fig.12)

NELES :Número de elementos a serem escavados  
 IELES :Contador dos neles elementos a serem escavados  
 IELEM :Número do elemento ieles  
 NPESC :Número de pontos nodais do elemento ielem que permanecerão na malha após a escavação  
 PINIC :Número do primeiro ponto nodal do elemento ielem (em sentido anti-horário) dos npesc pontos nodais que permanecerão na malha. Se npesc=0, considerar pinic=0

#### 4.8 Macro-comando 'ATERR' (fig.13)

NELAT :Número de elementos a serem ativados  
 IELAT :Contador dos nelat elementos a serem ativados  
 IELEM :Número do elemento ielat a ser ativado

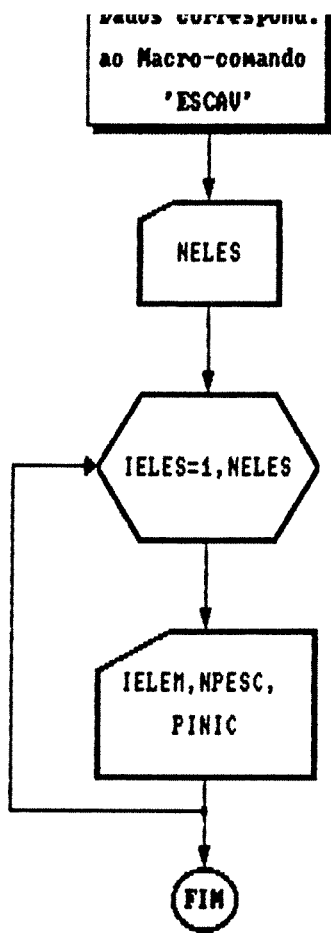


Fig.12 - Macro-comando 'ESCAV'

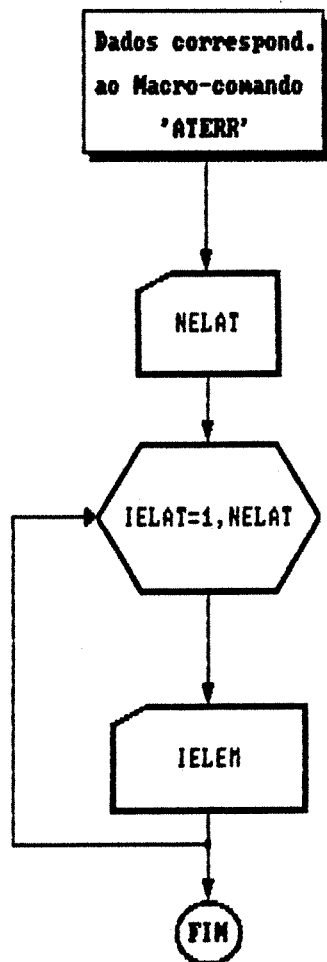


Fig.13 - Macro-comando 'ATERR'

#### 4.9 Macro-comando 'BARAT' (fig.14)

**NBARAT** :Número de elementos de barra a serem ativadas

**IBARAT** :Contador das nbarat elementos de barra a serem  
ativados

**IELEM** :Número do elemento de barra ibarat a ser ativado

**LLPRET** :Variável de controle - Existência de força de  
pré-tensão

LLPRET=0 :Não existe força de pré-tensão no elemento de  
barra a ser ativado

LLPRET=1 :Existe força de pré-tensão

**FPRET** :Magnitude da força de pré-tensão no elemento de  
barra a ser ativado

#### 4.10 Macro-comando 'BARDE' (fig.15)

**NBARDE** :Número de elementos de barra a serem desativados

**IBARDE** :Contador dos nbarde elementos de barra a serem  
desativados

**IELEM** :Número do elemento de barra ibarde a ser desativado



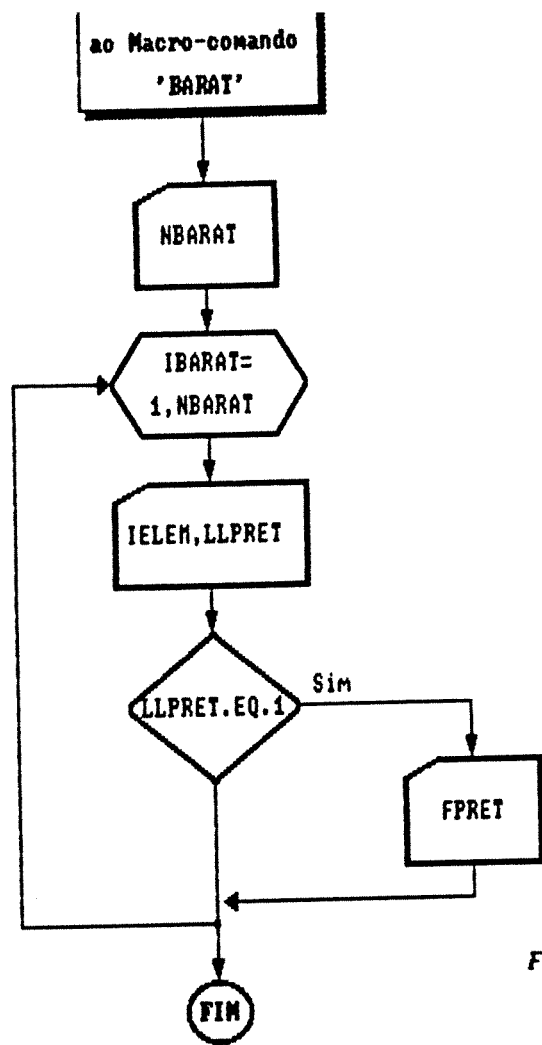


Fig.14 - Macro-comando 'BARAT'

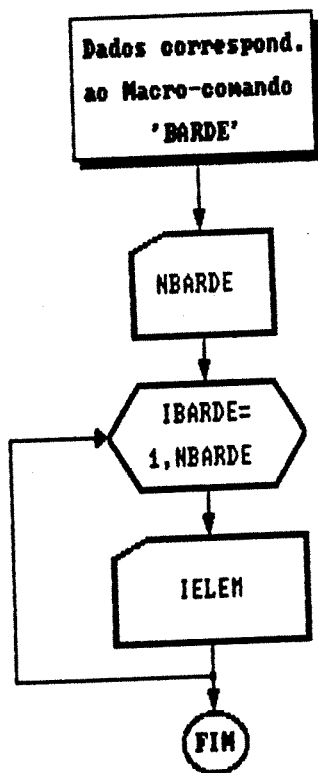


Fig.15 - Macro-comando 'BARDE'

#### 4.11 Macro-comando 'ALTCB' (fig.16)

**NALTCB** :Número de pontos nodais com condições de borda a serem alteradas

**IALTCB** :Contador dos naltcb pontos nodais com condições de borda a serem alteradas

**LNODE** :Número do ponto nodal na alteração ialtcb

**IID(1)** :Condição de borda, segundo x, do ponto nodal lnode

**IID(2)** :Condição de borda, segundo y, do ponto nodal lnode

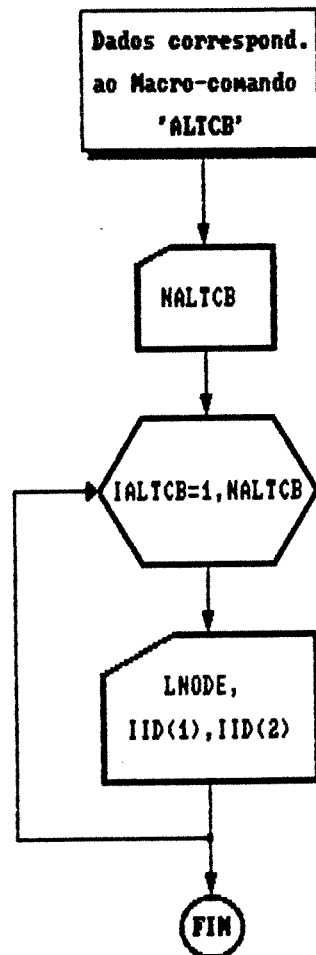


Fig.16 - Macro-comando 'ALTCB'

#### 4.12 Macro-comando 'CGRAF' (fig.17)

ARGRA :String que define o nome do arquivo de saída gráfica

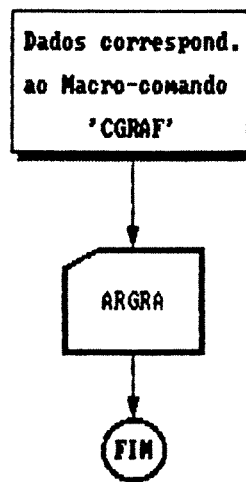


Fig.17 - Macro-comando 'CGRAF'

#### 4.13 Macro-comando 'CARIN' (fig.18)

ARIN :String que define o nome do arquivo intermediário a ser criado

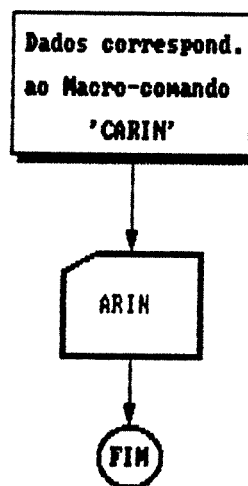


Fig.18 - Macro-comando 'CARIN'

#### 4.14 Macro-comando 'MUDMT' (fig.19)

**MATNO** :Material novo dos elementos a serem modificados  
**NGELM** :Número de grupos de elementos (de numeração consecutiva) a serem modificados  
**IGELM** :Contador dos ngelm a serem modificados  
**KEL1** :Número do primeiro elemento do grupo igelm  
**KEL2** :Número do último elemento do grupo igelm

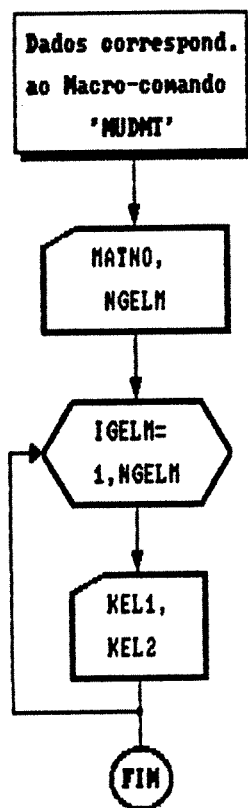


Fig.19 - Macro-comando 'MUDMT'

#### 4.15 Macro-comando 'SPPRE' (fig.20)

**NSPRE** :Número de superfícies de plastificação a serem pré-definidas  
**NGELM** :Número de grupos de elementos (de numeração consecutiva) com superfícies de plastificação a serem pré-definidas

**SPRE(1)** :Valor pré-definido da superfície de plastificação 1.  
No caso do modelo de Lade (1977,1979), **SPPRE(1)** corresponde ao valor  $f_p$  correspondente à localização da superfície de plastificação expansiva, e **SPRE(2)** corresponde ao valor  $f_c$  correspondente à localização da superfície de plastificação colapsível.

**IGELM** :Contador dos ngelm com superfícies de plastificação a serem pré-definidas

**KEL1** :Número do primeiro elemento do grupo igelm

**KEL2** :Número do último elemento do grupo igelm

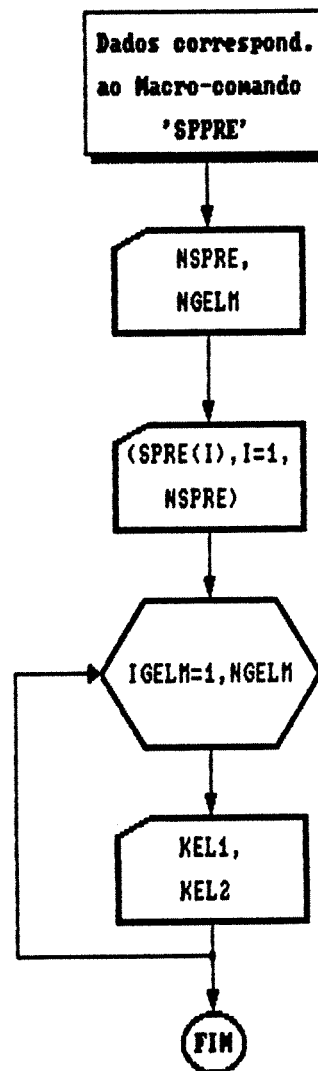


Fig. 20 - Macro-comando 'SPPRE'

#### 4.16 Macro-comando 'SOLVE' (fig.21)

**LLALGR** :Variável de controle - Tipo de algoritmo a ser utilizado na resolução do problema não linear (vide Zornberg, 1989; seção 4.3.3)

LLALGR=1 :Initial stiffness

LLALGR=2 :Tangencial stiffness

LLALGR=3 :Combined (first iteration)

LLALGR=4 :Combined (second iteration)

LLALGR=5 :Euler

**NINCS** :Número de incrementos de carga

**LLINC** :Variável de controle - Característica dos incrementos de carga

LLINC=0 :Todos os incrementos de carga são iguais

LLINC=1 :Os incrementos de carga são de magnitude diferente, estabelecida pelo valor da variável fornecida facto

**LLOUTP(1)** :Variável de controle - Impressão dos resultados em cada iteração (vide lloutp(2))

**LLOUTP(2)** :Variável de controle - Impressão dos resultados na convergencia

LLOUTP=0 :Nao ha impressão de resultados

LLOUTP.GE.1 :Sao impressos os deslocamentos

LLOUTP.GE.2 :São impressas as tensões, deformações e níveis de tensões das sups. de plastificação em cada ponto de Gauss

LLOUTP.GE.3: :São impressas as forças desequilibradas

LLOUTP.GE.4: :São impressas as forças nodais

equivalentes

- LLOUTP.GE.5: :São impressas as variáveis defmod e nsubs para cada ponto de Gauss
- TOLER :Tolerância no processo iterativo (Zornberg, 1989; pg.120)
- MITER :Número máximo de iterações permitido no processo iterativo
- DEFREF :Deformação de referência para a determinação do número de subincrementos. Sugere-se a utilização de uma deformação de referência igual à milésima parte da deformação axial obtida no estado de ruptura num ensaio triaxial convencional, executado com uma pressão confinante representativa do problema em estudo (Zornberg, 1989; seção 4.3.2)
- IINCS :Contador dos nincs incrementos de carga
- FACTO :Fator que define a parcela do carregamento total a ser considerado no incremento iincs

#### 4.17 Macro-comandos que não precisam do fornecimento de variáveis

Macro-comando 'LFORN'

Macro-comando 'ZDESL'

Macro-comando 'LVETT'

Macro-comando 'FEXEC'

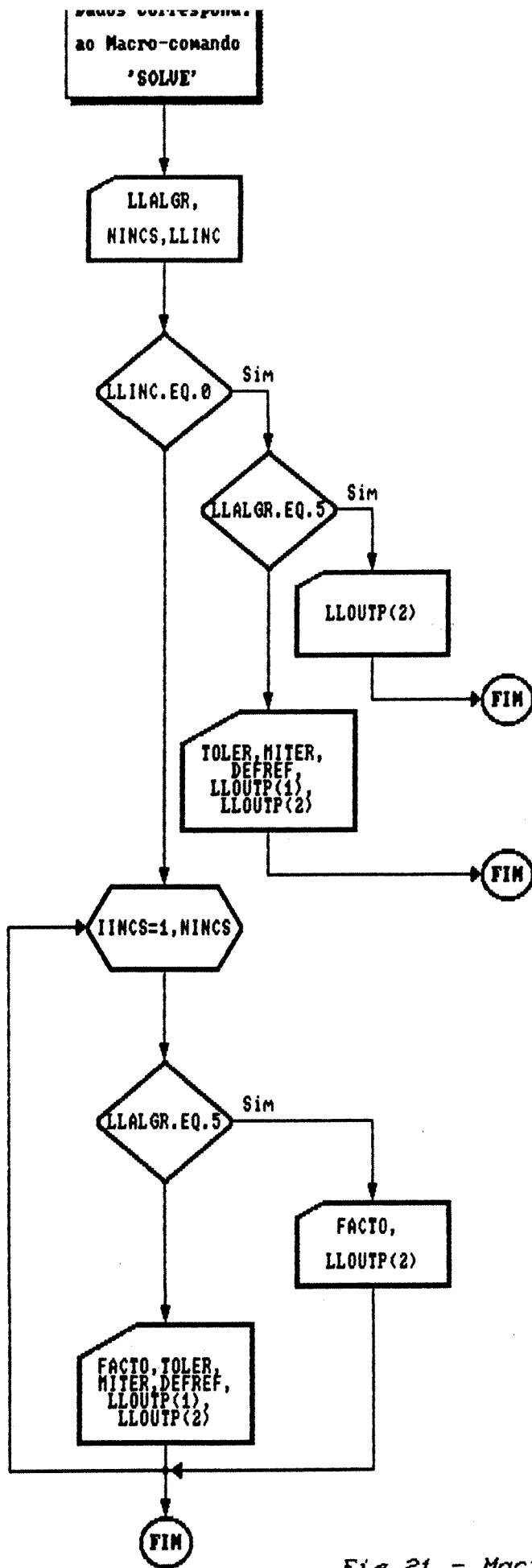


Fig. 21 - Macro-comando 'SOLVE'



#### 4.18 Parâmetros pré-fixados

São parâmetros cujos valores se encontram pré-definidos através da utilização do comando PARAMETER. Para alterar os seus valores se torna necessária a modificação da fonte do programa *ANLOG*. A seguir, indica-se o significado destes parâmetros e a sua localização no programa fonte.

**MEMORY** :Define o tamanho máximo permitido para o vetor de trabalho (programa principal *ANLOG*)

**MDELX** :Número máximo de intervalos segundo x, a serem definidos numa geração automática de malha (subrotina *DATMSH*)

**MDELY** :Número máximo de intervalos segundo y, a serem definidos numa geração automática de malha (subrotina *DATMSH*)

**MCAMD** :Número máximo de camadas possíveis na definição de um estado geostático de tensões iniciais (subrotina *TINK0*)

Valores dos parâmetros pré-fixados na versão original do programa:

PARAMETER (MEMORY=95000)

PARAMETER (MDELX=30,MDELY=30)

PARAMETER (MCAMD=20)

#### 4.19 Variáveis pré-fixadas

São variáveis cujos valores se encontram pré-definidos através da utilização do comando DATA. Para alterar os seus valores se torna necessária a modificação da fonte do programa ANLOG. A seguir, indica-se o significado destas variáveis e a sua localização no programa fonte.

- PERC** :Percentual do nível de tensões correspondente à ruptura, até o qual é permitido que o material atinja. O valor perc=100.0 pode resultar em problemas numéricos devido à consideração de rigidez nula (subrotina SOLVE)
- LLRUPT** :Variável de controle - Curva tensão-deformação na ruptura (subrotina SOLVE)
- LLRUPT=0 :Dmatx é calculada (a mesma do que a calculada na definição da matriz de rigidez)
- LLRUPT=1 :Dmatx não é calculada (a tensão na ruptura é mantida constante)
- DFACT** :Fator que permite o aumento do valor na rigidez dos elementos durante o processo iterativo (subrotina SOLVE)
- LLSTOP** :Variável de controle - Finalização da execução do programa se o problema não converge com miter iterações (subrotina SOLVE)
- LLSTOP=0 :A análise continua com a aplicação do seguinte incremento de carga

LLSTOP=1 :A análise é finalizada

LLTELA :Variável de controle - Impressão na tela do computador (subrotina *SOLVE*)

LLTELA=0 :As iterações da análise não são impressas na tela do computador

LLTELA=1 :As iterações são impressas na tela

BFACT :Relação entre as rigidezes no comportamento a tração e a compressão nos elementos de barra de comportamento bilinear (subrotinas *SOLVE*, *BARAT* e *BARDE*)

LLDEF :Variável de controle - Armazenamento da matriz de deformações de cada ponto de Gauss da malha (subrotinas *DADOS*, *ESCAV* e *SOLVE*)

LLDEF=0 :A matriz das deformações não sera armazenada (ganha-se espaço de memória)

LLDEF=1 :A matriz das deformações sera definida

Valores das variáveis pré-fixadas na versão original do programa:

DATA PERC /0.99/  
DATA LLRUPT /1/  
DATA DFACT /1.0/  
DATA LLSTOP /0/  
DATA LLTELA /1/  
DATA BFACT /100000./  
DATA LLDEF /1/

## 5 - ARQUIVO DE DADOS NUM EXEMPLO DE APLICAÇÃO

A seguir serão apresentados os arquivos de dados utilizados na análise do Caso Salas Técnicas (Zornberg, 1989), escavação escorada executada como parte do processo de expansão do Metropolitano da cidade de São Paulo.

A malha de elementos finitos utilizada na representação do meio contínuo (Zornberg, 1989; seção 7.4.1), assim como a simulação do processo construtivo (Zornberg, 1989; seção 7.4.2) e os diferentes macro-comandos utilizados, não serão aqui indicados.

A seguir, são apresentados, nas figuras 22, 23, 24, 25, 26, 27 e 28, os sete arquivos de dados que foram utilizados para dar sequência a esta análise. O presente estudo efetuou-se considerando estas sete entradas de dados no processamento para, desta forma, poder analisar os resultados de cada uma das fases em estudo antes de passar à análise da fase seguinte. Outra possibilidade teria sido efetuar a análise toda a partir de um arquivo único de dados obtendo, desta forma, um arquivo de saída de resultados único que conteria as informações correspondentes a todas as fases da obra em estudo.

'DADOS'										
'SALAS TECNICAS, STECOD:ESCAV.PREDIO'										
481	147	5								... IDENT
1	4									... NPOIN, NELEM, NMATS
1										... LLTYPE, LLSIM
1										... NGAUT
1	1		0.			0.				... NNEL, NNO, XGL(NNO,1), XGL(NNO,2)
12										... NDELX
6.35	2.00	1.00	1.50	3.65						
1.00	3.00	15.00	15.00	3.00						
1.00	14.50									... (DELX(I), I=1, NDELX)
12										... NDELY
11.7	4.40	2.50	2.00	7.40						
2.00	2.00	4.00	2.00	6.00						
2.00	4.00									... (DELY(I), I=1, NDELY)
0	3	0								... NPSGI, NELGI, NTRASL
145	22	98	0	0	0	0	0	0		
146	18	94	0	0	0	0	0	0		
147	12	88	0	0	0	0	0	0		... (K, (KELEM(K, I), I=1, 8) J=1, NELGI)
4	4	1	5	5						... (MTCOD(I), I=1, NMATS)
101.32										... PRATM
153.9736	0.568546		0.25							... KUR, NN, NI
.884275	133.6332									
.4054	0.0	3.679376	-17.46982							
.414041	.446428	1.65	0.0							... MM, ETA1, S1, S2, T1, T2, W1, W2, Q1, Q2
1000.	.01985998									... CL, PC
1										... NGELM
85	144	1								... KEL1, KEL2, KATIV
1051.4634	0.111901	0.29								... KUR, NN, NI
1.2048	561.1292									
.4054	0.0	3.679376	-17.46982							
.414041	.446428	1.65	0.0							... MM, ETA1, S1, S2, T1, T2, W1, W2, Q1, Q2
1000.	.01985998									... CL, PC
1										... NGELM
1	84	1								... KEL1, KEL2, KATIV
36446.46964	0.0	0.3								... KUR, NN, NI
0										... NGELM
.02801	28500000	2								... AREA, EE, TBAR
1										... NGELM
145	146	0								... KEL1, KEL2, KATIV
.08345	28500000	2								... AREA, EE, TBAR
1										... NGELM
147	147	0								... KEL1, KEL2, KATIV
4	0									... NCBGR, NCBGI
2	25	1	1	0						
458	481	1	1	0						
1	457	38	1	1						
26	444	38	1	1						... (PINIC, PFINL, INCR, IDX IDY, I=1, NGRCB)
'LFORN'										

Fig. 22 - Arquivo de dados da 1a. análise do problema

```

'TINKO'
2 ...NCAMD
50. 14.709 0.73
32. 7.3545 1.107 ... (COTAS(I),GAMA(I),
XKO(I),I=1,NCAMD)
'CGRAF'
'INICG'
'SPPRE'
2 1 ...NSPRE,NGELM
505. 1850000. ... (SPRE(I),I=1,NSPRE)
1 91 ...KEL1,KEL2
'MUDMT'
3 8 ...MATNO,NGELM
102 102
107 107
114 114
119 119
126 126
131 131
138 138
143 143 ...KEL1,KEL2
'LFORN'
'ESCAV'
8 ...NELES
127 5 251
128 3 287
129 3 325
130 5 363
139 3 253
140 0 0
141 0 0
142 3 403 ... (IELEM,NPESC,PINIC,
I=1,NELES)
'LFORN'
'SOLVE'
2 5 0 ...LLALGR,NINCS,LLINC
.01 100 .0001 0 2 ...TOLER,MITER,DEFREF,
LLOUTP(1),LLOUTP(2)
'LFORN'
'CGRAF'
'STECOG'
'CARIN'
'STECOI'
'FEXEC'

```

Fig. 22 - Arquivo de dados da 1a. análise do problema (Cont.)

```

'LARIN'
'STECOI'
'S.TECN.,STEC1D:FUNDACAO'
'CRREG'
0 0 2
357 337 319
223.5678 0. 223.5678 0. 223.5678 0.
319 299 281
223.5678 0. 223.5678 0. 223.5678 0.

'SOLVE'
2 5 0
.01 100 .0001 0 5

'CGRAF'
'STEC1G'
'CARIN'
'STEC1I'
'FEXEC'

...ARIN
...IDENT
...NPLOAD,NGRAV,NEDGE
...((NOPRS(I),I=1,3)
...((PRESS(I,IDF),IDF=1,
2,,I=1,3)
...LLALGR,NINCS,LLINC
...TOLER,MITER,DEFREF,
LLOUTP(1),LLOUTP(2)

```

Fig. 23 - Arquivo de dados da 2a. análise do problema

```

'LARIN'
'STEC1I'
'S.TECN.,STEC2D:REBAIXAMENTO'
'ZDESL'
'LFORN'
'CRREG'
0 1 0
0. -9.806 25 84

'LFORN'
'SOLVE'
2 5 0
.01 100 .0001 0 5

'CGRAF'
'STEC2G'
'CARIN'
'STEC2I'
'FEXEC'

...ARIN
...IDENT
...NPLOAD,NGRAV,NEDGE
...GCOM(1),GCOM(2),
KGRAV1,KGRAV2
...LLALGR,NINCS,LLINC
...TOLER,MITER,DEFREF,
LLOUTP(1),LLOUTP(2)

```

Fig. 24 - Arquivo de dados da 3a. análise do problema

```

'LARIN'
'STEC2I'
'S.TECN.,STEC3D:1A. ETAPA ESCAV.'
'ZDESL'
'LFORN'
'MUDMT'
3      11
15     15
27     27
39     39
51     51
63     63
75     75
87     87
99     99
111    111
123    123
135    135
'ESCAV'
4
121    3    21
122    5    59
133    0    0
134    3    99
'LFORN'
'SOLVE'
2      5    0
.01   100  .0001  0    2
'CGRAF'
'STEC3G'
'CARIN'
'STEC3I'
'FEXEC'
...ARIN
...IDENT
...MATNO,NGELM
...KEL1,KEL2
...NELES
...IELEM,NPESC,PINIC
...LLALGR,NINCS,LLINC
...TOLER,MITER,DEFREF,
LLOUTP(1),LLOUTP(2)

```

Fig. 25 - Arquivo de dados da 4a. análise do problema



```

'LARIN'
'STEC3I' ...ARIN
'S.TECN.,STEC4D:2A. ETAPA ESCAV.' ...IDENT
'BARAT'
1 ...NBARAT
145 0 ...IELEM,LLPRET
'ESCAV'
4 ...NELES
97 3 17
98 5 55
109 0 0
110 3 95 ...IELEM,NPESC,PINIC
'SOLVE'
2 5 0 ...LLALGR,NINCS,LLINC
.01 100 .0001 0 2 ...TOLER,MITER,DEFREF,
LLOUTP(1),LLOUTP(2)

'CGRAF'
'STEC4G'
'CARIN'
'STEC4I'
'FEXEC'

```

Fig. 26 - Arquivo de dados da 5a. análise do problema

```

'LARIN'
'STEC4I' ...ARIN
'S.TECN.,STEC4D:3A. ETAPA ESCAV.' ...IDENT
'BARAT'
1 ...NBARAT
146 0 ...IELEM,LLPRET
'ESCAV'
6 ...NELES
61 3 11
62 5 49
73 0 0
74 3 89
85 0 0
86 3 91 ...IELEM,NPESC,PINIC
'SOLVE'
2 5 0 ...LLALGR,NINCS,LLINC
.01 100 .0001 0 2 ...TOLER,MITER,DEFREF,
LLOUTP(1),LLOUTP(2)

'CGRAF'
'STEC5G'
'CARIN'
'STEC5I'
'FEXEC'

```

Fig. 27 - Arquivo de dados da 6a. análise do problema

'LARIN'					...	ARIN
'STEC5I'					...	IDENT
'S.TECN.,STEC4D:4A. ETAPA ESCAV.'						
'BARAT'					...	NBARAT
1					...	IELEM,LLPRET
147	0					
'ESCAV'					...	NELES
4						
37	3	7				
38	5	45				
49	0	0				
50	3	85			...	IELEM,NPESC,PINIC
'SOLVE'						
2	5	0			...	LLALGR,NINCS,LLINC
.01	100	.0001	0	2	...	TOLER,MITER,DEFREF, LLOUTP(1),LLOUTP(2)
'CGRAF'						
'STEC6G'						
'CARIN'						
'STEC6I'						
'FEXEC'						

Fig. 28 - Arquivo de dados da 7a. análise do problema

## 6 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Cook, R. D. *Concepts and Applications of Finite Element Analysis*. Second Edition, John Wiley and Sons, New York, 1981.

Jennings, A. *Matrix Computations for Engineers and Scientists*. John Wiley and Sons, New York, 1977.

Kulhawy, F. H. "Embankments and Excavations". In: Desai, C. S. and Christian, J. T., *Numerical Methods in Geotechnical Engineering*. McGraw-Hill Inc., New York, 1977.

Lade, P. V. "Elasto-Plastic Stress-Strain Theory for Cohesionless Soil with Curved Yield Surfaces". *International Journal of Solids and Structures*, Vol.13, 1977, pp.1019-1035.

Lade, P. V. "Stress-Strain Theory for Normally Consolidated Clay". *Proceedings of the Third International Conference on Numerical Methods in Geomechanics*, Vol.4, Aachen, 1979, pp.1325-1337.

Mana, A. I. *Finite Element Analyses of Deep Excavation in Soft Clay*. Ph.D. Thesis, Stanford University, California, 1978.

Naylor, D.J. and Pande, G. N. *Finite Elements in Geotechnical Engineering*, First Edition, Pineridge Press, Swansea, 1981.

Taylor, R. L. "Computer Procedures for Finite Element Analysis". In: Zienkiewicz, O. C., *The Finite Element Method*, Third Edition, McGraw-Hill Book Company, New York, 1977.

Zornberg, J.G. *Análise por Elementos Finitos do Comportamento de Escavações Utilizando um Modelo Elasto-Plástico*. Tese de Mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, agosto/1989.

Zienkiewicz, O. C. *The Finite Element Method*. Third Edition, McGraw-Hill Book Company, New York, 1977.

## APÊNDICE

### SIGNIFICADO DE VARIÁVEIS NA SAÍDA DE RESULTADOS AO EXECUTAR O MACRO-COMANDO 'SOLVE'

As variáveis, cujos significados são indicados a seguir, correspondem a resultados a serem fornecidos, no arquivo de saída do programa, quando executado o macro-comando 'SOLVE'.

XGAUS(1)	:Coordenada, segundo x, de cada ponto de Gauss de Integração
XGAUS(2)	:Coordenada, segundo y, de cada ponto de Gauss de Integração
STRESX	:Valor da Tensão Normal, segundo x, em cada ponto de Gauss
STRESY	:Valor da Tensão Normal, segundo y, em cada ponto de Gauss
STRESZ	:Valor da Tensão, segundo z (direção com $\epsilon_z=0.0$ ), em cada ponto de Gauss
STRESXY	:Valor da Tensão Cizalhante, segundo xy, em cada ponto de Gauss
DEFX	:Deformação $\epsilon_x$
DEFY	:Deformação $\epsilon_y$
DEFZ	:Deformação $\epsilon_z$

DEFXY :Deformação  $\gamma_{xy}$

ILOAD :Tipo de carregamento. Define-se se nenhuma, uma ou duas superfícies de plastificação estão sendo ativadas no carregamento. Para o modelo de Lade (1977,1979):

ILOAD=1 :Deformações elásticas

ILOAD=2 :Deform. elást. + deform. plást. colapsíveis

ILOAD=3 :Deform. elást. + deform. plást. expansíveis

ILOAD=4 :Deform. elást. + deform. plást. colapsíveis + deform. plást. expansíveis

ILOAD=5 :Estado de ruptura (deform. elásticas + deform.plásticas expansíveis)

SUP1 :Nível de Tensões, definido pelo estado de tensões existente no ponto de Gauss, correspondente à 1a. superfície de plastificação (superfície expansiva no modelo de Lade).

S1MAX :Nível de Tensões máximo alcançado no ponto de Gauss pela 1a. superfície de plastificação (localização desta superfície)

SUP2 :Nível de Tensões, definido pelo estado de tensões existente no ponto de Gauss, correspondente à 2a. superfície de plastificação (superfície colapsível no modelo de Lade).

S2MAX :Nível de Tensões máximo alcançado no ponto de Gauss pela 2a. superfície de plastificação (localização desta superfície)

Quando acontece uma mudança no tipo de carregamento `iload` num determinado ponto de Gauss igaus de um determinado elemento `ielem`, será impresso:

`ISUB` :Número do sub-incremento onde acontece a mudança no tipo de carregamento

`ILOAD` :Tipo de carregamento inicial

`JLOAD` :Tipo de carregamento final

`DESL(1,IPOIN)` :Deslocamento, segundo x, do ponto nodal `ipoin`

`DESL(2,IPOIN)` :Deslocamento, segundo y, do ponto nodal `ipoin`

`LLCHEK` :Controle de convergencia

`LLCHEK=0` :0 processo iterativo convergiu

`LLCHEK=1` :0 processo iterativo esta convergindo

`LLCHEK=999`:0 processo iterativo esta divergindo

`RATIO` :Relação existente entre a norma das forças desequilibradas numa determinada iteração do processo e a norma do incremento de carga externa aplicado. Comparado com o valor `toler`, tolerância fornecida como dado, define a convergência do processo iterativo.

`REMAX` :Valor da máxima força nodal desequilibrada numa determinada iteração do processo

`NOMAX` :Número do ponto nodal onde se encontra aplicada a força `remax`

