
MANUAL DE UTILIZAÇÃO DO PROGRAMA FEMIX

Versão 2.1 / Fevereiro 1992

Autores:

Álvaro F. M. Azevedo – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto – Portugal

Joaquim A. O. Barros – Universidade do Minho - Portugal

CAPÍTULO 1

1 - INTRODUÇÃO

Neste manual é descrito o modo de utilização do programa de cálculo automático com o nome genérico de **FEMIX**, que é composto pelos módulos prefemix, femix e posfemix. O único ficheiro de dados necessário à execução destes três módulos tem a extensão _gl.dat e a sua estruturação é detalhadamente explicada neste manual. Os programas e ficheiros relacionados com a preparação de malhas e visualização de resultados são descritos noutros manuais.

O método dos deslocamentos e a discretização em elementos finitos fundamentaram a elaboração do programa **FEMIX**, que permite analisar em regime estático e linear estruturas constituídas por materiais homogéneos e isotrópicos.

O programa está preparado para proceder à análise dos seguintes tipos de estruturas:

- 1 - Estruturas submetidas a um estado plano de tensão;
- 2 - Estruturas submetidas a um estado plano de deformação;
- 3 - Estruturas submetidas a um estado axissimétrico de tensão e deformação;

- 4 - Estruturas tridimensionais discretizadas por elementos de volume (bricks);
- 5 - Lajes (formulação de Mindlin);
- 6 - Cascas espessas (formulação de Ahmad);
- 7 - Estruturas reticuladas tridimensionais (pórticos);
- 8 - Estruturas articuladas tridimensionais (treliças).

Apresentam-se em seguida as condições em que foi formulado cada tipo de problema:

- 1 - Estrutura com uma superfície média plana (xy); espessura segundo z pequena em relação às restantes dimensões e eventualmente variável; tensão desprezável na direcção z ; forças e deslocamentos não dependem da coordenada z e são paralelos ao plano médio da estrutura (Ex: viga parede).
- 2 - Estrutura cilíndrica com as duas bases do cilindro impedidas de se deslocarem na direcção da geratriz (z) ou com a altura do cilindro grande em relação às suas dimensões transversais (xy); deformação desprezável na direcção perpendicular ao plano médio (xy); forças e deslocamentos não dependem da coordenada z e são paralelos ao plano médio; dados e resultados relativos a um cilindro de altura unitária (Ex: barragem gravidade).
- 3 - Estrutura e acções simétricas em relação a um eixo (obrigatoriamente o eixo y); as coordenadas x são distâncias ao eixo de simetria e têm de ser todas positivas (Ex: chaminé de secção variável sujeita ao peso próprio).
- 4 - Estrutura e acções tridimensionais sem qualquer restrição.
- 5 - Estrutura com uma superfície média plana (xy); espessura segundo z compreendida entre $1/10$ e $1/100$ das restantes dimensões e eventualmente variável; tensão desprezável na direcção z ; não são consideradas as forças e deslocamentos contidos no plano da estrutura, ie, o funcionamento como membrana não é incluído na formulação; as forças e deslocamentos são perpendiculares ao plano médio; os momentos e as rotações estão contidos em planos perpendiculares ao plano médio; são consideradas as deformações por flexão e corte (Ex: laje fungiforme).
- 6 - Estrutura laminar (casca) com uma superfície média qualquer e eventualmente com arestas (kinks) onde podem convergir mais do que duas superfícies; espessura eventualmente variável; na formulação não é considerada a rotação contida no plano tangente à superfície média; são também desprezadas as componentes

normais à superfície média da tensão e deformação; são consideradas as deformações de membrana, flexão e corte (Ex: ponte em viga caixão com consolas laterais).

- 7 - Estrutura reticulada tridimensional com continuidade de deslocamentos e rotações; barras prismáticas de secção constante; centro de corte coincidente com o centro de gravidade em cada secção transversal; são consideradas as deformações axiais e de flexão; não é considerada a deformação por corte (Ex: pórtico tridimensional de betão armado).
- 8 - Situação igual à do tipo de estrutura anterior com a excepção de as barras serem consideradas biarticuladas (Ex: cobertura metálica tridimensional construída com perfis tubulares).

Na presente versão do programa, as estruturas só podem ser discretizadas com um único tipo de elemento. Para clarificar esta questão indica-se como exemplo que não é permitido proceder a uma análise em que figurem simultaneamente elementos de casca e elementos de barra tridimensional, ou qualquer outra combinação de elementos de diferentes tipos.

As estruturas podem ser submetidas a diversos casos de carga. As respectivas combinações são efectuadas posteriormente, recorrendo à leitura dos ficheiros que contêm os resultados relativos aos diversos casos de carga.

Como foi já referido, neste manual são descritos os módulos prefemix, femix e posfemix, que são programas independentes que realizam as seguintes tarefas (ver também o Anexo D):

- O programa prefemix lê um ficheiro de dados formatado (extensão _gl.dat), verifica a informação nele contida e escreve os dados num ficheiro não formatado (extensão _gl.bin).
- Em seguida, o programa femix lê o ficheiro não formatado com os dados e calcula os deslocamentos e reacções para cada caso de carga. Estes valores ficam guardados em dois ficheiros não formatados, um com os deslocamentos (extensão _di.bin) e outro com as reacções (extensão _re.bin). Durante a execução do programa femix são gravados ficheiros temporários com a extensão .tmp que não serão apagados se a execução for interrompida.
- O programa posfemix destina-se ao posprocessamento dos dados e resultados. A partir da leitura dos ficheiros não formatados com os dados, deslocamentos e reacções e de acordo com as selecções efectuadas por menus, podem ser obtidos

ficheiros com os resultados sob a forma numérica e ficheiros específicos para tratamento gráfico com outros programas. As combinações de casos de carga são opcionalmente efectuadas pelo módulo posfemix.

As dimensões das unidades a utilizar no programa deverão estar de acordo com a convenção do sistema internacional (SI):

Unidade de comprimento	- [L]
Unidade de força	- [F]
Unidade de massa	- [M]
Unidade de tempo	- [T]
Unidade de temperatura	- [°C]

Ao longo do presente texto serão indicadas as dimensões relativas a cada grandeza.

Embora possa ser utilizado um qualquer conjunto de unidades coerente, é no entanto aconselhável a escolha de umas unidades tais que a geometria da estrutura seja caracterizada por números entre 0.1 e 100.0 e os deslocamentos e rotações tenham ordens de grandeza semelhantes e valores absolutos máximos entre 0.001 e 1.0. Este requisito destina-se a assegurar que a matriz de rigidez global seja bem condicionada, que não surjam erros exagerados na resolução do sistema de equações, que a representação de números com um número fixo de casas decimais apresente algarismos significativos suficientes e que certas tolerâncias fixas não percam o significado.

CAPÍTULO 2

2 - ESTRUTURA DO FICHEIRO DE DADOS

2.1 - CONSIDERAÇÕES GERAIS

Neste capítulo é apresentada e descrita em pormenor a estrutura do ficheiro em que é colocada toda a informação necessária à execução dos programas *prefemix*, *femix* e *posfemix*. Esse ficheiro de dados tem a extensão gl.dat e é um ficheiro formatado que pode ser preparado e modificado com qualquer editor de texto. É no entanto preferível recorrer a programas de geração automática de ficheiros de dados.

O ficheiro com a extensão gl.dat é lido e validado pelo programa *prefemix*, sendo gravado um ficheiro não formatado (binário) com a extensão gl.bin. Os programas *femix* e *posfemix* lêem os dados no ficheiro gl.bin, ignorando qualquer alteração que seja efectuada no ficheiro gl.dat após a execução do programa *prefemix*.

Os programas prefemix, femix e posfemix podem ser executados sem qualquer argumento na linha de comandos, sendo toda a informação necessária solicitada interactivamente ao utilizador. A primeira pergunta corresponde sempre ao jobname, que é a palavra que antecede a extensão _gl.dat, _gl.bin, etc. nos nomes dos ficheiros. No caso do programa prefemix nada mais é pedido, devendo a execução terminar com a mensagem ###Success###. Se tal não acontecer terá de ser consultada a mensagem de erro e as mensagens que a antecedem para se poder concluir qual a validação que falhou e em seguida proceder à correcção do ficheiro de dados.

O programa prefemix pode também ser executado com o jobname como argumento da linha de comando.

Ex: prefemix demo1

Sempre que não seja utilizado um programa de geração automática de dados, o ficheiro com a extensão _gl.dat deve ser preparado com base num dos ficheiros exemplo (demo1_gl.dat a demo8_gl.dat). Deste modo é facilitada a identificação do conteúdo dos diversos blocos de dados devido à presença de inúmeros comentários, diminuindo assim a probabilidade de cometer erros na preparação dos dados.

Na Fig. 2.1 apresenta-se a malha, condições de apoio e solicitações correspondentes a uma estrutura submetida a um estado plano de tensão.

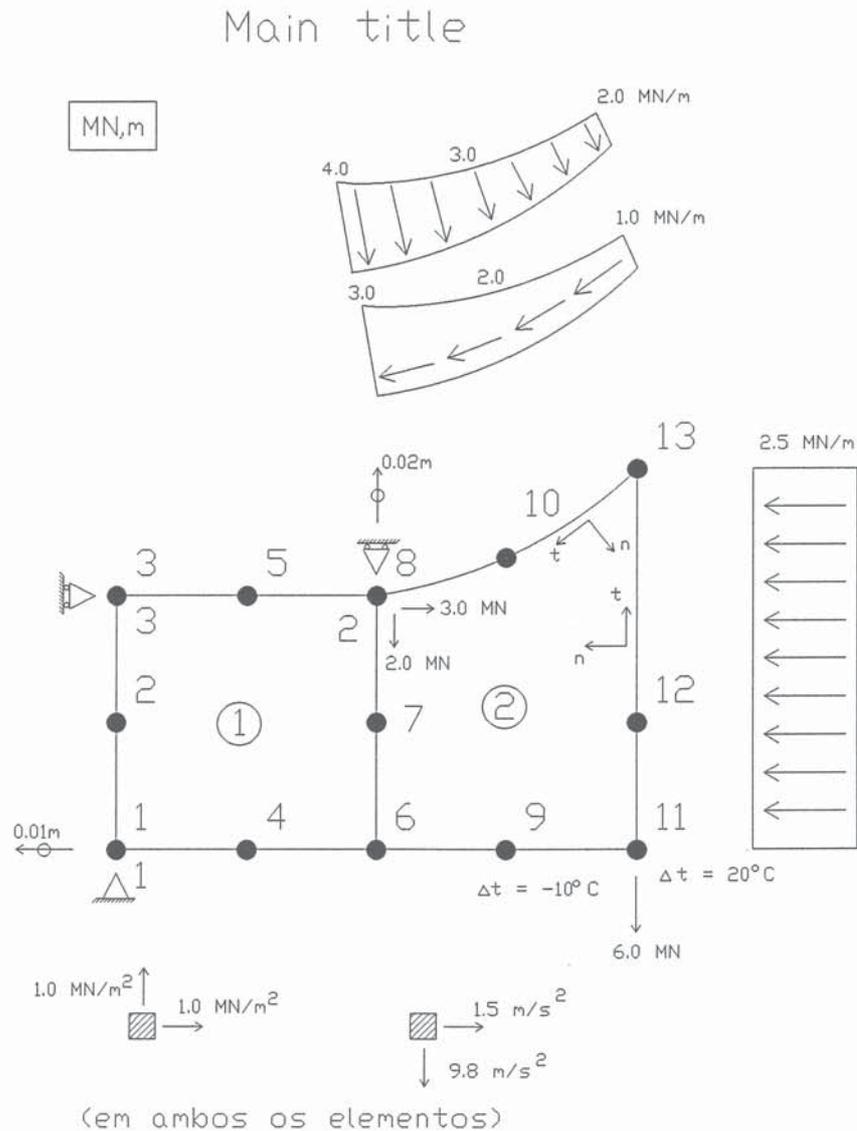


Fig. 2.1 - Malha, condições de apoio e solicitações correspondentes a uma estrutura submetida a um estado plano de tensão.

Apresenta-se em seguida o ficheiro de dados correspondente à referida estrutura:

```

### Main title of the problem
Main title

### Main parameters
 2 # nelem (n. of elements in the mesh)
13 # npoin (n. of points in the mesh)
 3 # nvfix (n. of points with fixed degrees of freedom)
 2 # ncase (n. of load cases)

```

```

2 # nmats (n. of sets of material properties)
2 # nspen (n. of sets of element nodal properties)
1 # ntype (problem type)
8 # nnode (n. of nodes per element)
3 # ngaus (n. of Gauss points in the integration rule) (element stiffness)
2 # ngstr (n. of Gauss points in the integration rule) (stresses)
2 # ndime (n. of geometric dimensions)
2 # ndofn (n. of degrees of freedom per node)
4 # nprop (n. of material properties used in the formulation)
1 # npren (n. of element nodal properties used in the formulation)

### Material properties index, element nodal properties index and
### list of the nodes of each element
# ielem matno ielnp      lnods ...
   1   2   2   1  4  6  7  8  5  3  2
   2   1   1   6  9 11 12 13 10 8  7

### Coordinates of the points
# ipoin coord-x coord-y
   1   0.0   0.0
   2   0.0   1.0
   3   0.0   2.0
   4   1.0   0.0
   5   1.0   2.0
   6   2.0   0.0
   7   2.0   1.0
   8   2.0   2.0
   9   3.0   0.0
  10   3.0   2.3
  11   4.0   0.0
  12   4.0   1.0
  13   4.0   3.0

### Points with fixed degrees of freedom and fixity codes (1-fixed;0-free)
# ivfix nofix      ifpre ...
   1   1   1   1  1
   2   8   0   1
   3   3   1  0

### Sets of material properties
### (Young modulus, Poisson ratio, mass per unit volume and thermic coeff.)
# imats  young  poiss  dense  alpha
   1  170000.0  0.2  7800e-6  1e-4
   2  120000.0  0.3  2500e-6  2e-4

### Sets of element nodal properties
# ispen
  1
# inode  thickness
   1   0.3
   2   0.3
   3   0.3
   4   0.3
   5   0.3
   6   0.3

```

```

      7      0.3
      8      0.3
# ispen
      2
# inode thickness
      1      0.2
      2      0.2
      3      0.2
      4      0.2
      5      0.2
      6      0.2
      7      0.2
      8      0.2

# =====
### Title of the first load case
Load case title (1)

### Load parameters
      2 # nplod (n. of point loads in nodal points)
      1 # ngrav (gravity load flag: 1=yes;0=no)
      2 # nedge (n. of edge loads) (F.E.M. only)
      2 # nface (n. of face loads) (F.E.M. only)
      2 # ntemp (n. of points with temperature variation) (F.E.M. only)
      0 # nudis (n. of uniformly distributed loads) (3d frames and trusses only)
      0 # nepoi (n. of element point loads) (3d frames and trusses only)
      2 # nprva (n. of prescribed and non zero degrees of freedom)

### Point loads in nodal points (loaded point and load value)
### (global coordinate system)
# iplod lopop  pload-x  pload-y
      1      11      0.0      -6.0
      2      8       3.0      -2.0

### Gravity load (gravity acceleration)
### (global coordinate system)
# gravi-x  gravi-y
      1.5     -9.8

### Edge load (loaded element, loaded points and load value)
### (local coordinate system)
# iedge loele
      1      2
# lopoe  qt  qn
      11     0.0  2.5
      12     0.0  2.5
      13     0.0  2.5
# iedge loele
      2      2
# lopoe  qt  qn
      13     1.0  2.0
      10     2.0  3.0
      8      3.0  4.0

```

```

### Face load (loaded element, loaded points and load value)
### (local coordinate system)
# iface loelf
  1 1
# lopof qs1 qs2
  1 1.0 1.0
  4 1.0 1.0
  6 1.0 1.0
  7 1.0 1.0
  8 1.0 1.0
  5 1.0 1.0
  3 1.0 1.0
  2 1.0 1.0
# iface loelf
  2 2
# lopof qs1 qs2
  6 1.0 1.0
  9 1.0 1.0
 11 1.0 1.0
 12 1.0 1.0
 13 1.0 1.0
 10 1.0 1.0
  8 1.0 1.0
  7 1.0 1.0

### Thermal load (loaded point and temperature variation)
# itemp lopot tempn
  1 11 20.0
  2  9 -10.0

### Prescribed variables (point, degree of freedom and prescribed value)
### (global coordinate system)
# iprva nnodp ndofp prval
  1  8  2  0.02
  2  1  1 -0.01

# =====
### Title of the second load case
Load case title (2)

### Load parameters
0 # nplod (n. of point loads in nodal points)
1 # ngrav (gravity load flag: 1=yes;0=no)
0 # nedge (n. of edge loads) (F.E.M. only)
0 # nface (n. of face loads) (F.E.M. only)
0 # ntemp (n. of points with temperature variation) (F.E.M. only)
0 # nudis (n. of uniformly distributed loads) (3d frames and trusses only)
0 # nepoi (n. of element point loads) (3d frames and trusses only)
0 # nprva (n. of prescribed and non zero degrees of freedom)

### Point loads in nodal points (loaded point and load value)
### (global coordinate system)
# iplod lopop pload-x pload-y

```

```
### Gravity load (gravity acceleration)
### (global coordinate system)
# gravi-x gravi-y
    0.0   -9.8

### Edge load (loaded element, loaded points and load value)
### (local coordinate system)
# iedge loele
# lopoe qt qn

### Face load (loaded element, loaded points and load value)
### (local coordinate system)
# iface loelf
# lopof qs1 qs2

### Thermal load (loaded point and temperature variation)
# itemp lopot tempn

### Prescribed variables (point, degree of freedom and prescribed value)
### (global coordinate system)
# iprva nnodp ndofp prval

END_OF_FILE
```

Relativamente a este ficheiro de dados tipo há a salientar os seguintes aspectos que são comuns aos diversos tipos de estruturas:

- i) As linhas em branco são ignoradas pelo programa prefemix, podendo estas ser acrescentadas em qualquer local ou eliminadas.
- ii) Todos os caracteres à direita do símbolo # são ignorados pelo programa de leitura de dados. Desta forma é permitido ao utilizador comentar livremente o ficheiro de dados de forma a torná-lo mais compreensível.
- iii) Os diferentes dados numéricos devem estar separados por um ou mais espaços em branco, sendo a leitura efectuada em formato livre.
- iv) A análise do ficheiro de dados relativo à Fig. 2.1 permite verificar que ele é constituído pelos seguintes blocos:
 - 1 - Título do problema - "Main title of the problem";
 - 2 - Parâmetros principais - "Main parameters";
 - 3 - Definição da topologia da malha - "Material properties index, element nodal properties index and list of the nodes of each element";
 - 4 - Coordenadas cartesianas dos nós - "Coordinates of the points";
 - 5 - Ligações da estrutura ao exterior - "Points with fixed degrees of freedom and fixity codes";

- 6 - Propriedades físicas dos materiais - "Sets of material properties";
- 7 - Propriedades geométricas associadas aos nós dos elementos - "Sets of element nodal properties";
- 8 - Título do caso de carga - "Title of the ith load case";
- 9 - Parâmetros que caracterizam as acções em cada caso de carga - "Load parameters";
- 10 - Forças generalizadas aplicadas em pontos nodais - "Point loads in nodal points (loaded point and load value)";
- 11 - Acção gravítica - "Gravity load (gravity acceleration)";
- 12 - Forças generalizadas distribuídas por unidade de comprimento em bordos de elementos - "Edge load (loaded element, loaded points and load value)";
- 13 - Forças generalizadas distribuídas por unidade de área nas faces dos elementos - "Face load (loaded element, loaded points and load value)";
- 14 - Acção térmica - "thermal load (loaded point and temperature variation)";
- 15 - Deslocamento prescritos - "Prescribed variables (point, degree of freedom and prescribed value)";
- 16 - Palavra chave indicando o fim do ficheiro de dados - "END_OF_FILE".

A ordem destes blocos não pode ser alterada e o ficheiro de dados tem que terminar com a palavra END_OF_FILE.

No caso de estruturas discretizadas por barras prismáticas (estrutura do tipo 7 ou 8), os blocos 12, 13 e 14 não podem existir figurando no seu lugar os seguintes:

- 12 - Forças generalizadas distribuídas por unidade de comprimento em barras - "Uniformly distributed load in 3d frame or truss elements (loaded element and load value)";
- 13 - Forças generalizadas aplicadas em pontos do interior do elemento - "Element point load in 3d frame or truss elements (loaded element, distance to the left end and load value)".

2.2 - BLOCOS QUE CONSTITUEM UM FICHEIRO DE DADOS COMPLETO

Em seguida apresenta-se a descrição detalhada dos blocos que constituem um ficheiro de dados tipo.

A análise dos diferentes blocos de dados será feita pela ordem referida na Secção 2.1, que corresponde à sequência existente num ficheiro de dados genérico, como é exemplo o ficheiro de dados relativo à Fig. 2.1.

Serão inseridas referências ao caso das estruturas discretizadas por barras prismáticas.

2.2.1 - Título do problema

A frase correspondente ao título do problema não pode exceder os 80 caracteres.

2.2.2 - Parâmetros principais

- nelem = número de elementos em que a estrutura está discretizada.
- npoin = número de nós da malha de elementos finitos.
- nvfix = número de nós com uma ou mais ligações ao exterior.
- ncase = número de casos de carga que solicitam a estrutura.
- nmats = número de materiais com propriedades físicas diferentes.
- nspen = número de secções nodais com propriedades geométricas distintas.
- ntype = parâmetro que indica qual o tipo de estrutura e que pode ter os seguintes valores:
 - 1 ⇒ estrutura submetida a um estado plano de tensão
 - 2 ⇒ estrutura submetida a um estado plano de deformação
 - 3 ⇒ estrutura submetida a um estado axissimétrico de tensão e deformação
 - 4 ⇒ estrutura tridimensional discretizada por elementos de volume (bricks)
 - 5 ⇒ laje (formulação de Mindlin)
 - 6 ⇒ casca espessa (formulação de Ahmad)
 - 7 ⇒ estrutura reticulada tridimensional (pórtico)
 - 8 ⇒ estrutura articulada tridimensional (treliça)

$nnode$ = número de nós por elemento finito. Os elementos disponíveis dependem do tipo de estrutura a analisar e a sua correspondência é apresentada no Quadro 2.1.

Quadro 2.1 - Elementos disponíveis para cada tipo de estrutura.

n_{type}	Elementos disponíveis na discretização da estrutura	
1,2,3,5,6	elemento de Lagrange de 4 nós	
	elemento de Serendipity de 8 nós	
	elemento de Lagrange de 9 nós	
4	elemento de volume de 8 nós	
	elemento de volume de 20 nós	
7	elemento de barra de 2 nós (com continuidade)	
8	elemento de barra de 2 nós (articulada)	

$ngaus$ = número de pontos de Gauss em cada direcção do sistema de eixos local do elemento utilizado no cálculo da matriz de rigidez. Em meios contínuos (n_{type} de 1 a 6), $ngaus$ pode tomar os valores 1, 2 ou 3. No Anexo A apresentam-se algumas considerações sobre o número de pontos de Gauss aconselhado para cada tipo de elemento. Em estruturas reticuladas e articuladas (n_{type} 7 ou 8) não é efectuada a integração de Gauss, sendo utilizadas as expressões dos termos da matriz de rigidez do elemento. Por este motivo o valor de $ngaus$ não é utilizado, devendo este parâmetro figurar no ficheiro de dados com o valor 2.

$ngstr$ = número de pontos de Gauss em cada direcção do sistema de eixos local do elemento, utilizado no cálculo das tensões ou esforços. Verifica-se que se obtém melhores resultados quando este parâmetro toma o valor 2, qualquer que seja o tipo de elemento seleccionado entre os disponíveis na presente versão do programa e qualquer que seja o número de pontos de Gauss utilizado na integração numérica

da matriz de rigidez. Em estruturas reticuladas e articuladas (ntype 7 ou 8), uma vez que os esforços são calculados nas extremidades da barra, tem de ser atribuído ao parâmetro ngstr o valor 2.

ndime = número de coordenadas cartesianas que definem a posição de cada nó (ver o Quadro 2.2).

Quadro 2.2 - Correspondência entre o tipo de estrutura (ntype) o parâmetro ndime.

<u>ntype</u>	Estrutura	<u>ndime</u>
1,2,3,5	Bidimensional	2
4,6,7,8	Tridimensional	3

ndofn = número de graus de liberdade por nó. No Quadro 2.3 é indicada a correspondência entre o tipo de estrutura (ntype) e o número de graus de liberdade (deslocamentos generalizados) por nó (ndofn).

Quadro 2.3 - Correspondência entre o tipo de estrutura (ntype) e o número de graus de liberdade de cada nó (ndofn).

<u>ntype</u>	<u>ndofn</u>
1,2,3	2
4,5,8	3
6(*),7	6

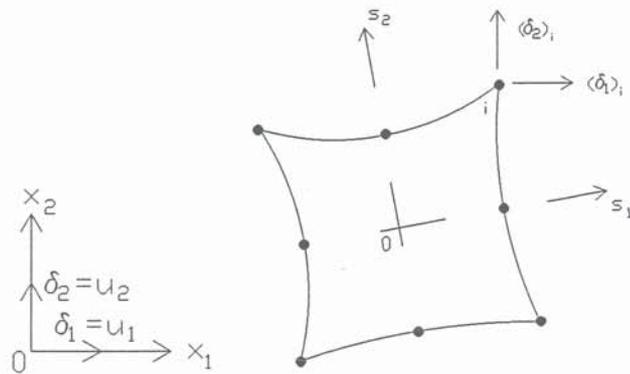
(*) - Nos nós coplanares (ver adiante) o programa só considera os 5 primeiros graus de liberdade.

Nas Figs. 2.2 a 2.9 representam-se os graus de liberdade (deslocamentos generalizados), para cada tipo de estrutura, sendo considerada a seguinte nomenclatura:

u - deslocamento

θ - rotação

δ - deslocamento generalizado (u ou θ)

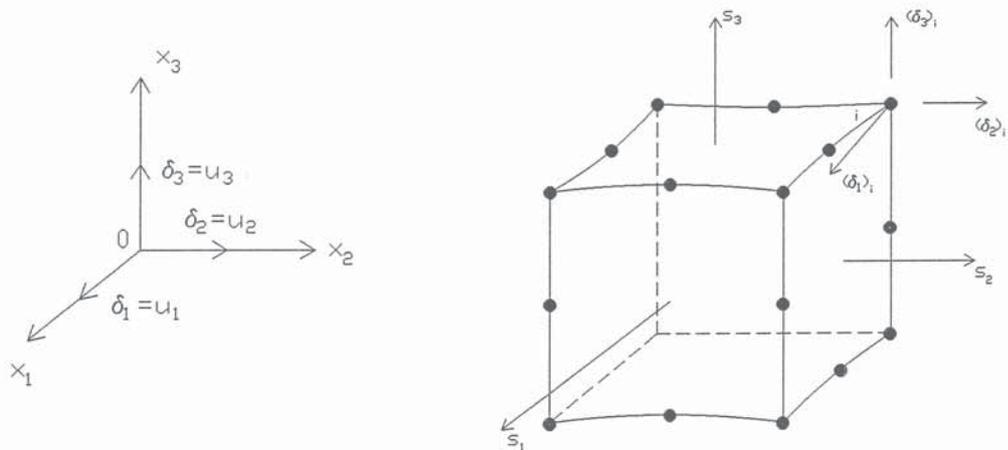


$0x_1x_2$ = referencial geral

$0s_1s_2$ = referencial local do elemento

$(\delta_1)_i, (\delta_2)_i$ = graus de liberdade num nó genérico i (referencial geral)

Fig. 2.2 - Referenciais e graus de liberdade para ntype = 1,2 ou 3.

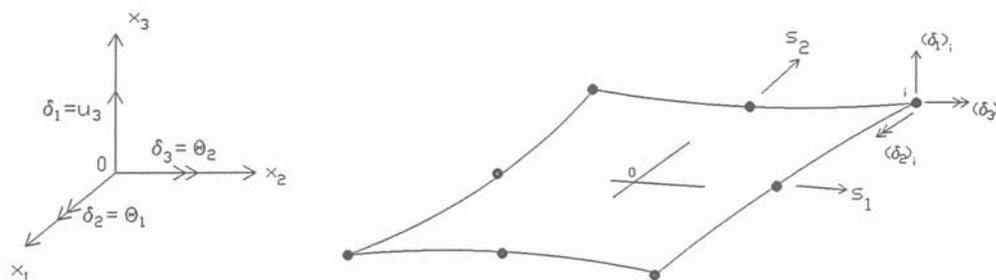


$0x_1x_2x_3$ = referencial geral

$0s_1s_2s_3$ = referencial local do elemento

$(\delta_1)_i, (\delta_2)_i, (\delta_3)_i$ = graus de liberdade num nó genérico i (referencial geral)

Fig. 2.3 - Referenciais e graus de liberdade para ntype = 4.



$0x_1, x_2, x_3$ = referencial geral (a laje está contida no plano $0x_1, x_2$)

$0s_1, s_2$ = referencial local do elemento

$(\delta_1)_i, (\delta_2)_i, (\delta_3)_i$ = graus de liberdade num nó genérico i (referencial geral)

Fig. 2.4 - Referenciais e graus de liberdade para $n_{type} = 5$.

Nas estruturas discretizadas com o elemento de casca espessa, podem coexistir 2 tipos de nós: coplanares e não coplanares. A distinção é efectuada comparando as direcções das normais à superfície média dos elementos que concorrem em cada nó (ver Fig. 2.5). Se essas normais forem coincidentes então o nó será coplanar caso contrário será não coplanar.

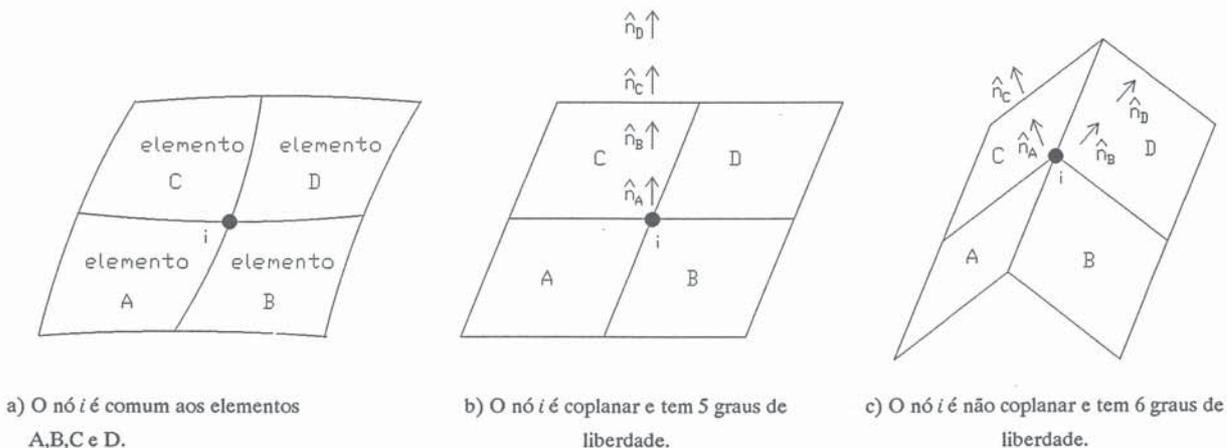
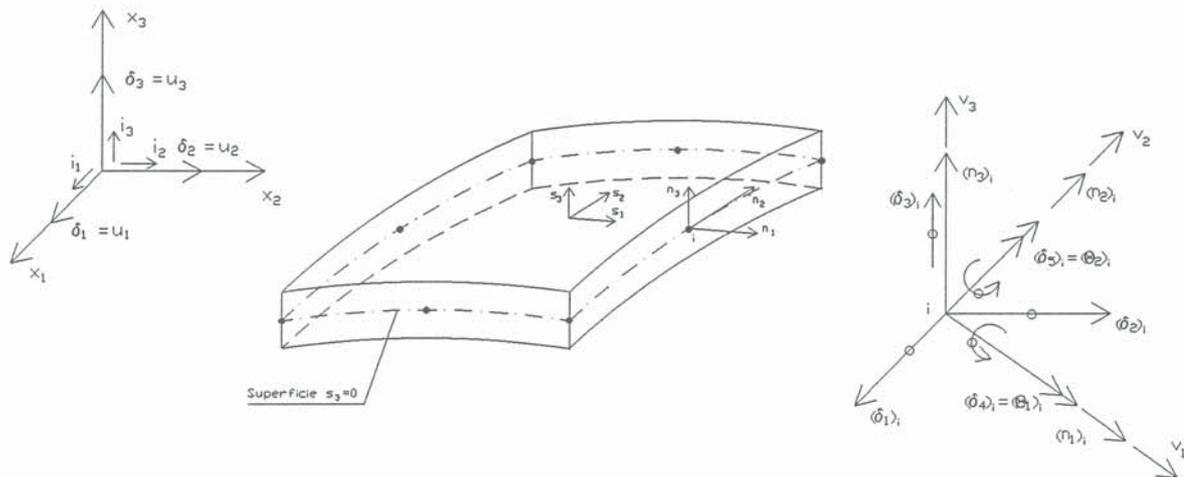


Fig. 2.5 - Distinção entre nós coplanares e não coplanares para $n_{type} = 6$.

Nos nós coplanares existem 5 graus de liberdade por nó (Fig. 2.6), 3 deslocamentos no referencial geral $((\delta_1)_i, (\delta_2)_i, (\delta_3)_i)$ e 2 rotações referidas ao sistema local do nó $((\delta_4)_i, (\delta_5)_i)$.

Na Fig. 2.6, os vectores n_1 e n_2 definem um plano que contém o nó i e é tangente à superfície média ($s_3 = 0$). No Anexo B apresenta-se o critério adoptado na definição dos referenciais locais associados aos nós dos elementos.



(n_1, n_2, n_3) definem o referencial local do nó genérico i (ver Anexo B).

Fig. 2.6 - Referenciais e graus de liberdade em nós coplanares.

Nos nós não coplanares os graus de liberdade $(\delta_1)_i$, $(\delta_2)_i$, $(\delta_3)_i$, $(\delta_4)_i$, $(\delta_5)_i$ e $(\delta_6)_i$ vêm referidos ao sistema global de eixos (Fig. 2.7).

Nas estruturas discretizadas com o elemento de casca de Ahmad podem coexistir nós com 5 ou 6 graus de liberdade, devendo ser sempre atribuído à variável ndofn o valor 6.

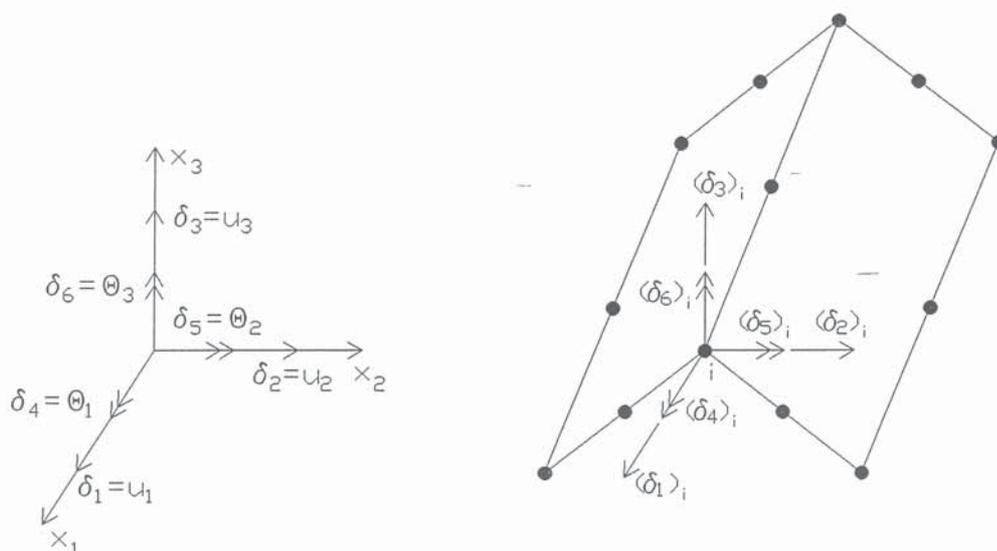
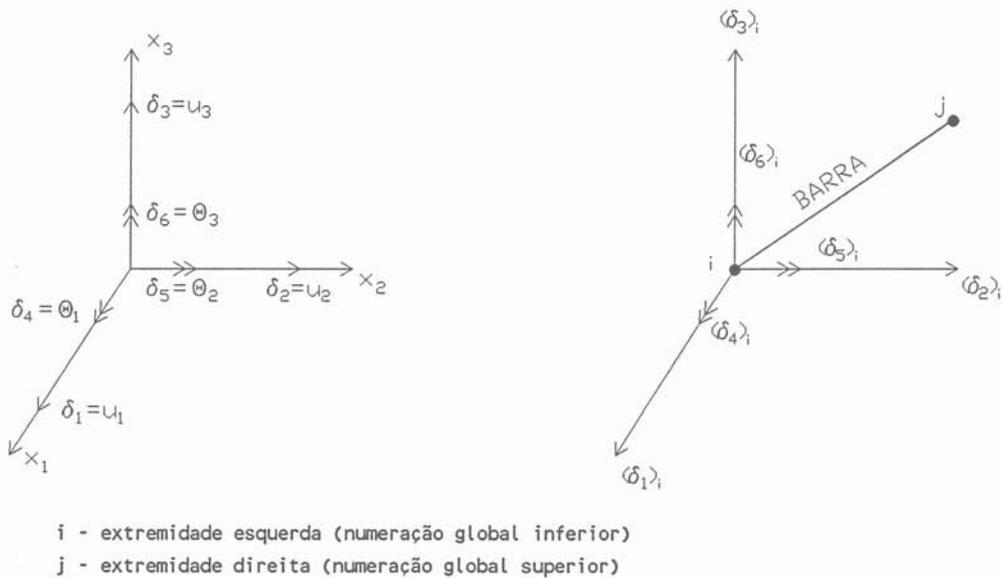
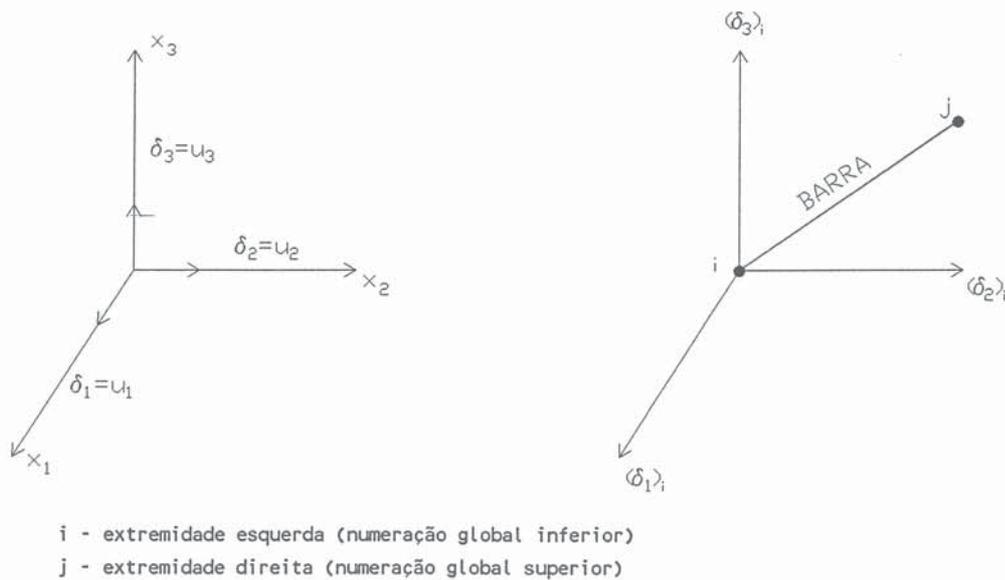


Fig. 2.7 - Referenciais e graus de liberdade em nós não coplanares.

Fig. 2.8 - Referenciais e graus de liberdade para $ntype = 7$ (ver também o Anexo C).

Nos pórticos ($ntype = 7$), os graus de liberdade $(\delta_1)_i$, $(\delta_2)_i$, $(\delta_3)_i$, $(\delta_4)_i$, $(\delta_5)_i$ e $(\delta_6)_i$ vêm referidos ao sistema de eixos global (ver Fig. 2.8). Nas treliças ($ntype = 8$), apenas existem 3 deslocamentos por nó que também se encontram no referencial geral (ver Fig. 2.9).

Fig. 2.9 - Referenciais e graus de liberdade para $ntype = 8$ (ver também o Anexo C).

- nprop** = número de propriedades físicas que caracterizam o material de cada elemento. Para todos os tipos de estrutura (**ntype** de 1 a 8), deve ser atribuído a este parâmetro o valor 4.
- npren** = número de propriedades geométricas associadas aos nós dos elementos. No Quadro 2.4 é apresentada a correspondência entre o tipo de estrutura (**ntype**) e a variável **npren**.

Quadro 2.4 - Correspondência entre o tipo de estrutura (**ntype**) e a variável **npren**.

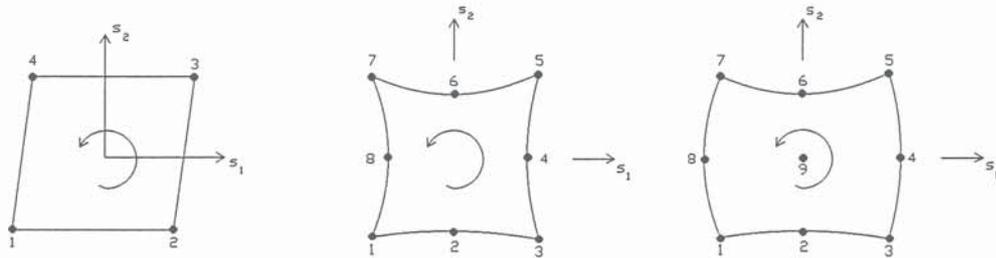
ntype	npren
1,5,6,8	1
2,3,4	0
7	5

2.2.3 - Definição da topologia da malha

Neste bloco de dados é necessário fornecer as seguintes características:

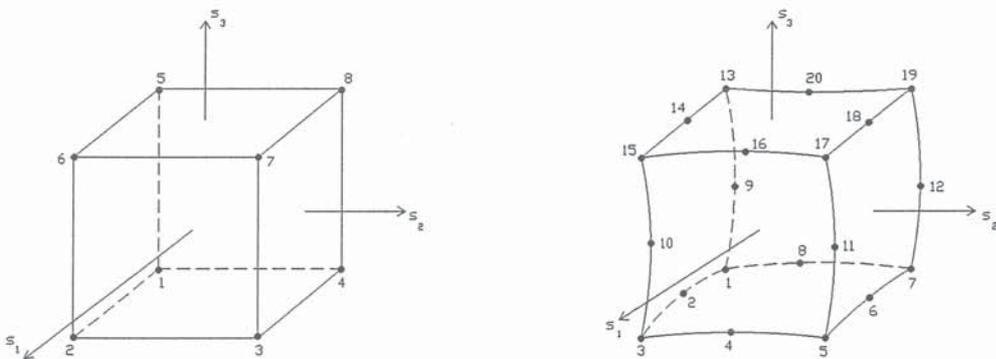
- Na 1ª coluna (**ielem**) o número do elemento por ordem crescente.
- Na 2ª coluna (**matno**) o número do material do elemento em correspondência com o bloco de dados que contém as propriedades físicas.
- Nos tipos de estrutura correspondentes a **ntype** = 1,5,6,7,8 deve ser colocado na 3ª coluna (**ielnp**) o número da secção nodal em correspondência com o bloco de dados que contém as propriedades geométricas nodais.
Para os restantes tipos de estrutura esta coluna não existe.
- Nas restantes colunas (**lnods**) devem ser colocados os nós dos elementos, de acordo com as indicações da Fig. 2.10.

Os elementos finitos correspondentes a estruturas do tipo casca (**ntype** = 6) devem ter um sentido de numeração dos nós de acordo com o que está indicado na Fig. 2.11. No caso das barras prismáticas deve figurar em primeiro lugar o nó com numeração global mais baixa, que também se designa por extremidade esquerda.



Observações:

- i) O 1º nó da lista tem que ser um nó de canto do elemento. Os restantes devem seguir a ordem da figura.
- ii) O sentido da numeração dos nós dos elementos tem de ser o anti horário.
- iii) Para `ntype = 6` ver também a Fig. 2.11.



Observações:

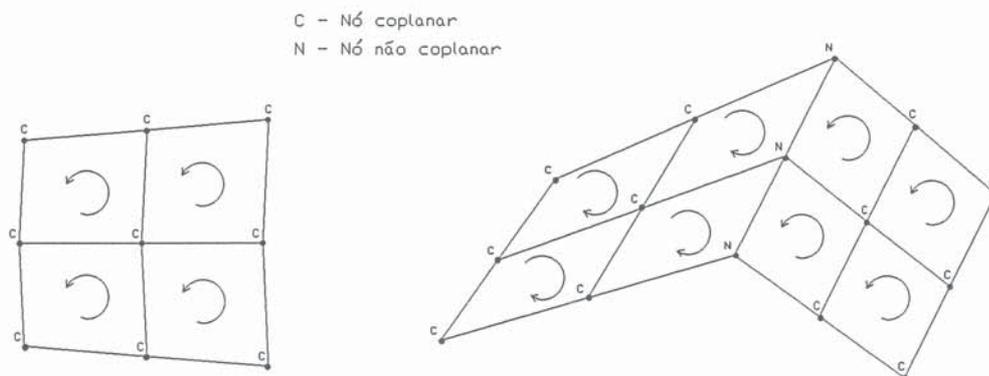
- i) O 1º nó da lista tem que ser um nó de canto do elemento. Os restantes nós devem seguir a ordem da figura.



Observações:

- i) O 1º nó da lista tem que ser o de numeração global mais baixa.

Fig. 2.10 - Numeração dos nós dos elementos finitos para os diversos tipos de estrutura.



Todos os elementos devem ter o mesmo sentido de numeração dos nós.

Os elementos com pelo menos um nó comum coplanar têm de ser numerados com o mesmo sentido. Nos restantes casos não existe esta restrição.

Fig. 2.11 - Sentidos de numeração dos nós de elementos de casca espessa (Ahmad) (ntype = 6).

2.2.4 - Coordenadas cartesianas dos nós

Este bloco contém as coordenadas cartesianas dos nós da estrutura no referencial global (dimensão [L]).

Devem ser fornecidas as coordenadas de todos os nós e por ordem numérica crescente.

No Quadro 2.5 representam-se os referenciais utilizados em cada tipo de estrutura.

Quadro 2.5 - Referenciais em que são fornecidas as coordenadas cartesianas dos nós.

Tipo de estrutura	Referencial	Número de coordenadas que devem figurar no ficheiro
1,2,3,5		2
4,6,7,8		3

Nota: os referenciais têm que ser directos.

2.2.5 - Ligações da estrutura ao exterior

Neste bloco de dados são definidas as características das ligações ao exterior.

Na primeira coluna encontra-se um contador dos nós que estão ligados ao exterior. Na segunda coluna deve ser colocado o correspondente número do nó. As restantes colunas contêm os códigos de ligação ao exterior do nó declarado na coluna anterior. Esta informação é constituída por um número de valores (unitários ou nulos e separados por espaços) em correspondência com o número de graus de liberdade que o nó possui (ver Quadro 2.3). O valor unitário significa que o grau de liberdade tem um deslocamento fixo e o valor nulo significa que o grau de liberdade é livre.

Exceptuando o elemento de casca ($n_{type} = 6$) os graus de liberdade dos nós ligados ao exterior encontram-se no referencial geral. No caso do elemento de casca, os graus de liberdade correspondentes a deslocamentos encontram-se também no referencial geral. No entanto, os graus de liberdade correspondentes a rotações de nós coplanares e não coplanares vêm referidos a sistemas de eixos diferentes. Assim, num nó não coplanar, as 3 rotações são referidas ao sistema de eixos geral. Num nó coplanar as 2 rotações encontram-se no referencial local associado ao nó (ver Anexo B), podendo na posição correspondente ao 6º grau de liberdade (3ª rotação) ser colocado qualquer valor, pois este é ignorado (ver Quadro 2.6).

Quadro 2.6 - Referenciais em que são definidas as características dos nós ligados ao exterior.

n _{type}	Graus de liberdade	Referencial
1,2,3,4,5,7,8	Todos	Geral
6	Deslocamentos em qualquer nó	Geral
	Rotações em nós não coplanares	Geral
	Rotações em nós coplanares	Local (*)

(*) O último grau de liberdade é ignorado.

2.2.6 - Propriedades físicas dos materiais

O bloco de dados correspondente às propriedades físicas dos materiais é constituído por um número de linhas em número igual ao valor atribuído à variável n_{mat} (número de materiais com propriedades físicas diferentes).

Em cada linha deve ser colocada a seguinte informação:

1ª coluna - i_{mat} - número do conjunto de propriedades (ordem crescente)

2ª coluna - <u>young</u>	- módulo de elasticidade [FL ⁻²]
3ª coluna - <u>poiss</u>	- coeficiente de Poisson [adimensional]
4ª coluna - <u>dense</u>	- massa específica [ML ⁻³] = [FL ⁻⁴ T ²]
5ª coluna - <u>alpha</u>	- coeficiente de dilatação térmica [(°C) ⁻¹]

2.2.7 - Propriedades geométricas associadas aos nós dos elementos

Este bloco é constituído por um número de módulos em correspondência com a variável nspen (número de secções nodais com propriedades geométricas distintas) (ver Secção 2.2.2). A identificação do elemento com o correspondente conjunto de propriedades nodais é efectuada através da variável ielnp (terceira coluna do bloco correspondente aos dados que definem a topologia da malha) (ver Secção 2.2.3).

Em cada módulo, deve ser fornecido na primeira linha e por ordem crescente, o contador dos diferentes conjuntos de propriedades nodais (ispen).

Segue-se um número de linhas igual ao número de nós do elemento a caracterizar. Em cada uma destas linhas deverá figurar, além da numeração local do nó, um número de valores em correspondência com o que é indicado no Quadro 2.7. Para ntype igual a 2, 3 ou 4, todo este bloco de dados tem que ser omitido.

Quadro 2.7 - Propriedades geométricas nodais em função do tipo de estrutura (ntype).

Propriedades geométricas associadas aos nós dos elementos					
Tipo de estrutura (<u>ntype</u>)	2ª coluna	3ª coluna	4ª coluna	5ª coluna	6ª coluna
1,5,6	espessura [L]	—	—	—	—
7	barea [L ²]	binet [L ⁴]	bin2l [L ⁴]	bin3l [L ⁴]	bangl [graus]
8	barea [L ²]	—	—	—	—

Este modo de fornecer as características geométricas dos elementos permite a existência de discontinuidades de propriedades entre elementos adjacentes.

Na segunda coluna, para ntype = 1, 5, 6, encontra-se a espessura do elemento nos nós.

Para *n_{type}* igual a 7 ou 8 deverão ser fornecidas as características das secções transversais da barra nos nós. Na presente versão do programa, as propriedades dos dois nós terão de ser exactamente iguais (barra de secção constante). Estas propriedades encontram-se no referencial local da barra (1, 2, 3), cuja definição se encontra no Anexo C. O significado das abreviaturas do Quadro 2.7 é a seguinte:

- barea ⇒ área da secção transversal da barra.
- binet ⇒ momento de inércia à torção da barra (só coincide com a inércia polar em certos casos particulares)
- bin2l ⇒ momento de inércia à flexão em relação ao eixo 2_l.
- bin3l ⇒ momento de inércia à flexão em relação ao eixo 3_l.
- bangl ⇒ ângulo que define a posição dos eixos 2_l e 3_l na secção transversal da barra (ver Anexo C).

2.2.8 - Acções

No ficheiro de dados relativo ao programa FEMIX podem existir vários conjuntos independentes de acções constituindo cada um deles um caso de carga.

No Quadro 2.8 encontra-se a lista das possíveis acções e, para cada uma delas, os tipos de estrutura em que essa acção pode ser aplicada.

Quadro 2.8 - Disponibilidade das diferentes acções para os diversos tipos de estruturas.

Acção		n _{type}
Forças generalizadas aplicadas em pontos	nodais	1 a 8
	do interior do elemento	7, 8
Gravítica		1 a 8
Forças generalizadas distribuídas por unidade de comprimento em	bordos de elementos	1 a 6
	barras	7, 8
Forças generalizadas distribuídas por unidade de área nas faces dos elementos		1 a 6
Térmica		1, 2, 3, 4, 6
Deslocamentos prescritos		1 a 8

2.2.8.1 - Título do caso de carga

A frase correspondente ao título do caso de carga não pode exceder os 80 caracteres.

2.2.8.2 - Parâmetros que caracterizam as acções em cada caso de carga

Este bloco de dados é constituído por 8 linhas (ver o ficheiro de dados exemplo), contendo cada uma delas um parâmetro que traduz o número de vezes que cada tipo de acção ocorre. Qualquer dos parâmetros pode ser nulo indicando nesse caso a inexistência desse tipo de acção.

- nplod - (ntype de 1 a 8) - número de carregamentos correspondentes a forças generalizadas aplicadas em pontos nodais.
- ngrav - (ntype de 1 a 8) - o valor unitário significa que se pretende solicitar a estrutura com a acção gravítica. O valor nulo significa que esta acção não é considerada.
- nedge - (ntype de 1 a 6) - número de carregamentos correspondentes a forças generalizadas distribuídas por unidade de comprimento em bordos de elementos.
- nface - (ntype de 1 a 6) - número de carregamentos correspondentes a forças generalizadas distribuídas por unidade de área nas faces dos elementos.
- ntemp - (ntype 1, 2, 3, 4 ou 6) - número de nós da estrutura sujeitos a uma variação de temperatura não nula.
- nudis - (ntype 7 ou 8) - número de carregamentos correspondentes a forças generalizadas uniformemente distribuídas nas barras.
- nepoi - (ntype 7 ou 8) - número de carregamentos correspondentes a forças generalizadas aplicadas num ponto do interior da barra.
- nprva - (ntype de 1 a 8) - número de graus de liberdade com o respectivo deslocamento generalizado prescrito. Os graus de liberdade com deslocamento generalizado prescrito têm de ser ligados ao exterior.

2.2.8.3 - Forças generalizadas aplicadas em pontos

Esta acção tem um tratamento e um bloco de dados distinto conforme se trate de pontos nodais (ntype de 1 a 8) ou de pontos no interior de elementos de barra prismática (ntype 7 ou 8).

2.2.8.3.1 - Forças generalizadas aplicadas em pontos nodais

O bloco de dados correspondente a forças generalizadas aplicadas em pontos nodais é extensivo a todos os tipos de problemas (`ntype` de 1 a 8). O número de linhas que constitui este bloco de dados tem de ser igual ao número atribuído à variável `npload` (ver Secção 2.2.8.2).

Em cada linha tem de figurar na primeira coluna (`ipload`) por ordem numérica crescente o contador dos nós com forças aplicadas. Na segunda coluna deve ser colocado o número do nó solicitado. Nas restantes colunas, cujo número é igual ao número de graus de liberdade do nó (ver Quadro 2.3), devem ser fornecidos os valores das forças generalizadas aplicadas no respectivo nó.

As componentes das forças generalizadas devem ser referidas ao sistema global de eixos, exceptuando os momentos associados a nós coplanares de elementos de casca. Neste último caso os momentos (4º e 5º grau de liberdade) devem ser referidos ao sistema local de eixos do respectivo nó, sendo ignorado o momento correspondente ao 6º grau de liberdade.

Nas Fig. 2.12 a 2.17 apresentam-se os sentidos positivos das forças generalizadas aplicadas em pontos nodais, considerando a seguinte nomenclatura:

F - força [F]

M - momento [FL]

P - força generalizada (F ou M)

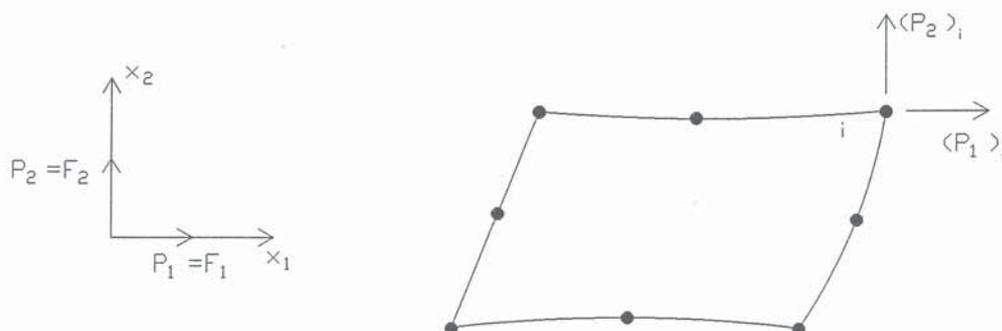


Fig. 2.12 - Forças generalizadas aplicadas em pontos nodais para `ntype` = 1,2 ou 3 (referencial geral).

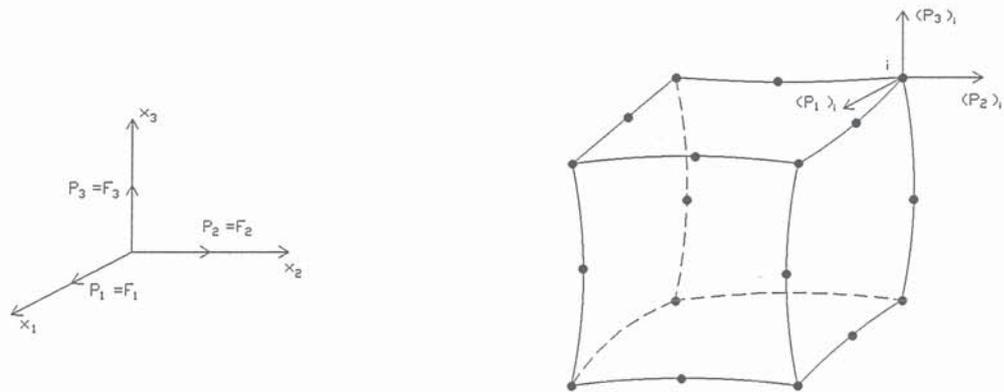


Fig. 2.13 - Forças generalizadas aplicadas em pontos nodais para ntype = 4 (referencial geral).

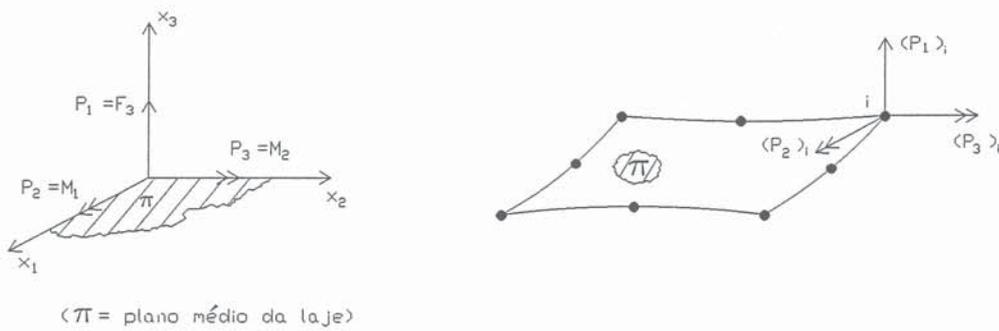
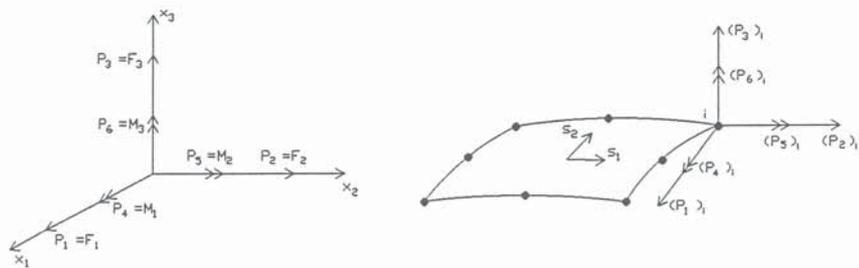
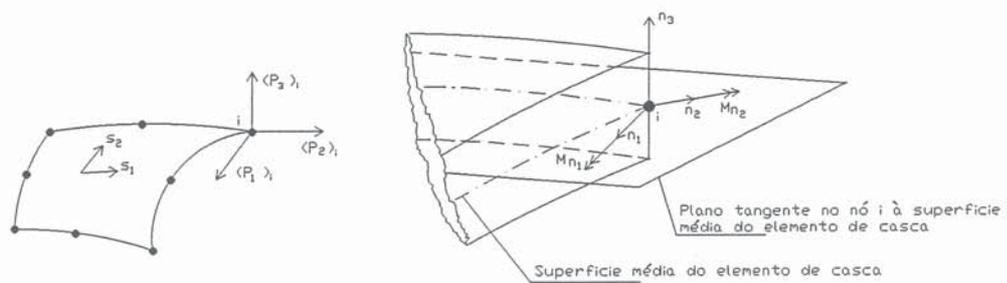


Fig. 2.14 - Forças generalizadas aplicadas em pontos nodais para ntype = 5 (referencial geral).



Nó não coplanar (referencial geral)



Nó coplanar

(n_1, n_2, n_3 definem o referencial local do nó genérico i) (ver Anexo B).

Fig. 2.15 - Forças generalizadas aplicadas em pontos nodais para ntype = 6.

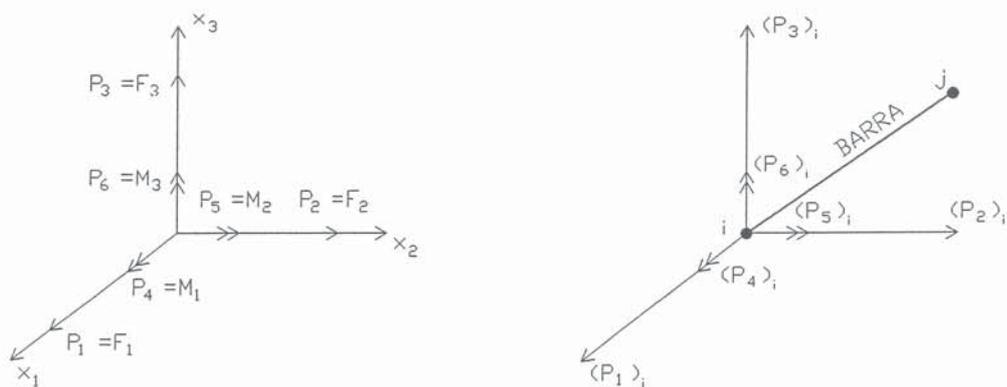


Fig. 2.16 - Forças generalizadas aplicadas em pontos nodais para ntype = 7 (referencial geral).

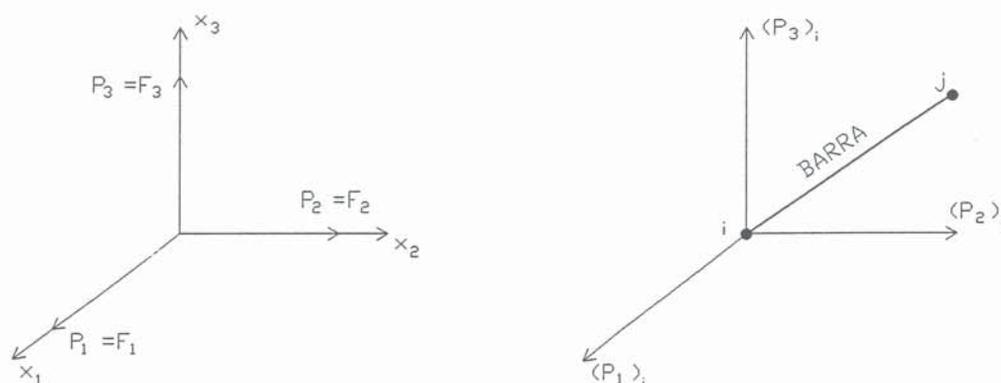


Fig. 2.17 - Forças generalizadas aplicadas em pontos nodais para $n_{type} = 8$ (referencial geral).

2.2.8.3.2 - Forças generalizadas aplicadas em pontos do interior do elemento

Este tipo de carregamento apenas é admitido em elementos de barra prismática (n_{type} 7 ou 8). No ficheiro de dados tem de figurar o contador deste tipo de carregamento de acordo com o parâmetro `nepoi` (ver Secção 2.2.8.2), o número do elemento, a distância d à extremidade esquerda medida ao longo do eixo da barra (ver Fig. 2.18) e os valores das forças generalizadas no referencial geral (ver Secção 2.2.8.3.1). A extremidade esquerda é a de numeração global mais baixa.

De acordo com o Sistema Internacional, as forças tem a dimensão [F] e os momentos a dimensão [FL]. Este tipo de carregamento pode ser repetido várias vezes para a mesma barra.

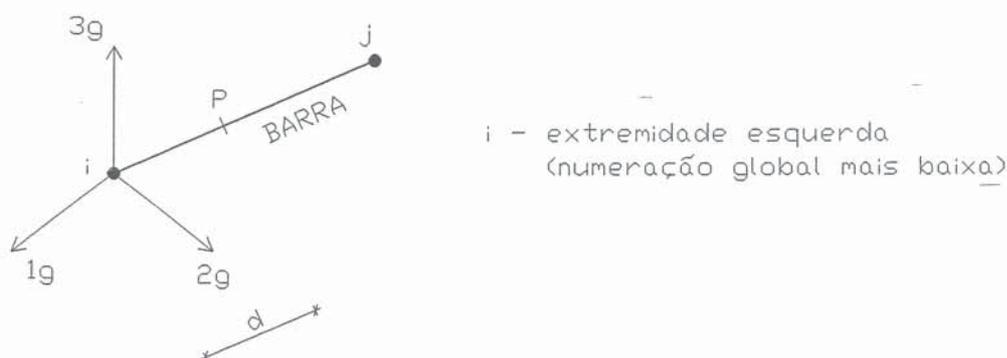


Fig. 2.18 - Localização do ponto de aplicação das forças generalizadas (P).

2.2.8.4 - Acção gravítica

Este bloco de dados é constituído por uma única linha, em que devem figurar as acelerações da gravidade em correspondência com os graus de liberdade dos nós da estrutura. Estes valores devem ser referidos ao sistema global de eixos.

No Quadro 2.9 apresentam-se os valores que devem ser fornecidos para cada tipo de estrutura (supõe-se que as estruturas planas estão contidos no plano $x_1 x_2$).

Quadro 2.9 - Componentes da aceleração da gravidade para cada tipo de estrutura.

ntype	Componentes da aceleração da gravidade [LT ⁻²] (referencial geral)					
	Grau de liberdade/coluna no ficheiro					
	1	2	3	4	5	6
1,2,3	segundo x_1	segundo x_2	—	—	—	—
4,8	segundo x_1	segundo x_2	segundo x_3	—	—	—
5	segundo x_3	0 (*)	0 (*)	—	—	—
6,7	segundo x_1	segundo x_2	segundo x_3	0 (*)	0 (*)	0 (*)

(*) Tem de ser fornecido um valor nulo.

A força por unidade de volume correspondente à acção gravítica é calculada pelo programa recorrendo ao produto da massa por unidade de volume (dense - [ML⁻³]) (ver Secção 2.2.6) pela aceleração da gravidade ($gravi$ - [LT⁻²]).

Apresenta-se em seguida uma tabela (Quadro 2.10) destinada a esclarecer a escolha das unidades utilizadas nas grandezas associadas à acção gravítica.

Quadro 2.10 - Exemplos de conjuntos coerentes de unidades.

Grandeza	Unidades (*)					
	N	KN	MN	N	KN	MN
Força	N	KN	MN	N	KN	MN
Comprimento	m	m	m	mm	mm	mm
Momento	Nm	KNm	MNm	Nmm	KNmm	MNmm
Tensão	Pa	KPa	MPa	N/mm ²	KN/mm ²	MN/mm ²
Massa específica	Kg/m ³	t/m ³	Kt/m ³	Kg/mm ³	t/mm ³	Kt/mm ³
Aceleração gravítica	m/s ²	m/s ²	m/s ²	m/s ²	m/s ²	m/s ²

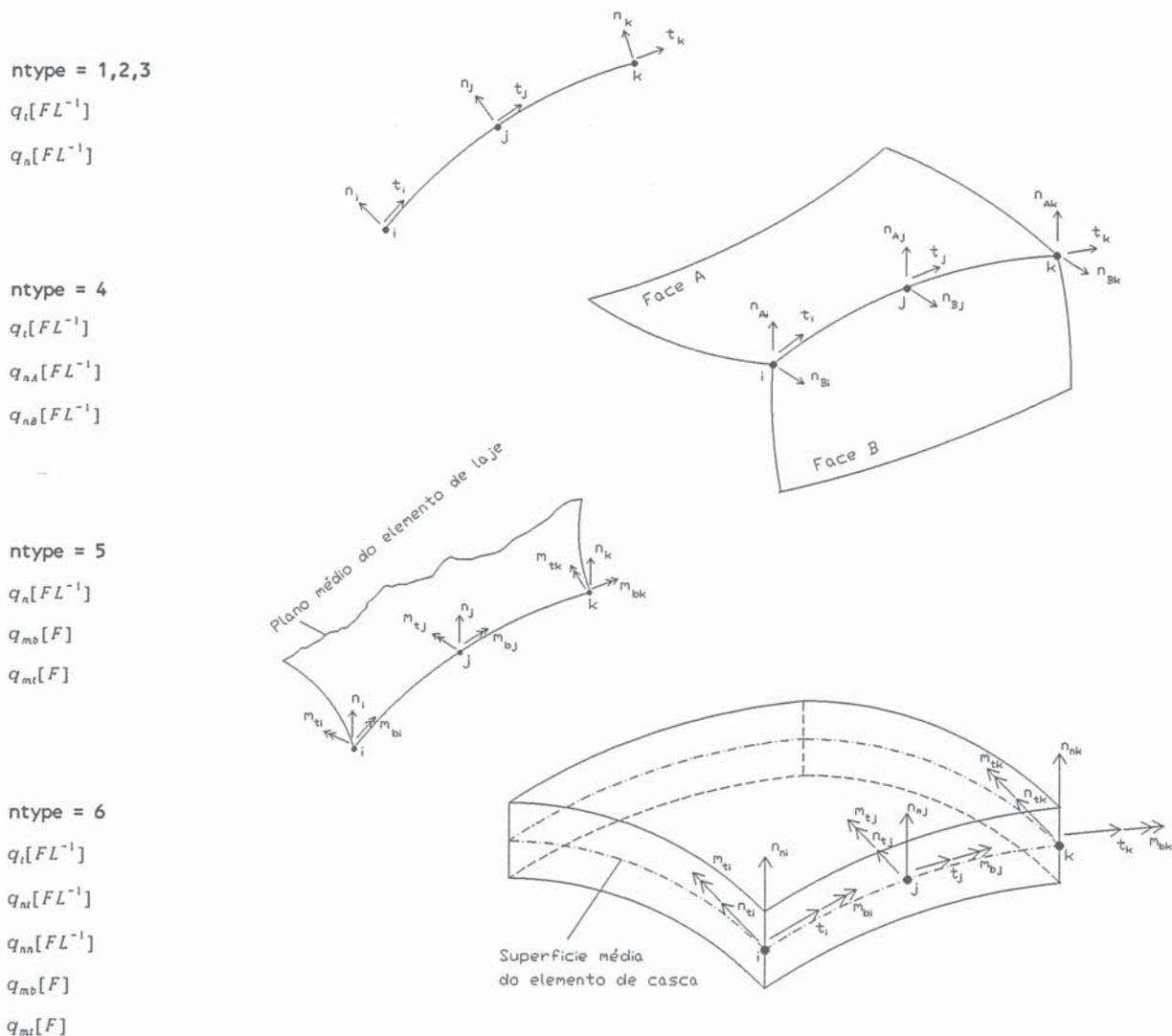
(*) A cada coluna corresponde um conjunto coerente de unidades.

2.2.8.5 - Forças generalizadas distribuídas por unidade de comprimento

Esta acção tem um tratamento e um bloco de dados distinto conforme se trate de bordos de elementos finitos (ntype de 1 a 6) ou de barras prismáticas (ntype 7 ou 8).

2.2.8.5.1 - Forças generalizadas distribuídas por unidade de comprimento em bordos de elementos

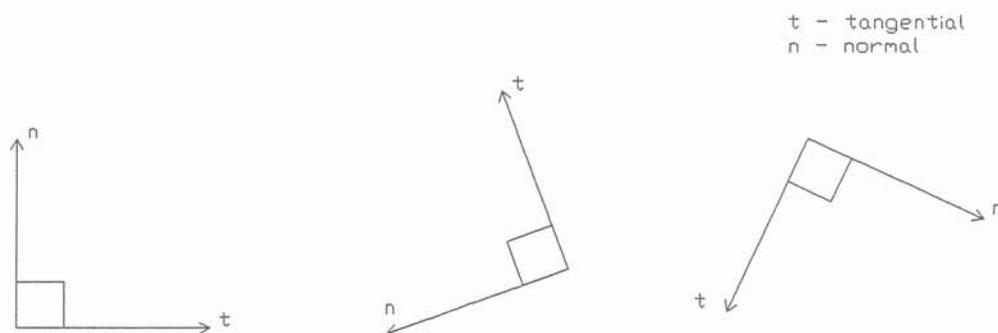
Esta acção é caracterizada por um conjunto de forças generalizadas em correspondência com os graus de liberdade existentes em cada tipo de problema. As componentes das forças generalizadas distribuídas são especificadas no referencial local dos nós do bordo do elemento (ver Fig. 2.19). A orientação destes referenciais depende da sequência de nós $i, j, (k)$, sendo i o primeiro nó que figura no ficheiro de dados na lista de nós que identifica o bordo que possui este tipo de carregamento. Nos elementos com dois nós por bordo apenas existem os nós i e j . O primeiro e último nó da numeração dos bordos têm de ser nós de extremidade do bordo do elemento. A sequência de nós, $i, j, (k)$ define o sentido positivo do eixo tangencial ao bordo do elemento.



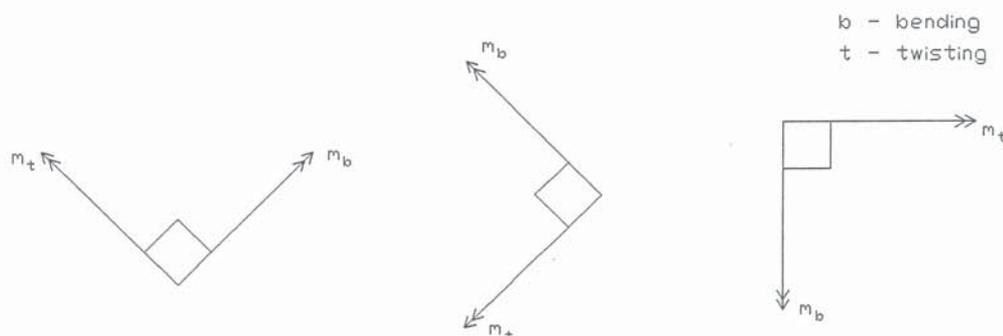
O momento distribuído correspondente ao 6º grau de liberdade é ignorado.

Fig. 2.19 - Referenciais associados às forças generalizadas distribuídas nos bordos dos elementos.

No caso dos elementos planos com n_{type} de 1 a 3, o outro eixo local é normal ao bordo formando com o eixo tangencial um referencial directo em que *t* é o primeiro eixo e *n* o segundo (ver Fig. 2.20).

Fig. 2.20 - Referencial local directo t, n em diferentes posições (ntype de 1 a 3).

No sistema de eixos associado a cada nó de um bordo de elemento de laje, o eixo n é normal ao plano médio da laje e positivo segundo x_3 . O eixo m_b é tangente ao lado no correspondente nó e com o sentido da numeração dos nós que definem o bordo. O eixo m_t é normal ao bordo, está contido no plano médio da laje e forma com o eixo m_b um referencial directo em que m_b é o primeiro eixo e m_t o segundo (ver Fig. 2.21).

Fig. 2.21 - Referencial local directo m_b, m_t em diferentes posições (ntype = 5).

No sistema de eixos associado a cada nó de um bordo de elemento de casca (ver Fig. 2.19), o eixo t ou m_b é tangente ao bordo no correspondente nó e com o sentido da numeração dos nós que definem o bordo. O eixo n_t ou m_t é normal ao bordo, está contido no plano tangente à superfície média da casca no nó e está dirigido para o interior do elemento. O eixo n_n é normal ao plano tangente à superfície média da casca no nó e forma um triedro directo com os anteriores eixos, em que m_b é o primeiro eixo do triedro, m_t o segundo e n_n o terceiro.

Para cada bordo de elemento solicitado é necessário fornecer os seguintes dados (ver o exemplo da Fig. 2.22):

a)	#	iedge	loele		
b)		1	7		
c)	#	lopoe	qt	qn	
d)		91	3.0	-7.0	
e)		53	3.0	-6.0	
f)		81	3.0	-5.0	

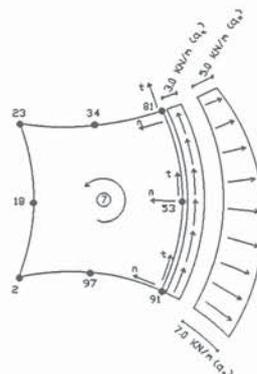


Fig. 2.22 - Exemplo de acção distribuída por unidade de comprimento num bordo de um elemento.

As linhas a) e c) são comentários opcionais pois começam por #.

Na linha b) figuram o contador de bordos solicitados e o número do elemento solicitado. O número total de bordos solicitados tem de ser igual ao valor atribuído à variável nedge (ver Secção 2.2.8.2). As linhas d) a f) correspondem ao número do nó (numeração global) e às cargas distribuídas tangencial e normal ao bordo.

Nos elementos de volume (ntype = 4), solicitados por acções distribuídas nos seus bordos, além da estrutura de dados anterior é necessário fornecer a lista de nós das faces adjacentes ao bordo solicitado. Assim, tomando a Fig. 2.23 como exemplo, tem de se fornecer a seguinte informação adicional:

```
# Lista dos nós da face A
91 53 81 34 23 18 2 7
# Lista dos nós da face B
91 53 81 78 87 86 85 61
```

A ordem pela qual é dada a lista dos nós de cada face adjacente define pela regra do saca rolhas o sentido positivo da componente normal a essa face.

Na definição de ambas as faces adjacentes, os primeiros nós da lista devem ser os que definem o bordo e têm de ser dados pela mesma ordem.

A componente q_t é tangente à aresta e as componentes q_{nA} e q_{nB} são normais às faces *A* e *B* respectivamente.

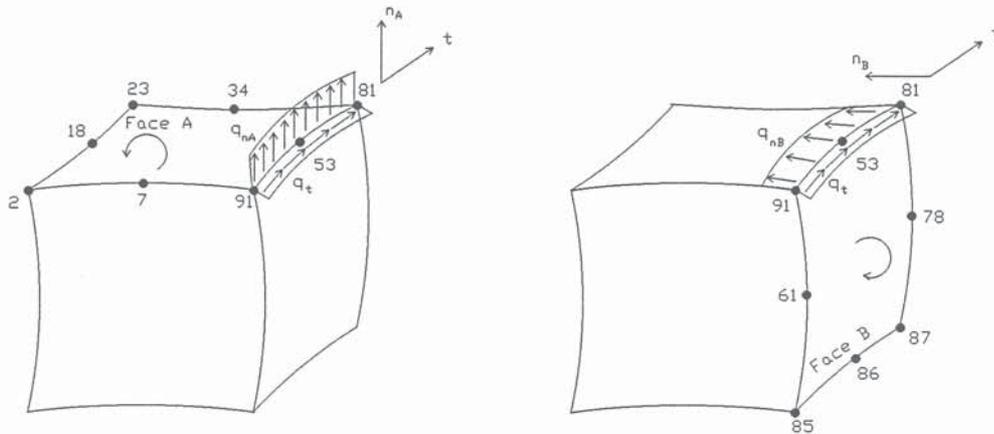


Fig. 2.23 - Definição do referencial em que têm de ser fornecidas as cargas distribuídas nos bordos dos elementos de sólido tridimensional.

2.2.8.5.2 - Forças generalizadas distribuídas por unidade de comprimento em barras

As cargas distribuídas nas barras de pórtico ou treliça tridimensionais têm de ser fornecidas no referencial local da barra (ver Anexo C). O valor da carga distribuída é constante, existe em todo o comprimento da barra e tem componentes de força ou momento por unidade de comprimento medido ao longo do eixo da barra. As primeiras tem dimensão $[FL^{-1}]$ e as segundas $[F]$. Na Fig. 2.24 encontra-se um exemplo deste tipo de carregamento.

No ficheiro de dados tem de figurar em cada linha o contador de barras com este tipo de carregamento de acordo com o parâmetro nudis (ver Secção 2.2.8.2), o número do elemento solicitado e o valor da carga distribuída segundo todos os graus de liberdade (6 no caso do pórtico e 3 no caso da treliça).

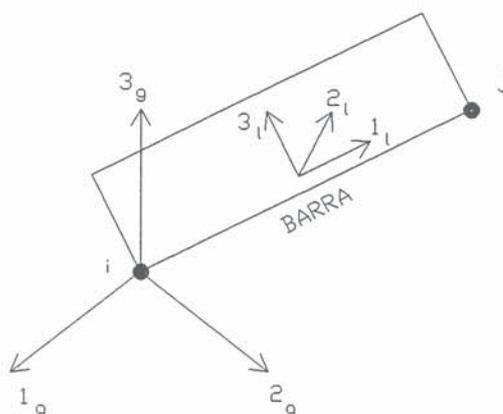


Fig. 2.24 - Carga distribuída numa barra de pórtico ou treliça tridimensional (referencial local).

2.2.8.6 - Forças generalizadas distribuídas por unidade de área nas faces dos elementos

Esta acção é caracterizada por um conjunto de forças generalizadas distribuídas nas faces dos elementos em correspondência com os graus de liberdade existentes em cada tipo de problema.

As componentes das forças generalizadas distribuídas devem ser referidas ao sistema de eixos local do respectivo nó.

Na Fig. 2.25 são indicados os referenciais associados às forças generalizadas distribuídas nas faces dos elementos para os diferentes tipos de problemas (ntype de 1 a 6).

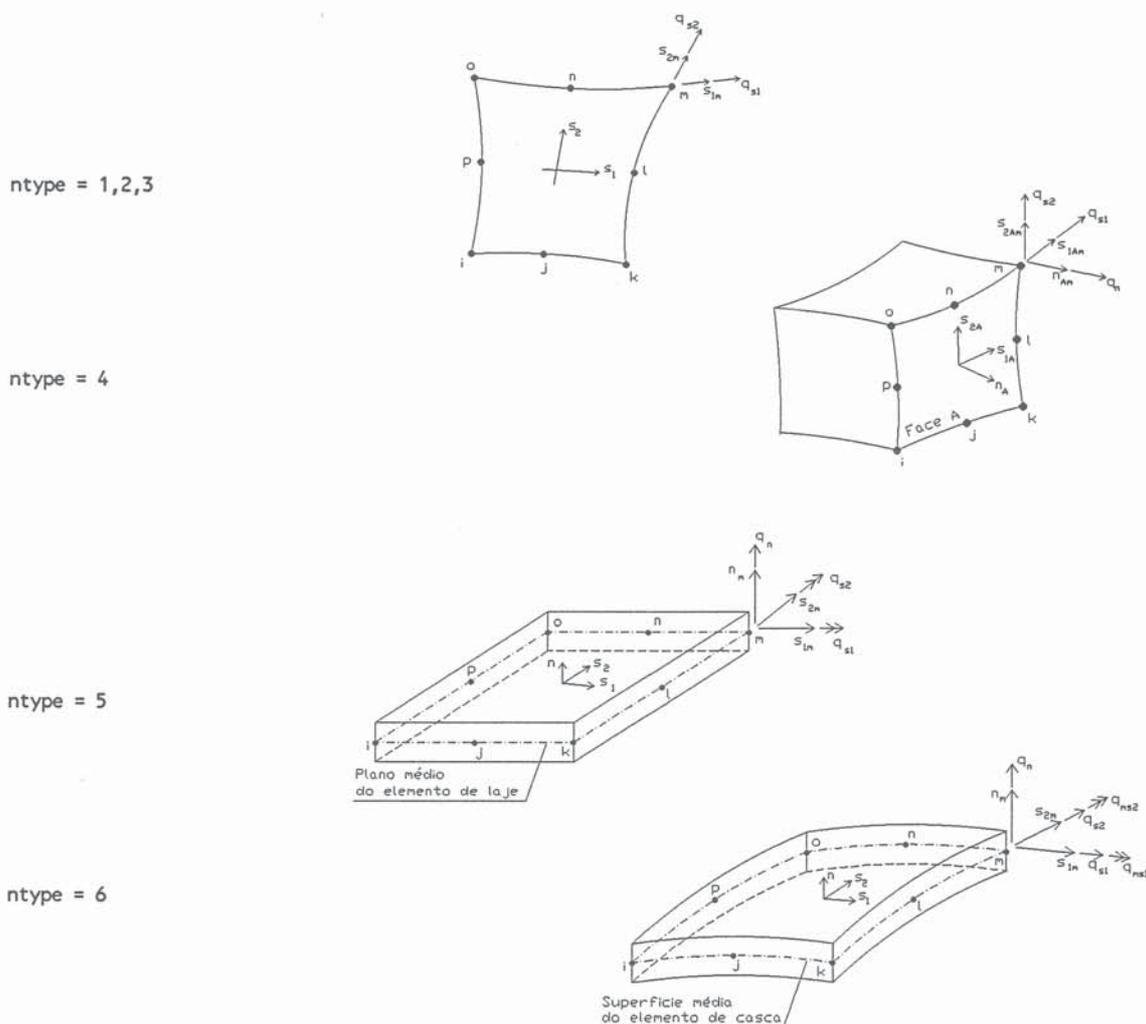


Fig. 2.25 - Referências associados às forças generalizadas distribuídas por unidade de área nas faces dos elementos.

Para cada face submetida a forças generalizadas distribuídas por unidade de área é necessário indicar os nós da numeração global que identificam essa face. A ordem de numeração define o sistema local de eixos associado a essa face. Assim, os 2 primeiros nós (faces de 4 nós) ou os 3 primeiros nós (faces de 8 ou 9 nós) definem o sentido do eixo local s_1 . O 2º e 3º nós (faces de 4 nós) ou o 3º, 4º e 5º nós (faces de 8 ou 9 nós) definem o sentido do eixo local s_2 . O eixo local n é normal à face e forma um triedro directo com os eixos s_1 e s_2 .

A estrutura de dados a ser fornecida para cada face solicitada com este tipo de acção é a seguinte (ver o exemplo da Fig. 2.26):

a)	#	iface	loelf	
b)		1	7	
c)	#	lopof	qs1	qs2
d)		9	2.0	5.0
e)		7	3.0	5.0
f)		41	4.0	5.0
g)		53	4.0	6.0
h)		81	4.0	7.0
i)		34	3.0	7.0
j)		23	2.0	7.0
k)		18	2.0	6.0

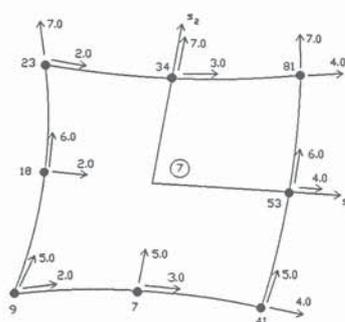


Fig. 2.26 - Exemplo de acção distribuída por unidade de área numa face de um elemento ($n_{type} = 1$).

As linhas a) e c) são comentários opcionais.

Na linha b) deve figurar o contador de faces solicitadas e o número de elementos cuja face é solicitada. O número total de faces solicitadas deve ser igual ao valor atribuído à variável n_{face} (ver Secção 2.2.8.2).

Nas linhas d) a k) deve ser fornecido o número do nó e as forças generalizadas distribuídas. A ordem dos componentes das forças está em correspondência com os graus de liberdade do nó (ver Fig. 2.25).

No exemplo da Fig. 2.26 os nós 9, 7 e 41 definem o sentido do eixo s_1 , enquanto os nós 41, 53 e 81 definem o sentido do eixo s_2 . O eixo n é normal à face em cada nó e forma um triedro directo com os eixos s_1 e s_2 (s_1, s_2, n).

Nas estruturas discretizadas por elementos de volume este tipo de carregamento pode existir em qualquer uma das suas 6 faces.

Nas lajes e cascas, as forças generalizadas distribuídas por unidade de área são consideradas aplicadas na superfície média dos elementos.

No elemento de casca o momento distribuído correspondente ao 6º grau de liberdade é ignorado.

A dimensão da força distribuída por unidade de área é $[FL^{-2}]$ e a do momento distribuído por unidade de área é $[FL^{-1}]$.

2.2.8.7 - Acção térmica

O bloco de dados correspondentes à acção térmica só pode existir nos tipos de estruturas caracterizados por `ntype` = 1, 2, 3, 4 ou 6. O número de linhas que constitui este bloco de dados deverá ser igual ao número atribuído à variável `ntemp` (ver Secção 2.2.8.2). Em cada linha deve ser colocado na primeira coluna (`itemp`) por ordem numérica crescente o contador dos nós com uma variação de temperatura não nula. Na segunda coluna deve figurar o número do nó solicitado e na terceira o valor da variação térmica no respectivo nó.

Para `ntype` = 6 (elemento de casca) este valor é considerado uniforme na espessura do elemento, não sendo possível modelar variações de temperatura diferenciais entre as faces superior e inferior.

O produto do coeficiente de dilatação térmica pelas variações de temperatura tem de conduzir a uma deformação adimensional (habitualmente $^{\circ}C^{-1} \times ^{\circ}C$).

2.2.8.8 - Deslocamentos prescritos

O bloco de dados correspondente a deslocamentos prescritos é aplicável a todos os tipos de problemas (`ntype` de 1 a 8). O número de linhas que constitui este bloco de dados deverá ser igual ao número atribuído à variável `nprva` (ver Secção 2.2.8.2). Em cada linha devem ser fornecidos os seguintes dados:

- 1ª coluna - `iprva` - contador dos nós com deslocamentos prescritos.
- 2ª coluna - `nnodp` - número do nó solicitado.
- 3ª coluna - `ndofp` - grau de liberdade prescrito.
- 4ª coluna - `prval` - valor do deslocamento prescrito [L] ou [adimensional].

Os deslocamentos prescritos são dados no referencial global e podem existir segundo qualquer grau de liberdade do nó, desde que este esteja ligado ao exterior. Exceptuam-se as rotações prescritas em nós coplanares de cascas, uma vez que estes graus de liberdade se encontram no referencial tangente à superfície média (ver Fig. 2.6 na Secção 2.2.2).

CAPÍTULO 3

3 - CÁLCULO DE DESLOCAMENTOS E REACÇÕES COM O PROGRAMA FEMIX

3.1 - CONSIDERAÇÕES GERAIS

O programa femix lê como ficheiro de dados o resultado da execução do programa prefemix, que consiste num ficheiro não formatado (binário) com todos os dados do problema já validados (ver também o Anexo D). É no programa femix que são efectuadas a maioria das operações relacionadas com o método dos elementos finitos, tais como o cálculo da matriz de rigidez dos elementos recorrendo à integração de Gauss (ntype de 1 a 6) ou a $T^T K T$ (ntype 7 ou 8) (ver Anexo C), cálculo das forças nodais equivalentes às acções nos elementos, assemblagem da matriz de rigidez global e respectivos vectores solicitação para os diversos casos de carga, resolução do sistema de equações por um método directo ou iterativo e cálculo dos deslocamentos e das reacções.

O programa femix é o que exige maiores recursos do computador na resolução de grandes problemas, sendo conveniente uma pré avaliação da quantidade de memória necessária durante a resolução do sistema de equações, para que o tempo dispendido na preparação dos dados não seja perdido devido à insuficiência de recursos (ver Secção 3.2). Os graus de liberdade prescritos

não contribuem para a dimensão do sistema de equações, não sendo penalizante calcular por exemplo um pórtico plano com o elemento de 6 graus de liberdade por nó e ter 3 graus de liberdade impedidos em todos os nós.

Como resultado da execução do programa *femix* são gravados dois ficheiros não formatados com as extensões di.bin (deslocamentos) e re.bin (reações). Durante a execução do programa são gravados no directório corrente diversos ficheiros temporários com a extensão .tmp, que são apagados automaticamente quando o programa termina. Se a execução for interrompida, estes ficheiros devem ser apagados pelo utilizador. O facto de ter ficheiros temporários com nome fixo tem a vantagem de permitir que eles sejam apagados sempre que o programa é iniciado e o inconveniente de não permitir diversas execuções simultâneas no mesmo directório em ambientes multi tarefa. Se houver necessidade de enviar para background um conjunto de cálculos, deve ser criada uma shell script (macro ou batch file) com o conjunto das tarefas e em seguida executar essa shell script em background. É possível ter várias execuções em simultâneo, desde que o programa seja executado a partir de directórios distintos. Este procedimento é desaconselhado porque todos os processos vão requisitar memória ao computador, podendo esta tornar-se insuficiente.

3.2 - MÉTODOS DE RESOLUÇÃO DO SISTEMA DE EQUAÇÕES

No programa *femix* encontram-se disponíveis dois métodos de resolução do sistema de equações, um directo e o outro iterativo, cabendo ao utilizador decidir qual deles utilizar.

O método directo é o de eliminação de Gauss com armazenamento em semibanda de largura constante e com toda a matriz na memória central. Em sistemas com memória virtual a performance ainda é aceitável se a quantidade de memória necessária for 2 a 3 vezes superior à disponível. É ainda necessário que exista no disco espaço suficiente para a paginação da parte da matriz que não cabe na memória central.

Para a avaliação da quantidade de memória necessária pelo método directo, devem ser anotados os seguintes valores que o programa *femix* coloca no monitor logo que eles são calculados:

⇒ N. of lines of the system of linear eq. (compacted) = $ntotc$

⇒ N. of columns of the half band (compacted) = $nhbac$

O número de bytes ocupados pela matriz de rigidez global é:

$$\begin{aligned} & \text{ntotc} * \text{nhbac} * \text{sizeof}(\text{double}) \\ & \text{sizeof}(\text{double}) = 8 \text{ (em geral)} \end{aligned}$$

O método iterativo é o dos gradientes conjugados com pré condicionamento diagonal e com armazenamento dos termos não nulos da matriz de rigidez global. A totalidade dos termos não nulos deve caber na memória central disponível para que não exista uma significativa degradação da performance. Se a quantidade de memória central não for suficiente, a totalidade da matriz de rigidez terá de ser paginada com o disco em cada iteração. No caso de grandes problemas o número de iterações pode atingir um número da ordem dos milhares. Esta exagerada quantidade de paginação provoca uma degradação de performance inaceitável.

Para calcular a quantidade de memória necessária à resolução pelo método iterativo, deve também ser anotado o seguinte valor que o programa femix coloca no monitor após a assemblagem da matrix de rigidez global:

$$\Rightarrow \text{N. of non zero terms in KAA} = \text{nnzte}$$

O número de bytes ocupados durante o processo iterativo é aproximadamente dado pela seguinte expressão:

$$\begin{aligned} & 5 * \text{ntotc} * \text{sizeof}(\text{double}) + \\ & 2 * \text{ntotc} * \text{sizeof}(\text{int}) + \text{nnzte} * [\text{sizeof}(\text{int}) + \text{sizeof}(\text{double})] \\ & \text{sizeof}(\text{double}) = 8 \text{ (em geral)} \\ & \text{sizeof}(\text{int}) = 4 \text{ (em computadores de 32 bits - UNIX)} \\ & \text{sizeof}(\text{int}) = 2 \text{ (em micro computadores de 16 bits - MSDOS)} \end{aligned}$$

Convém ainda salientar que o armazenamento dos termos não nulos, utilizado conjuntamente com o método iterativo, requer uma muito menor quantidade de memória do que o armazenamento em semibanda associado ao método directo.

3.3 - CRITÉRIO PARA A SELECÇÃO DO MÉTODO DE RESOLUÇÃO DO SISTEMA DE EQUAÇÕES

A eficiência relativa de um método em relação ao outro só pode ser conhecida após a resolução pelo método iterativo, porque não é possível saber antecipadamente quantas iterações vão ser necessárias. O número de iterações depende essencialmente do erro que se tolera na solução final e do grau de condicionamento da matriz de rigidez global. Em problemas de grandes

dimensões, pode considerar-se que do ponto de vista prático o grau de condicionamento não pode ser obtido directamente, restando a sua avaliação por critérios semi empíricos baseados na experiência do utilizador.

Assim podem-se estabelecer as seguintes regras:

Erro tolerado mais pequeno	mais iterações
Matriz mal condicionada	mais iterações
Utilização de um sistema de unidades tal que os valores dos deslocamentos e rotações tenham ordens de grandeza diferentes	matriz mal condicionada
Idem para forças e momentos	matriz mal condicionada
Presença na malha de elementos muito distorcidos, de elementos com dimensões muito diferentes e de materiais com módulos de elasticidade muito diferentes	matriz mal condicionada
Coexistência de deslocamentos e rotações na formulação (ntype = 5, 6 ou 7)	matriz mal condicionada

Em problemas em que a matriz de rigidez global não seja mal condicionada é de esperar um número de iterações da ordem de grandeza de cerca de metade do número de equações. Em problemas mal condicionados, o número de iterações pode crescer muito.

O tempo de execução pelo método directo é muito pouco afectado pelo número de casos de carga, porque todos os vectores solicitação são eliminados com uma só redução da matriz de rigidez global.

O tempo de execução pelo método iterativo varia linearmente com o número de casos de carga, porque para cada um deles é necessário recomeçar o ciclo iterativo.

A dimensão da semibanda apenas afecta a resolução pelo método directo, quer em memória necessária, quer em tempo de execução. Em problemas tridimensionais, o facto de a semibanda ser quase sempre grande penaliza muito a resolução pelo método directo.

Como conclusão final, é aconselhada a utilização do método directo sempre que a matriz de rigidez caiba na memória central. Em problemas de muito grandes dimensões (número de equações superior a 1 000 - 10 000) o método iterativo pode ser o único capaz de resolver o problema, devido à menor necessidade de memória. Em grandes problemas em que a matriz de rigidez não seja muito mal condicionada, o método iterativo conduz a menores tempos de resolução.

NOTA IMPORTANTE: em estruturas hipostáticas, o método directo detecta o aparecimento de termos nulos na diagonal e interrompe a execução. Se se utilizar nestes casos o método iterativo há que distinguir duas situações:

- i) estrutura hipostática com forças não nulas segundo um grau de liberdade que possui rigidez nula;
- ii) estrutura hipostática não solicitada segundo os graus de liberdade que possuem rigidez nula.

Na situação i) o método iterativo diverge, enquanto que na situação ii) se obtém os resultados correctos. A situação de potencial perigo reside no facto de o utilizador não ser avisado de que a estrutura é hipostática, ie, altamente instável. A situação ii) tem no entanto a vantagem de não obrigar o utilizador a adicionar apoios que terão reacção nula e que apenas se destinam a eliminar os termos nulos da diagonal.

3.4 - FÓRMULAS APROXIMADAS DESTINADAS A PREVER TEMPOS DE EXECUÇÃO

Apresentam-se em seguida fórmulas aproximadas que permitem prever aproximadamente o tempo de execução num computador com 1MFlops (um milhão de floating point operations por segundo). Se toda a informação couber na memória central, num computador com n MFlops o tempo de execução será n vezes menor.

Método directo:

$$T \text{ (segundos)} \cong \text{ntotc} * \text{nhbac}^2 / 500000$$

Método iterativo:

$$T \text{ (segundos)} \cong \text{ncase} * \text{nnzte} * \text{niter} / 50000$$

sendo:

ntotc = n. of lines of the system of linear eq. (compacted)

nhbac	=	n. of columns of the half hand (compacted)
ncase	=	n. of load cases
nnzte	=	n. of non zero terms in KAA
niter	=	n. of iterations (\cong ntotc/2)

3.5 - PARÂMETROS QUE QUANTIFICAM O ERRO ASSOCIADO À SOLUÇÃO FINAL

Na resolução pelo método iterativo é necessário indicar logo no início da execução o valor de um parâmetro designado por "preconditioned residual decay (adimensional)" (*redec*), que tem como valor por defeito $1.0e-6$ e que controla a interrupção do ciclo iterativo. Como o método dos gradientes conjugados é aplicado à matriz de rigidez pré condicionada, durante o ciclo iterativo apenas é calculada a norma dos resíduos pré condicionados. Para tornar o critério de terminação do ciclo iterativo o mais independente possível do tipo de problema que se está a resolver e do sistema de unidades utilizado, considera-se que as iterações terminam quando o erro é inferior ao erro inicial vezes o parâmetro *redec*. Assim, ao atribuir a *redec* o valor $1.0e-6$, está-se a garantir que a norma dos resíduos pré condicionados final é um milhão de vezes inferior à inicial.

Este valor de *redec* é em geral suficiente, garantindo na generalidade dos problemas 4 a 5 algarismos significativos correctos na solução final.

No final da execução do programa *femix* é enviado para o monitor um diagnóstico da solução final para cada caso de carga. Este diagnóstico é independente do método de resolução do sistema de equações utilizado e consiste nos seguintes parâmetros:

- ⇒ norma do vector dos resíduos (A)
- ⇒ \bar{n} orma do vector solicitação (B)
- ⇒ trabalho dos resíduos (em valor absoluto) nos deslocamentos (em valor absoluto) (C)
- ⇒ trabalho das acções nos deslocamentos (D)
- ⇒ erro relativo adimensional (normas) ($= A/B$)
- ⇒ erro relativo adimensional (trabalho) ($= C/D$)

Este último parâmetro deve ser inferior a $1.0e-6$, quando é utilizado o método directo e deve ser da ordem de grandeza do "preconditioned residual decay" (*redec*), quando é utilizado o método iterativo.

Os restantes parâmetros não são tão importantes, sendo apenas necessária a sua consulta nos casos particulares em que o vector solicitação e/ou o vector dos deslocamentos finais tem todas as componentes nulas. Estas situações conduziriam a um denominador nulo no cálculo do erro relativo, caso ele fosse calculado.

CAPÍTULO 4

4 - POSPROCESSAMENTO COM O PROGRAMA POSFEMIX

4.1 - CONSIDERAÇÕES GERAIS

Depois de terminada a execução do programa *femix*, tem de se recorrer ao programa *posfemix* para gravar ficheiros formatados com os resultados, podendo estes ser estruturados de diversas formas. -

O programa *posfemix* dispõe de um menu principal com diversas opções relativas ao posprocessamento. Todas as opções são independentes, ie, podem ser seleccionadas por qualquer ordem, não dependendo nenhuma delas das restantes. Antes de aparecer o menu principal, o utilizador tem de responder a algumas perguntas.

Na primeira, tem de se especificar se se pretende que nas diversas opções os resultados se refiram aos casos de carga ou a combinações desses casos de carga. Nesta segunda hipótese tem de existir um ficheiro com a extensão *_cm.dat* (ver Secção 4.3).

Na resposta à segunda pergunta o utilizador deve indicar se as tensões/esforços necessitam ser actualizadas. Se responder sim (y), as tensões são calculadas e gravadas num ficheiro com a extensão _st.bin. Este ficheiro é lido sempre que uma opção que necessita das tensões/esforços é seleccionada. Se responder não (n) e o ficheiro _st.bin não existir, não poderá seleccionar nenhuma das opções que necessitam das tensões/esforços (ver Quadros 4.1 e 4.2).

Nas lajes e nas cascas é ainda perguntado ao utilizador se pretende o posprocessamento com tensões ($\sigma, \dots, \tau, \dots$) ou com esforços resultantes por unidade de comprimento (N, \dots, M, \dots).

No Quadro 4.1 encontra-se o menu principal do programa posfemix e no Quadro 4.2 as precedências relativas às diversas opções.

Quadro 4.1 - Menu principal do programa posfemix.

1) _gl.lpt file with the data
2) _rs.lpt file with the results
3) _me.s3d file with the undeformed mesh
4) _dm.s3d file with the deformed mesh
5) _ps.s3d file with the principal stresses
6) _di.pva file with the nodal displacements
7) _st.pva file with the nodal stresses
8) _sg.s3d file with the stress graphics

Quadro 4.2 - Precedências relativas às diversas opções de posprocessamento.

Sequência de execução dos programas:	Opções disponíveis
prefemix; posfemix sem cálculo de tensões	1,3
prefemix; femix; posfemix sem cálculo de tensões	2(*),4,6
prefemix; femix; posfemix com cálculo de tensões	2,5,7,8

(*) Apenas são gravados no ficheiro de resultados os deslocamentos e as reacções.

As opções 1 e 3 não exigem a execução do programa femix, porque não necessitam dos deslocamentos e reacções, tornando assim possível visualizar os dados antes de ser efectuado o cálculo. As opções 2(*), 4 e 6 não necessitam de ler o ficheiro com as tensões/esforços (_st.bin).

4.2 - DESCRIÇÃO DAS DIVERSAS OPÇÕES DE POSPROCESSAMENTO.

A cada opção de posprocessamento está associada a gravação de um ficheiro formatado cuja extensão é indicada para cada caso.

4.2.1 - Opção 1 (_gl.lpt)

Com esta opção é gravado um ficheiro com a extensão _gl.lpt, que contém de uma forma mais estruturada todos os dados especificados no ficheiro _gl.dat. Neste ficheiro são inseridos comentários mais completos sobre o significado dos diversos dados. Os comentários e os valores numéricos são formatados de uma forma standardizada. Convém recordar que no ficheiro _gl.dat os comentários são opcionais e o formato dos números é livre. Se um utilizador escrever programas específicos de posprocessamento em C ou noutra linguagem, deve ler toda a informação de que necessita no ficheiro _gl.lpt e não no ficheiro _gl.dat.

4.2.2 - Opção 2 (_rs.lpt)

Os resultados sob a forma numérica são gravados no ficheiro com a extensão _rs.lpt, quando se selecciona a opção 2. Neste ficheiro são sempre gravados os deslocamentos e as reacções. Se as tensões/esforços já tiverem sido calculadas, os seus valores aparecem também no ficheiro _rs.lpt.

Os deslocamentos dos nós e as reacções nos graus de liberdade prescritos encontram-se nos referenciais indicados na Secção 2.2.2 (parâmetro ndofn). Os valores dos deslocamentos são gravados para todos os nós e todos os graus de liberdade da malha de elementos finitos. As reacções apenas existem em nós com apoio e apenas segundo os graus de liberdade prescritos. Para cada valor da reacção é indicado o número do nó da malha e o número do grau de liberdade no nó apoiado.

Os valores das tensões/esforços são gravados no ficheiro _rs.lpt em referenciais que dependem do tipo de estrutura (ntype) (ver Quadro 4.3).

Em problemas relativos a meios contínuos (ntype de 1 a 6), as tensões/esforços são calculadas e apresentadas nos pontos de Gauss dos elementos finitos (ver Secção 2.2.2 - parâmetro ngstr).

A localização dos pontos de Gauss encontra-se representada na Fig. 4.1 (ntype = 1, 2, 3 e 5) e na Fig. 4.2 (ntype = 4). Nos elementos de casca de Ahmad (ntype = 6), quando o posprocessamento é relativo a esforços resultantes os pontos de Gauss encontram-se na

superfície média de acordo com a Fig. 4.1. Quando o posprocessamento é relativo a tensões, a posição dos pontos de Gauss é calculada como se se tratasse de um sólido tridimensional ($n_{type} = 4$) (ver Fig. 4.2).

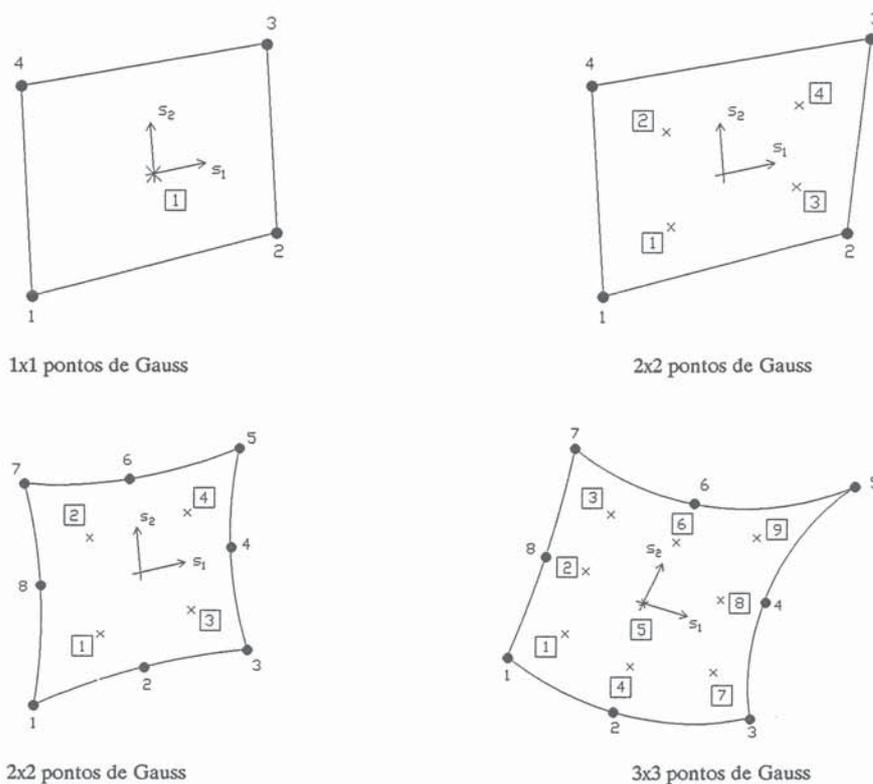


Fig. 4.1 - Posição dos pontos de Gauss para $n_{type} = 1, 2, 3$ e 5 e para $n_{type} = 6$ (esforços resultantes).

NOTA: o referencial local (s_1, s_2) e a numeração dos pontos de Gauss estão relacionados com a numeração local dos nós do elemento, ie, s_1 segue o sentido dos nós do primeiro bordo do elemento e o ponto de Gauss nº 1 é o que está mais próximo do primeiro nó. A posição dos pontos de Gauss em elementos de 9 nós coincide com a relativa aos elementos de 8 nós (ver Fig. 4.1).

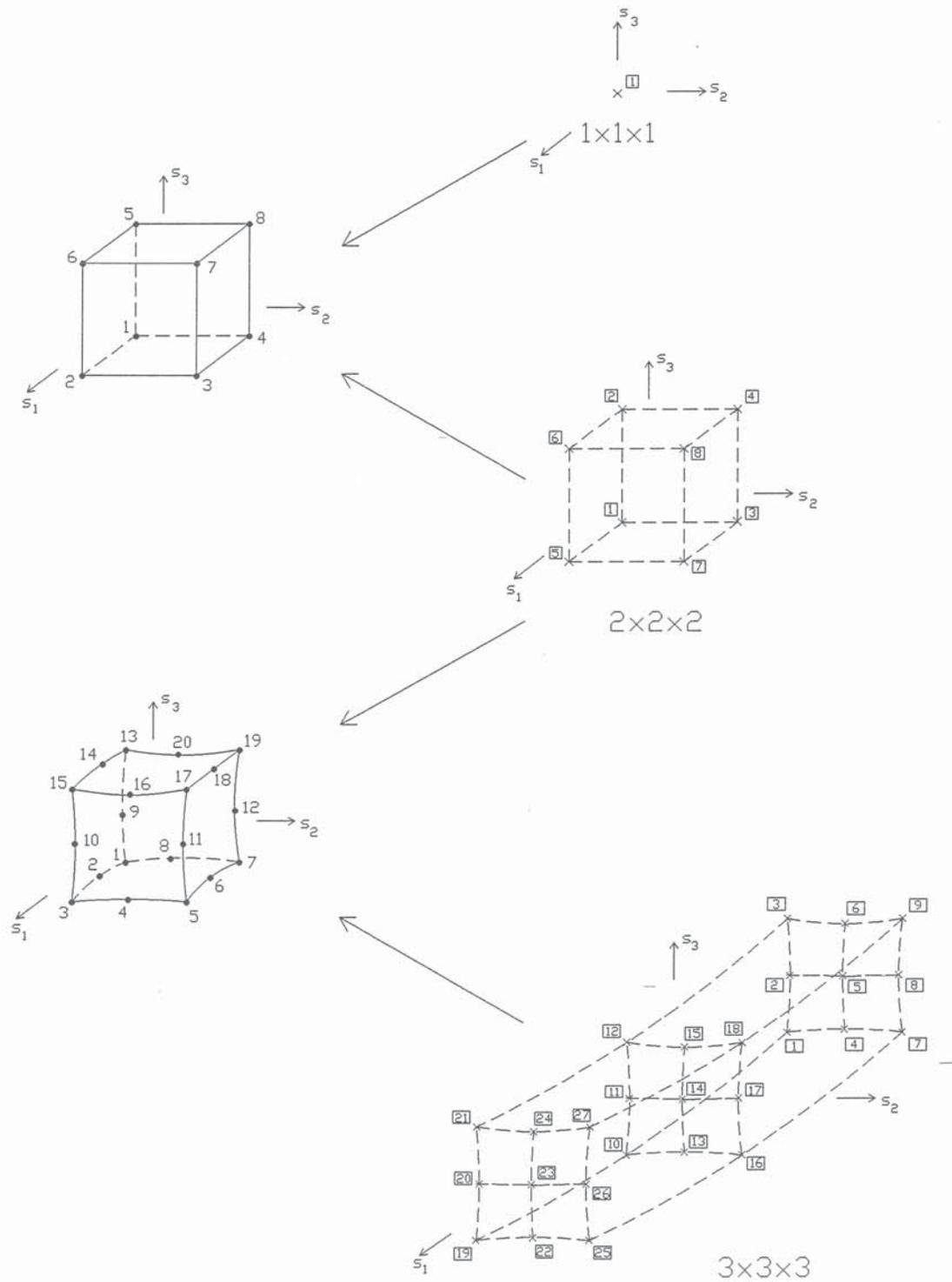


Fig 4.2 - Posição dos pontos de Gauss para ntype = 4 e para ntype = 6 (tensões).

Os esforços nas barras (ntype 7 ou 8) são calculados e apresentados nos seus nós de extremidade (Fig. 4.3).

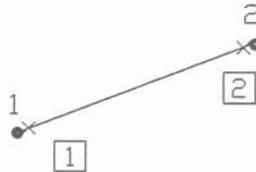


Fig. 4.3 - Posição dos pontos em que são calculados os esforços nas barras (ntype 7 ou 8).

Nas Fig. 4.4 a 4.9 apresentam-se as convenções relativas às tensões/esforços resultantes nos pontos de Gauss (ntype de 1 a 6).

No Quadro 4.3 encontra-se a ordenação das componentes do vector das tensões/esforços. É por esta ordem que as componentes deste vector são escritas no ficheiro de resultados (_rs.lpt).

$$\begin{aligned} \sigma_z &= 0 \text{ para } \text{ntype} = 1 \\ \tau_{yx} &= \tau_{xy} \\ \tau_{zy} &= \tau_{yz} = 0 \\ \tau_{xz} &= \tau_{zx} = 0 \end{aligned}$$

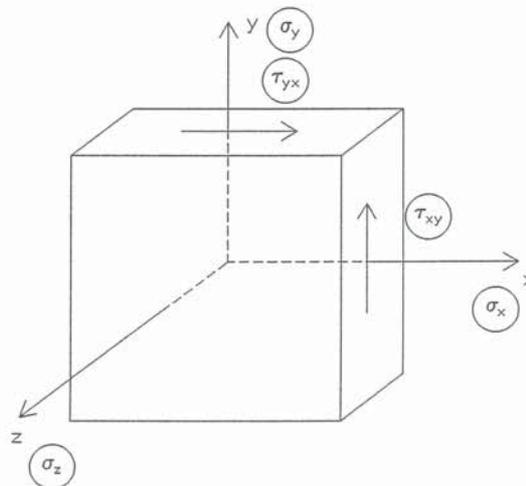


Fig. 4.4 - Tensões no referencial geral para ntype = 1, 2 ou 3.

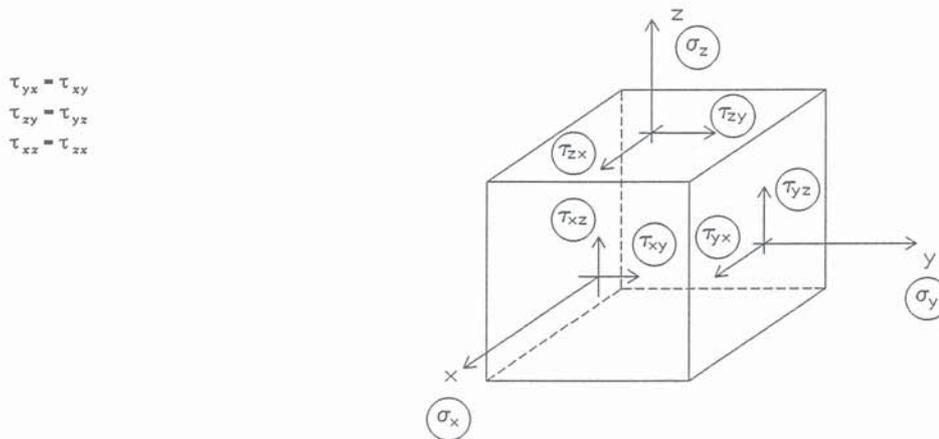


Fig. 4.5 - Tensões no referencial geral para ntype = 4.

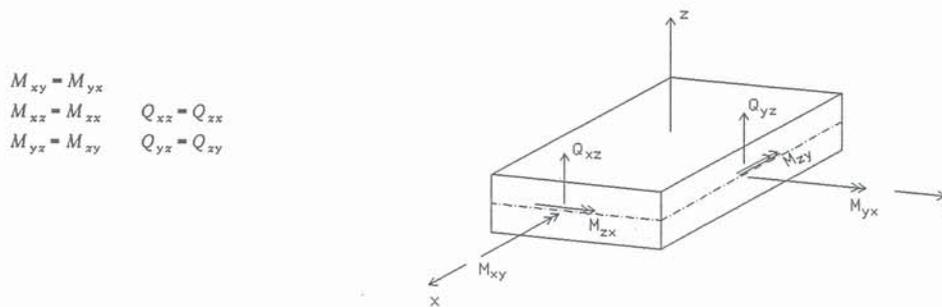


Fig. 4.6 - Esforços resultantes por unidade de comprimento no referencial geral para ntype = 5.

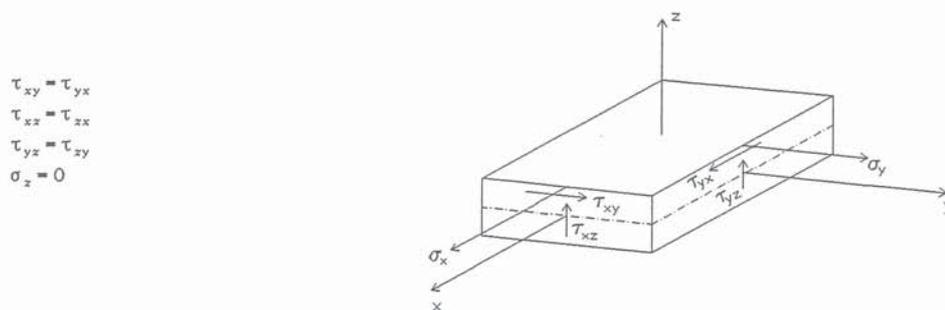


Fig. 4.7 - Tensões no referencial geral para ntype = 5.

Nas lajes (ntype = 5), as tensões σ_x , σ_y e τ_{xy} são calculadas na superfície superior do elemento, enquanto τ_{xz} e τ_{yz} são calculadas na superfície média (ver Fig. 4.7).

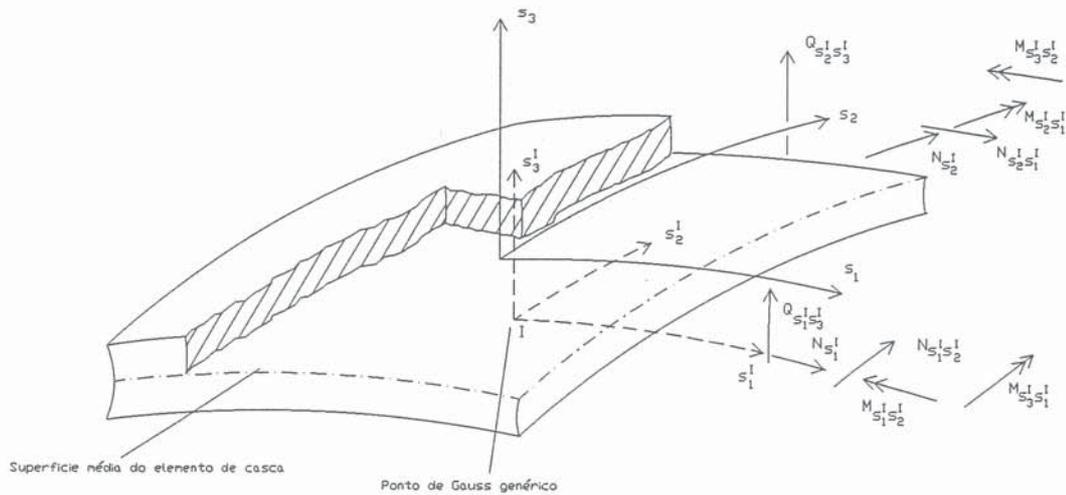


Fig. 4.8 - Esforços resultantes por unidade de comprimento no referencial local para $n\text{type} = 6$.

Nas cascas ($n\text{type} = 6$), os esforços resultantes (por unidade de comprimento) são determinados nos pontos de Gauss da superfície média do elemento e vêm referidos aos sistemas de eixos locais dos respectivos pontos de Gauss.

$N_{s_1^I}$ - Esforço de membrana (extensional) no ponto de Gauss número I e segundo a direcção do eixo local s_1^I .

$N_{s_2^I}$ - Esforço de membrana (extensional) no ponto de Gauss número I e segundo a direcção do eixo local s_2^I .

$N_{s_1^I s_2^I} = N_{s_2^I s_1^I}$ - Esforço de membrana (de corte) no ponto de Gauss número I e no plano $s_1^I s_2^I$.

$M_{s_3^I s_2^I}$ - Momento flector no ponto de Gauss número I flectindo o plano $s_3^I s_2^I$.

$M_{s_3^I s_1^I}$ - Momento flector no ponto de Gauss número I flectindo o plano $s_3^I s_1^I$.

$M_{s_1^I s_2^I} = M_{s_2^I s_1^I}$ - Momento torsor no ponto de Gauss número I.

$Q_{s_1^I s_3^I}$ - Esforço de corte no plano $s_1^I s_3^I$.

$Q_{s_2^I s_3^I}$ - Esforço de corte no plano $s_2^I s_3^I$.

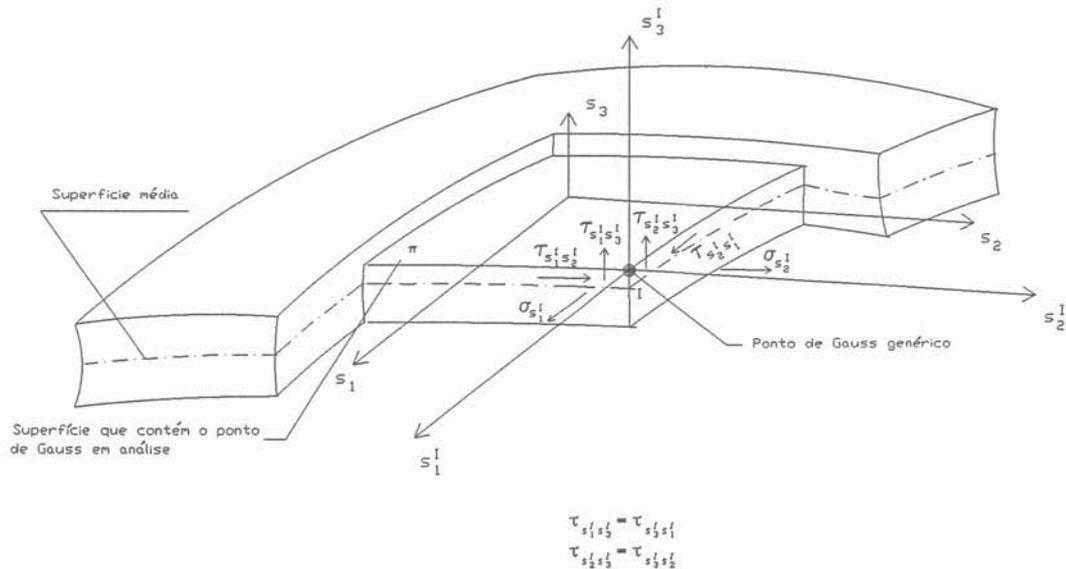


Fig. 4.9 - Tensões no referencial local para ntype = 6.

Na Fig. 4.9, (s_1^I, s_2^I, s_3^I) é o referencial local associado ao ponto de Gauss genérico I. Os eixos s_1^I e s_2^I são tangentes à superfície π no ponto de Gauss I. O eixo s_3^I é ortogonal à superfície definida por s_1^I e s_2^I (s_3^I tem a direcção e o sentido do produto vectorial de s_1^I com s_2^I). O eixo s_2^I é determinado de forma a definir um triedro directo com os eixos s_1^I e s_3^I .

As tensões são calculadas nos referenciais locais associados a cada ponto de Gauss.

$\sigma_{s_1^I}$ - Tensão extensional no ponto de Gauss I e segundo o eixo local s_1^I .

$\sigma_{s_2^I}$ - Tensão extensional no ponto de Gauss I e segundo o eixo local s_2^I .

$\tau_{s_1^I s_2^I} = \tau_{s_2^I s_1^I}$ - Tensão de corte no ponto de Gauss I, inscrita no plano $s_1^I s_2^I$.

$\tau_{s_1^I s_3^I}$ - Tensão de corte no ponto de Gauss I, inscrita num plano normal ao eixo s_1^I e segundo o eixo s_3^I .

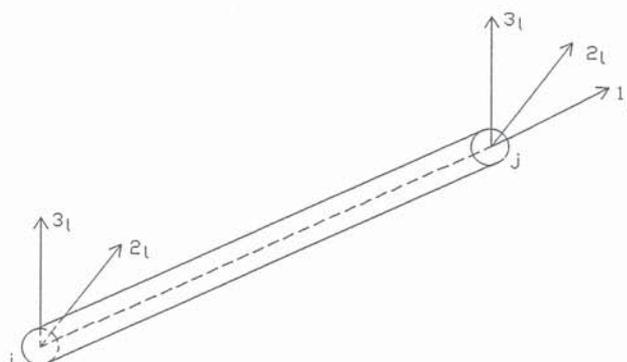
$\tau_{s_2^I s_3^I}$ - Tensão de corte no ponto de Gauss I, inscrita num plano normal ao eixo s_2^I e segundo o eixo s_3^I .

Quadro 4.3 - Ordenação das componentes do vector das tensões/esforços resultantes para cada tipo de estrutura.

Tipo de estrutura (ntype)	Referencial	Componente no vector das tensões/esforços							
		1	2	3	4	5	6	7	8
1,2,3	G	σ_x	σ_y	τ_{xy}	σ_z	—	—	—	—
4	G	σ_x	σ_y	σ_z	τ_{xy}	τ_{yz}	τ_{zx}	—	—
5 (tensões)	G	σ_x	σ_y	τ_{xy}	τ_{yz}	τ_{zx}	—	—	—
5 (esforços)	G	M_{zx}	M_{xy}	M_{xy}	Q_{yz}	Q_{zx}	—	—	—
6 (tensões)	L	σ_{s1}	σ_{s2}	τ_{s1s2}	τ_{s2s3}	τ_{s3s1}	—	—	—
6 (esforços)	L	N_{s1}	N_{s2}	N_{s1s2}	M_{s3s1}	M_{s3s2}	M_{s1s2}	Q_{s2s3}	Q_{s3s1}

G - referencial global

L - referencial local

1_l, 2_l, 3_l - triedro directo

i - extremidade esquerda (numeração global mais baixa)

Fig. 4.10 - Referencial local de uma barra prismática.

Os esforços nas barras (ntype 7 ou 8) são apresentados no referencial local (ver Fig. 4.10 e Anexo C) e com a mesma convenção nas duas extremidades. Assim, por exemplo um esforço axial constante de tracção é apresentado com sinal negativo na extremidade esquerda e positivo na direita, representando os referenciais da Fig. 4.10 acções do nó sobre a barra. Os momentos flectores estão posicionados em relação aos referenciais da Fig. 4.10 de acordo com a regra do saca rolhas.

Quadro 4.4 - Ordenação das componentes do vector dos esforços nas barras para cada tipo de estrutura.

Tipo de estrutura (ntype)	Componente no vector dos esforços nas barras					
	1	2	3	4	5	6
7	N_{1t}	V_{2t}	V_{3t}	T_{1t}	M_{2t}	M_{3t}
8	N_{1t}	V_{2t}	V_{3t}	—	—	—

Todos os esforços no referencial local da barra.

N - esforço axial V - esforço transversal T - momento torsor M - momento flector

No Quadro 4.4 encontra-se a ordenação das componentes do vector dos esforços nas barras (ver Anexo C). É por esta ordem que as componentes deste vector são escritas no ficheiro de resultados (_rs.lpt).

4.2.3 - Opção 3 (_me.s3d)

Quando se selecciona a opção 3, é gravado um ficheiro com a extensão _me.s3d, que inclui os dados necessários à visualização da malha indeformada com o programa drawmesh (ver o respectivo manual). Todos os ficheiros com a extensão .s3d têm a seguinte estrutura:

```

título principal (máximo 60 caracteres)
|
| título do desenho (máximo 6 caracteres)
| número de elementos    número de nós    número de nós ligados ao exterior
(*) | contador de elementos    número de nós do elemento    lista dos nós do elemento
-   | contador de nós    coordenadas cartesianas tridimensionais
|   | contador dos nós ligados ao exterior    número do nó ligado ao exterior

```

A parte (*) do ficheiro pode ser repetida várias vezes.

Na representação gráfica os nós dos elementos são ligados por segmentos rectilíneos.

Para visualizar sólidos tridimensionais (bricks), recorrendo ao programa drawmesh com eliminação das superfícies escondidas e com shading/contour fill, é necessário utilizar previamente o comando bts do programa s3dcad (ver o respectivo manual). As faces interiores podem ser eliminadas.

4.2.4 - Opção 4 (_dm.s3d)

Quando esta opção é seleccionada, é gravado um ficheiro com a extensão _dm.s3d (ver Secção 4.2.3), que possibilita a visualização das deformadas relativas aos vários casos de carga/combinacões com o programa drawmesh.

Além do número do caso de carga/combinacão, é pedido ao utilizador o factor de ampliação dos deslocamentos dos nós. Para esta pergunta existe uma resposta por defeito, que corresponde a um factor de ampliação tal que o deslocamento máximo é representado com uma grandeza igual a um quinto da dimensão máxima da estrutura.

4.2.5 - Opção 5 (_ps.s3d)

Com a selecção desta opção é gravado um ficheiro com a extensão _ps.s3d (ver Secção 4.2.3), que contém para cada caso de carga/combinacão a informação que possibilita a obtenção do gráfico com as tensões/esforços principais (ver Quadro 4.5). O ficheiro com a extensão _ps.s3d deve ser concatenado com o ficheiro que resulta da selecção da opção 3 (_me.s3d), recorrendo à execução do seguinte programa com os argumentos indicados:

```
s3djoin -o nome jobname_me jobname_ps
```

Em seguida deve ser executado o programa drawmesh, fornecendo como jobname nome. Se se pretender representar os valores positivos com uma cor e os negativos com outra, tem de se editar o ficheiro jobname.cfg (ver o manual do programa drawmesh).

Quadro 4.5 - Conteúdo do ficheiro com a extensão _ps.s3d para cada tipo de estrutura (ntype).

Tipo de estrutura (ntype)	Conteúdo do ficheiro com a extensão <u>_ps.s3d</u>
1,2,3	tensões principais
4	-----
5	esforços resultantes (momentos) principais
6	esforços resultantes principais de membrana
	esforços resultantes principais de flexão
7,8	-----

Quando se selecciona esta opção é pedido um factor destinado a converter unidades de tensão/esforço em unidades de comprimento. Se o valor por defeito não conduzir a um gráfico bem proporcionado, um aumento deste factor conduz a um gráfico em que os segmentos de recta que representam as tensões/esforços aparecem com maiores dimensões.

4.2.6 - Opção 6 (_di.pva)

A selecção da opção 6 conduz à gravação de um ficheiro com a extensão _di.pva, cujo conteúdo são os deslocamentos generalizados correspondentes a um dos ndofn graus de liberdade (ver Secção 2.2.2 - parâmetro ndofn). Os ficheiros com a extensão .pva possuem um número de linhas igual ao número de nós da estrutura, contendo cada linha o valor de um campo escalar precedido do número do respectivo nó. Este campo escalar pode ser visualizado por intermédio da coloração entre isocurvas, recorrendo à opção C do programa drawmesh e indicando di como extensão. Antes de executar este programa é necessário copiar o ficheiro jobname_me.s3d ou jobname_dm.s3d para jobname.s3d, sendo assim possível visualizar o campo escalar sobre a malha inicial ou sobre a deformada.

Ex: cp jobname_me.s3d jobname.s3d

Esta opção só permite tratar um caso de carga/combinção e um deslocamento generalizado de cada vez. É aconselhável mudar a extensão ao ficheiro _di.pva, recorrendo a um comando do sistema operativo, para mais tarde poder visualizar diversas situações.

Ex: mv jobname_di.pva jobname_ditx5.pva

(rotação θ_x no caso de carga número 5).

A opção 6 só está disponível para meios contínuos (ntype de 1 a 6).

4.2.7 - Opção 7 (_st.pva)

Nesta opção tudo é semelhante à opção anterior (ver Secção 4.2.6) com a excepção de o ficheiro gravado ter a extensão _st.pva e de o seu conteúdo ser uma tensão ou esforço.

No Quadro 4.3 encontram-se as componentes de tensão/esforço que é possível escolher para cada tipo de estrutura. No caso das lajes e cascas (ntype 5 ou 6), dependendo da selecção efectuada ao iniciar o programa posfemix, é possível obter colorações entre isocurvas relativamente a tensões ou esforços resultantes referidos à superfície média. Em relação a este tipo de estruturas e no caso do posprocessamento de tensões, é ainda necessário indicar se se pretendem os resultados da superfície inferior, média ou superior.

Em meios contínuos (ntype de 1 a 6) e sempre que o posprocessamento seja relativo a tensões, é possível colocar as tensões de Von Mises no ficheiro com a extensão _st.pva, respondendo 0 (zero) na pergunta relativa à componente do vector das tensões.

As tensões de Von Mises são obtidas com a seguinte sequência de cálculos:

Tensão média:

$$\sigma_0 = (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z) / 3$$

Tensões de desvio:

$$\sigma'_x = \sigma_x - \sigma_0$$

$$\sigma'_y = \sigma_y - \sigma_0$$

$$\sigma'_z = \sigma_z - \sigma_0$$

Segundo invariante do tensor das tensões de desvio:

$$J'_2 = (\sigma_x'^2 + \sigma_y'^2 + \sigma_z'^2) / 2 + \tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2$$

Tensão de Von Mises:

$$\bar{\sigma} = \sqrt{3J'_2}$$

A opção 7 só pode ser seleccionada se o parâmetro ngstr (ver Secção 2.2.2) tiver o valor 2, porque a extrapolação das tensões dos pontos de Gauss para os nós é realizada supondo que o conjunto dos pontos de Gauss constitui um elemento fictício com 2 nós por bordo.

4.2.8 - Opção 8 (_sg.s3d)

Esta opção conduz à gravação de um ficheiro com a extensão _sg.s3d, que contém a informação que permite obter os diagramas de esforços tridimensionais em estruturas discretizadas por barras prismáticas (ntype 7 ou 8). A visualização destes diagramas pode ser efectuada com o programa drawmesh (ver Secção 4.2.3).

O conteúdo do ficheiro com a extensão _sg.s3d refere-se apenas a uma das componentes do vector dos esforços nas barras, mas pode incluir diversos casos de carga/combinacões.

No Quadro 4.4 encontra-se a numeração das componentes do vector dos esforços nas barras para pórticos e treliças tridimensionais (ver também Secção 4.2.2).

Depois de indicar o número da componente, o utilizador tem ainda que fornecer o factor de escala que transforma as unidades do esforço que está a ser tratado em unidades métricas. Em certos casos, atribuir um valor negativo a este factor faz com que o gráfico final apareça com um aspecto mais sugestivo. Quanto maior for o valor absoluto deste factor maiores dimensões terão os diagramas de esforços.

Os diagramas de esforços são sempre representados no plano 1₁, 3₁ (ver Anexo C). Para visualizar melhor os diagramas de esforços aconselha-se a utilização da opção S (shading) do programa drawmesh.

4.3 - COMBINAÇÕES DE RESULTADOS

Se na primeira pergunta efectuada pelo programa posfemix se responder que se pretende o processamento de combinações, tem de existir um ficheiro texto com o mesmo jobname dos restantes ficheiros, com a extensão _cm.dat e com a seguinte estrutura (ver o ficheiro demo_cm.dat e a Secção 4.1):

```

título geral do ficheiro com os coeficientes das combinações
número de combinações

(*) | título da combinação
    | contador da combinação e número de casos de carga com coeficiente de combinação não nulo
    | lista com o número do caso de carga e o respectivo coeficiente de combinação não nulo
    | palavra chave END_OF_FILE

```

A parte (*) do ficheiro tem de ser repetida tantas vezes quantas as combinações.

Apresenta-se em seguida um exemplo de ficheiro com os coeficientes das combinações:

```

### Main title of the list of combinations
Main title of the combinations

### Combination parameters
3 # ncomb (total number of combinations)

# =====
### Title of the combination
First combination title

```

```
### Combination number and number of load cases in the combination
```

```
# icomb  nlcas  
  1      3
```

```
### Load case numbers and load case coefficients
```

```
# lcase  vcoef  
  4     -2.5  
  6     -0.9  
  8      1.5
```

```
# =====
```

```
### Title of the combination
```

```
Second combination title
```

```
### Combination number and number of load cases in the combination
```

```
# icomb  nlcas  
  2      4
```

```
### Load case numbers and load case coefficients
```

```
# lcase  vcoef  
  4      1.5  
  6     -1.9  
  8      0.5  
  9      1.5
```

```
# =====
```

```
### Title of the combination
```

```
Third combination title
```

```
### Combination number and number of load cases in the combination
```

```
# icomb  nlcas  
  3      1
```

```
### Load case numbers and load case coefficients
```

```
# lcase  vcoef  
  5     -2.9
```

```
END_OF_FILE
```

ANEXO A

SELECÇÃO DO TIPO DE ELEMENTO E DO NÚMERO DE PONTOS DE GAUSS

O programa **FEMIX** permite calcular as tensões/esforços resultantes em pontos de Gauss distintos daqueles que foram utilizados na integração numérica da matriz de rigidez do elemento (ver Secção 2.2.2 - parâmetros **ngaus** e **ngstr**). Ambos os parâmetros podem tomar os valores 1, 2 ou 3.

No Quadro A.1 encontram-se comentários relativos a cada combinação entre o número de nós por bordo do elemento e o valor do parâmetro **ngaus**.

Quadro A.1 - Possíveis combinações entre o número de nós por bordo do elemento e o valor do parâmetro **ngaus**.

Tipo de estrutura (ntype)	Nº de nós por bordo do elemento	ngaus	Integração	Comentário
1,2,3,4,5,6	2 (-)	1	reduzida	Resultados aceitáveis com a malha muito refinada (eventualidade de modos de deformação espúrios)
		2	completa	Resultados aceitáveis com a malha muito refinada
		3	completa	Resultados aceitáveis com a malha muito refinada
	3 (+)	1	insuficiente	Não é possível resolver o sistema de equações
		2(+)	reduzida	Resultados muito bons (eventualidade de modos de deformação espúrios)
		3	completa	Resultados bons
7,8	nnode, nkaus e ngstr têm de ser sempre iguais a 2			

(-) Elementos desaconselhados

(+) Combinação aconselhada

Notas:

- Quanto maior for o número de pontos de Gauss utilizado no cálculo da matriz de rigidez (**ngaus**), menores são os deslocamentos obtidos e por consequência menores são também as tensões/esforços resultantes.
- Em lajes e cascas de muito pequena espessura, a utilização da integração completa pode dar origem a soluções inaceitáveis (**locking**).
- Embora possa tomar os valores 1, 2 ou 3, o parâmetro **ngstr** deve ser sempre igual a 2, para que os pontos em que são calculadas as tensões/esforços resultantes sejam aqueles em que os resultados são mais correctos.
- Quando se utilizam elementos de 2 nós por bordo obtêm-se os mesmos resultados quer se atribua a **ngaus** o valor 2 ou o valor 3.

- Quanto maior for o número de pontos de Gauss (ngaus) mais demorado é o cálculo da matriz de rigidez e do vector solicitação de cada elemento.
- Em certos casos é possível ultrapassar o problema da presença de modos de deformação espúrios com o recurso à resolução iterativa do sistema de equações.
- A presença de modos de deformação espúrios pode dar origem a termos nulos na diagonal da matriz de rigidez da estrutura, pivots nulos na resolução pelo método directo, divergência na resolução iterativa ou oscilações na malha deformada.
- Exceptuando o caso do elemento de 9 nós (estados planos, lajes e cascas), deve sempre ser utilizada a integração reduzida. Com os elementos de 9 nós a integração completa conduz a resultados ligeiramente melhores e evita o aparecimento de mecanismos espúrios.

ANEXO B

DETERMINAÇÃO DO REFERENCIAL LOCAL ASSOCIADO A UM NÓ GENÉRICO DE UM ELEMENTO DE CASCA ESPESSO (AHMAD)

Nas expressões que se seguem são utilizados os referenciais e vectores indicados na Fig. 2.6.

$$\underline{n}_1 = \left[\frac{\partial x_1}{\partial s_1} \quad \frac{\partial x_2}{\partial s_1} \quad \frac{\partial x_3}{\partial s_1} \right]^T \Rightarrow \text{vector tangente a } s_1 \text{ no nó}$$

$$\underline{n}_2 = \left[\frac{\partial x_1}{\partial s_2} \quad \frac{\partial x_2}{\partial s_2} \quad \frac{\partial x_3}{\partial s_2} \right]^T \Rightarrow \text{vector tangente a } s_2 \text{ no nó}$$

$$\underline{n}_3 = \underline{n}_1 \times \underline{n}_2 \Rightarrow \text{vector normal ao plano tangente à} \\ \text{superfície média do elemento } (s_3 = 0) \text{ no nó}$$

$$\hat{n}_3 = \frac{\underline{n}_3}{|\underline{n}_3|} = [n_{13} \quad n_{23} \quad n_{33}]^T \Rightarrow \text{versor correspondente ao vector } \underline{n}_3.$$

Se $n_{13} = n_{33} = 0$ conclui-se que \hat{n}_2 e \hat{n}_3 são paralelos. Neste caso o vector \underline{n}_1 é obtido a partir da seguinte relação:

$$\underline{n}_1 = \hat{n}_3 \times \hat{i}_1$$

sendo o versor,

$$\hat{n}_1 = \frac{\underline{n}_1}{|\underline{n}_1|}$$

paralelo ao plano $x_2 \ x_3$.

Se n_{13} ou n_{33} for diferente de zero então,

$$\underline{n}_1 = \hat{i}_2 \times \hat{n}_3$$

sendo o vector,

$$\hat{n}_1 = \frac{\underline{n}_1}{|\underline{n}_1|}$$

paralelo ao plano $x_1 \ x_3$.

O versor \hat{n}_2 é finalmente obtido recorrendo à seguinte expressão:

$$\hat{n}_2 = \hat{n}_3 \times \hat{n}_1$$

ANEXO C

DEFINIÇÃO DO REFERENCIAL LOCAL DE UMA BARRA

Os elementos de barra utilizados na discretização de estruturas reticuladas ou articuladas (n_{type} 7 ou 8) foram formulados nas seguintes condições:

- a) eixo da barra rectilíneo.
- b) secção transversal constante.
- c) centro de corte coincidente com o centro de gravidade.
- d) características da secção definidas em relação aos eixos principais centrais de inércia.
- e) não é considerada a deformação por corte.
- f) foram programadas as expressões da matriz de rigidez no referencial local ($4EI/L$, $12EI/L^3$, etc.); a matriz de rigidez no referencial geral é obtida com a expressão $T K_l T^T$.
- g) a extremidade esquerda é a de numeração global mais baixa.

Se a barra não tiver o eixo rectilíneo ou se a secção não for constante, deve-se refinar a malha, substituindo cada barra curvilínea ou de secção variável por um conjunto de barras que aproxime melhor a situação real.

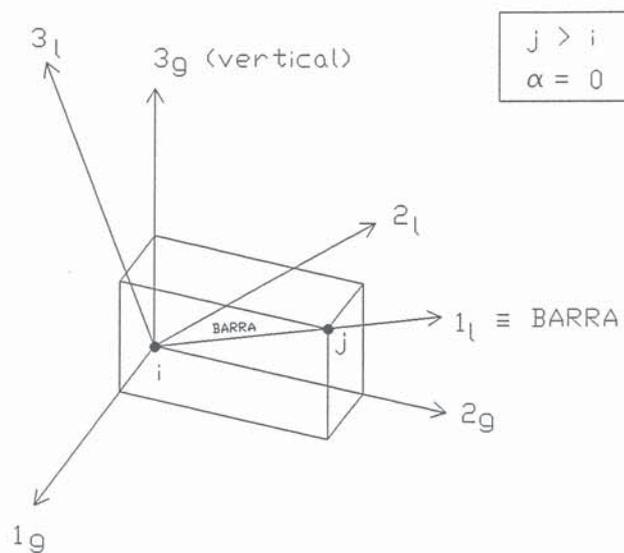
Sempre que o centro de corte não coincida com o centro de gravidade, os erros decorrentes de tal facto não se tornam significativos desde que as barras sejam suficientemente esbeltas. Neste caso todos os esforços devem ser considerados aplicados no centro de gravidade.

Nos casos em que a deformação por corte seja significativa (dimensões transversais da secção da mesma ordem de grandeza do comprimento barra) a estrutura deve ser estudada como um meio contínuo.

A posição do referencial local da barra (eixo da barra + eixos principais centrais de inércia da secção) é calculada a partir das coordenadas dos nós da barra e do ângulo α (ver Secção 2.2.7).

Na Fig. C.1 encontra-se a definição do referencial local para uma barra genérica (não vertical) com o ângulo α nulo.

Na Fig. C.2 apresenta-se o caso particular da barra vertical também com o ângulo α nulo.



- $1_g, 2_g, 3_g$ - referencial geral
- $1_l, 2_l, 3_l$ - referencial local
- i - extremidade esquerda (numeração global mais baixa)
- j - extremidade direita
- 2_l - contido no plano horizontal definido por 1_g e 2_g
- 3_l - contido no plano vertical definido por 1_l e 3_g
- 2_l - perpendicular ao plano vertical definido por 1_l e 3_g

Fig. C.1 - Referencial local de uma barra não vertical com o ângulo α nulo.

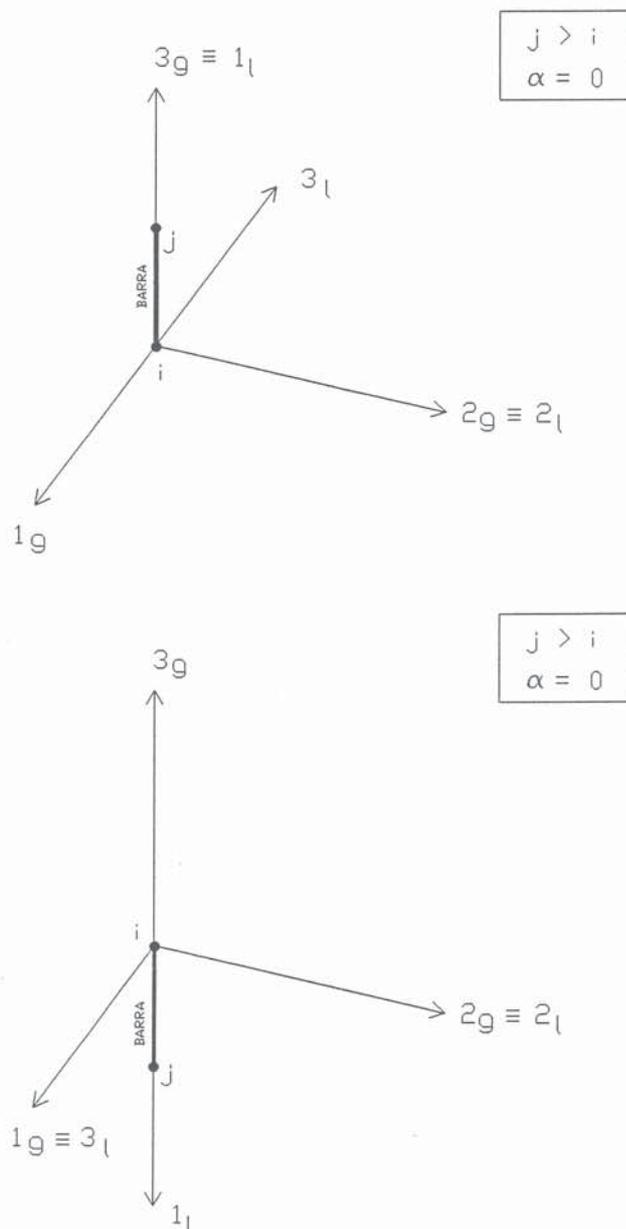


Fig. C.2 - Referencial local de uma barra vertical com o ângulo α nulo (ver também a Fig. C.1).

Se o ângulo α não for nulo, passa-se a designar o referencial $1_l, 2_l, 3_l$ das Fig. C.1 e C.2 por $1_{l0}, 2_{l0}, 3_{l0}$. O referencial local da barra ($1_l, 2_l, 3_l$) é obtido rodando o referencial $1_{l0}, 2_{l0}, 3_{l0}$ em torno de 1_{l0} (eixo da barra) de um ângulo α , de acordo com a regra do saca rolhas (ver Fig.

C.3). No ficheiro de dados deve figurar um valor de α tal que o procedimento referido leve os eixos 2_{1o} , 3_{1o} a coincidirem com os eixos principais centrais de inércia da secção transversal (2_1 , 3_1).

O ângulo α é sempre definido num plano perpendicular à barra.

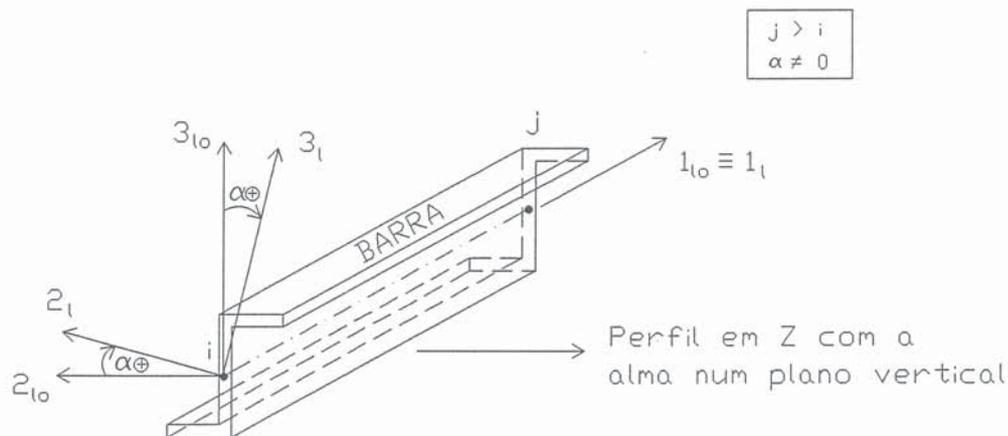
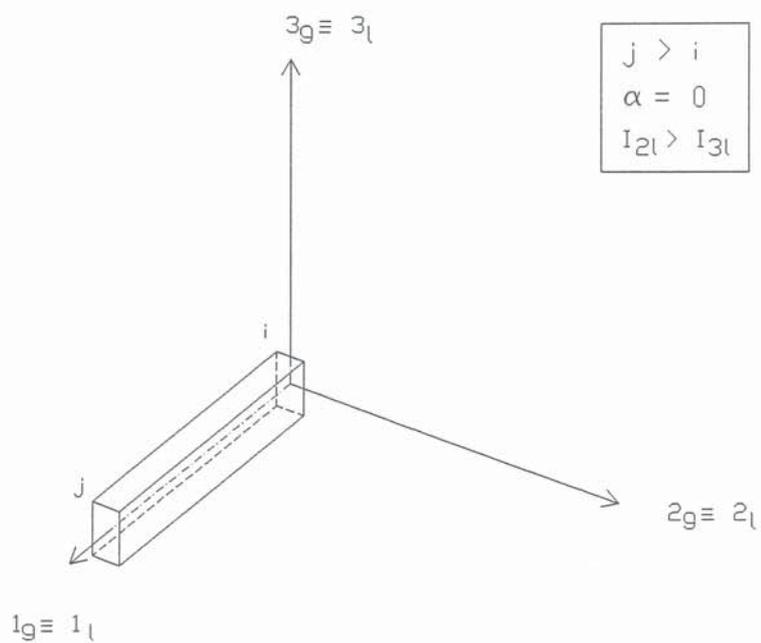
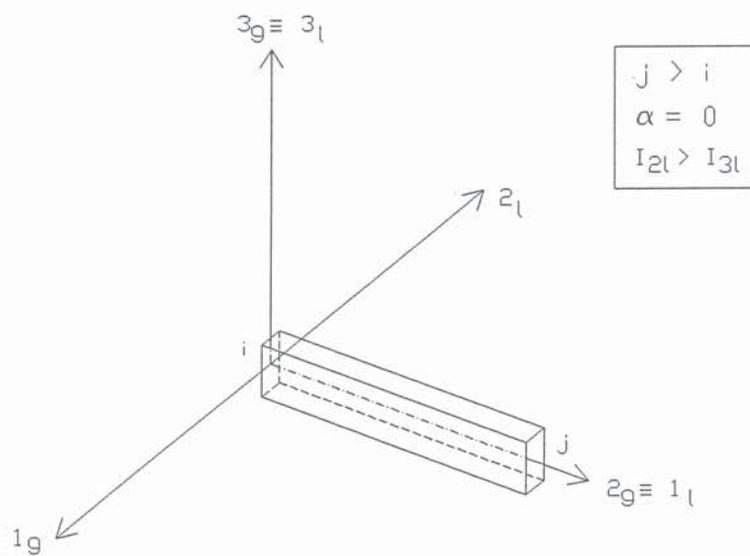
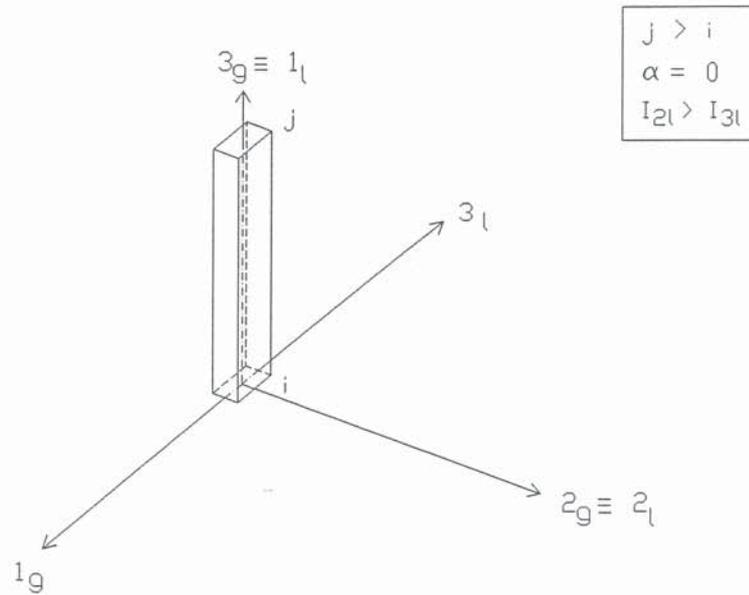
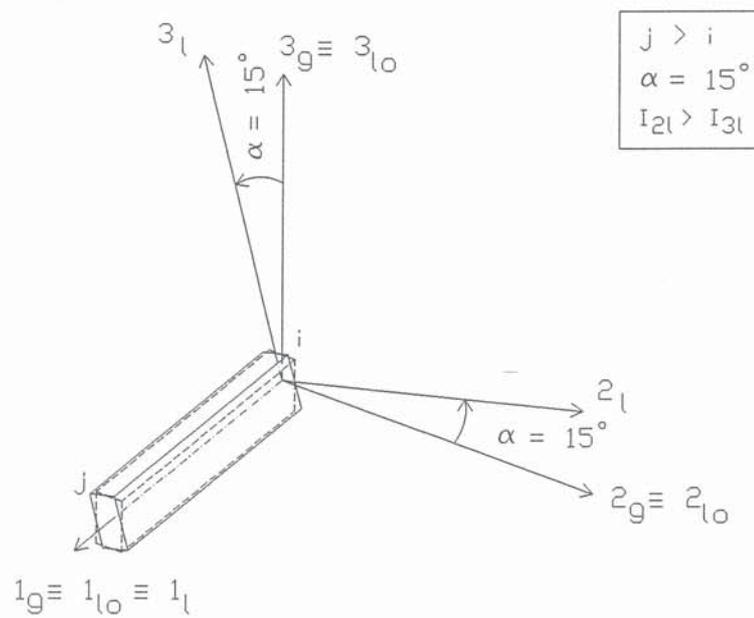


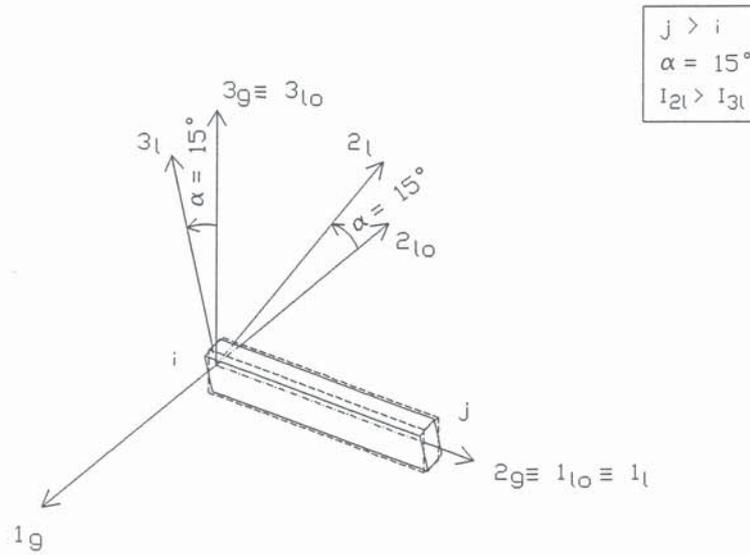
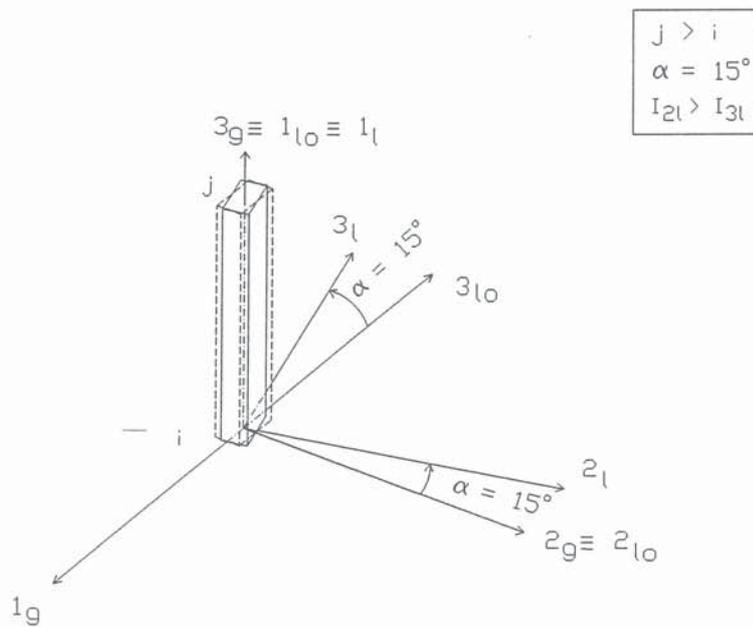
Fig. C.3 - Definição do referencial local da barra para α não nulo.

A definição da posição do referencial $1_1, 2_1, 3_1$ em relação ao referencial $1_{1o}, 2_{1o}, 3_{1o}$ (Fig. C.3) aplica-se às situações descritas nas Fig. C.1 e C.2.

Apresenta-se em seguida um conjunto de figuras destinadas a esclarecer por intermédio de exemplos a definição da posição do referencial local de uma barra.

Fig. C.4 - Barra segundo 1_g (horizontal) ($\alpha = 0$).Fig. C.5 - Barra segundo 2_g (horizontal) ($\alpha = 0$).

Fig. C.6 - Barra segundo 3_g (vertical) ($\alpha = 0$).Fig. C.7 - Barra segundo 1_g (horizontal) ($\alpha \neq 0$).

Fig. C.8 - Barra segundo 2_g (horizontal) ($\alpha \neq 0$).Fig. C.9 - Barra segundo 3_g (vertical) ($\alpha \neq 0$).

Apresentam-se em seguida algumas recomendações relativas à preparação de dados de estruturas reticuladas e articuladas (n_{type} 7 ou 8):

- a) as grelhas planas devem ter as coordenadas dos nós no plano xy (representar x para a direita e y para cima).
- b) se não existirem acções que provoquem deformações no plano da grelha, os graus de liberdade 1, 2 e 6 devem ser declarados como apoio fixo em todos os nós. Não pode existir nenhuma acção que dê origem a reacções nestes apoios fictícios.
- c) os pórticos ou treliças planas devem ter as coordenadas dos nós no plano xz (representar x para a direita e z para cima).
- d) se não existirem acções que provoquem deformações para fora do plano do pórtico, os graus de liberdade 2, 4 e 6 devem ser declarados como apoio fixo em todos os nós. No caso das treliças planas deve ser impedido o grau de liberdade 2. Não pode existir nenhuma acção que dê origem a reacções nestes apoios fictícios.
- e) para facilitar a definição do ângulo α , este deve estar compreendido entre -45° e 45° , sendo aconselhável substituir por exemplo $\alpha = 50^\circ$ por $\alpha = -40^\circ$ e trocar I_{2l} com I_{3l} .

A numeração dos nós das barras deve crescer segundo os sentidos positivos dos eixos do referencial geral. O comando `ren` do programa `s3dcad` (ver o manual deste programa) põe todas as barras com a numeração mais aconselhável, devendo ser sempre utilizado.

A formulação da matriz de rigidez global em pórticos e treliças 3D (`ntype 7` ou `8`) é a seguinte:

$$\begin{aligned}
 F_g &= T F_l \\
 F_l &= K_l \Delta_l \\
 \Delta_l &= T^T \Delta_g \\
 F_g &= T K_l T^T \Delta_g \\
 K_g &= T K_l T^T
 \end{aligned}$$

l - relativo ao referencial local

g - relativo ao referencial geral

Δ - deslocamento generalizado

F - força generalizada

K - matriz de rigidez

T - matriz de transformação

ANEXO D

SEQUÊNCIA DOS PROGRAMAS A EXECUTAR E FICHEIROS ENVOLVIDOS

Apresentam-se em seguida exemplos de como utilizar o programa **FEMIX** tirando partido dos programas auxiliares s3dcad, drawmesh, graph2d, s3djoin, s3dsplit e pixtojet. A utilização destes programas auxiliares é descrita com mais pormenor noutros manuais. No Quadro D.1 encontra-se a lista dos ficheiros que cada programa pode ler ou escrever. No Quadro D.2 é explicado o significado das extensões desses ficheiros.

Depois de terminado o estudo de uma estrutura e para efeitos de arquivo, é suficiente guardar o ficheiro com a extensão _gl.dat, sendo aconselhável apagar os restantes ficheiros relacionados com essa estrutura. Se for de prever a eventualidade de repetir o estudo com outro grau de refinamento da malha, devem ser também guardados os ficheiros que contêm os macro elementos (.s3d) e as divisões e pesos (_dw.dat).

Quadro D.1 - Ficheiros que podem ser lidos ou escritos pelos diversos programas.

Programa	Lê	Escreve
prefemix	*_gl.dat (F)	*_gl.bin (N)
femix	*_gl.bin (N) *_tmp (N)	*.tmp (N) *_di.bin (N) *_re.bin (N) [*_ih.g2d] (F)
posfemix	[*_gl.bin] (N) [*_di.bin] (N) [*_re.bin] (N) [*_st.bin] (N) [*_cm.dat] (F)	[*_st.bin] (N) [*_gl.lpt] (F) [*_rs.lpt] (F) [*_me.s3d] (F) [*_dm.s3d] (F) [*_ps.s3d] (F) [*_di.pva] (F) [*_st.pva] (F) [*_sg.s3d] (F)
s3dcad	[*.s3d] (F) [*_dxf] (F) [*_dw.dat] (F)	[*.s3d] (F) [*_dxf] (F) [*_gl.dat] (F)
drawmesh	*.s3d (F) [*_cfg] (F) [*_*_pva] (F)	[*.pix] (N) [*_cfg] (F)
graph2d	*.g2d (F) [*_def] (F)	[*.pix] (N) [*_def] (F)
s3djoin	*.s3d (F)	*.s3d (F)
s3dsplit	*.s3d (F)	*.s3d (F)
pixtojet	*.pix (N)	*.jet (N)

- * - Nome variável
- F - Ficheiro formatado
- N - Ficheiro não formatado
- [] - Opcional

Quadro D.2 - Significado das extensões dos ficheiros.

jobname_AB.XYZ | AB → conteúdo
 | XYZ → tipo de ficheiro

Conteúdo	Descrição
dw	divisions and weights - divisões e pesos
gl	geometry and loads - geometria e cargas
di	displacements - deslocamentos
re	reactions - reacções
rs	results - resultados (deslocamentos, tensões/esforços, reacções)
me	mesh (undeformed) - malha indeformada
dm	deformed mesh - malha deformada
ps	principal stresses - tensões/esforços principais
st	stresses - tensões/esforços
sg	stress graphics - diagramas de esforços em barras
cm	combination matrix - matriz com os coeficientes das combinações
ih	iteration history - evolução do erro ao longo do ciclo iterativo

Tipo de ficheiro	Descrição
.s3d	formato específico do programa drawmesh (*)
.g2d	formato específico do programa graph2d (**)
.dat	ficheiro formatado contendo diversos tipos de dados
.bin	ficheiro não formatado (binário) (não pode ser alterado com um editor)
.lpt	ficheiro destinado a ser enviado para uma impressora
.pva	ficheiro complementar para a visualização de campos escalares com o programa drawmesh (*)
.tmp	ficheiro temporário que é automaticamente apagado pelo programa (se a execução for interrompida deve ser apagado pelo utilizador)

(*) ver o manual do programa drawmesh

(**) ver o manual do programa graph2d

EXEMPLO 1 - Caso mais simples

- preparar o ficheiro de dados jobname_gl.dat com um editor de texto com base num ficheiro demo*_gl.dat.
- ler e validar os dados com o programa prefemix.
- gravar os ficheiros jobname_gl.lpt e jobname_me.s3d com o programa posfemix.
- visualizar a malha antes do cálculo com o programa drawmesh, fornecendo como ficheiro de dados jobname_me.
- verificar o conteúdo do ficheiro jobname_gl.lpt.
- efectuar o cálculo com o programa femix.
- gravar os ficheiros de resultados com o programa posfemix.
- visualizar os resultados com o programa drawmesh.

EXEMPLO 2 - Preparação dos dados mais elaborada

- preparar um ficheiro .dxf com um programa de CAD contendo polylines 3D que representam os macro elementos.
- preparar o ficheiro jobname_dw.dat com as divisões dos macro elementos e respectivos pesos recorrendo a um editor de texto com base no ficheiro demo_dw.dat.
- com o programa s3dcad, ler o ficheiro .dxf, refinar a malha, renumerar a malha, gravar um ficheiro .s3d (provisório como medida de segurança) e gravar um ficheiro .dxf com polylines. O programa s3dcad permite também mover, rodar, repetir, adicionar, converter malhas de um tipo de elemento para outro, etc..
- ler o ficheiro .dxf acabado de gravar com um programa de CAD, retocar a malha já refinada e gravar um novo ficheiro .dxf.
- com o programa s3dcad, ler esta última versão do ficheiro .dxf, gravar um ficheiro .s3d e um ficheiro _gl.dat.
- acrescentar ao ficheiro _gl.dat as ligações ao exterior, as características físicas e geométricas dos elementos e os diversos casos de carga, recorrendo a um editor de texto ou a programas auxiliares escritos especificamente para cada situação.
- correr os programas prefemix, femix, posfemix, etc..

EXEMPLO 3 - Posprocessamento mais elaborado

Depois de executado o programa posfemix com todas as opções necessárias:

- copiar o ficheiro jobname_dm.s3d para jobname.s3d.
- executar o programa drawmesh fornecendo jobname como ficheiro de dados.
- seleccionar a opção C e fornecer a extensão st para visualizar o campo de tensões sobre a deformada (só em meios contínuos).
- seleccionar a opção D para gravar o conteúdo da janela no ficheiro jobname_01.pix (01 é um contador que é incrementado cada vez que se selecciona a opção D).
- com o programa pixtojet, converter o ficheiro jobname_01.pix no ficheiro jobname_01.jet (específico para a impressora Hewlett Packard PaintJet).
- enviar o ficheiro jobname_01.jet para a impressora PaintJet em modo binário.
- visualizar a evolução do erro ao longo do ciclo iterativo (caso tenha sido este o método de resolução utilizado) com o programa graph2d, fornecendo como ficheiro de dados jobname_ih.
- concatenar por exemplo a deformada de uma laje com a deformada da grelha equivalente recorrendo ao programa s3djoin.
- visualizar ambas as deformadas sobrepostas com cores diferentes utilizando o programa drawmesh (para obter cores diferentes é necessário editar o ficheiro jobname.cfg, que é automaticamente gravado com valores por defeito quando ele ainda não existe e se corre o programa drawmesh).
- etc..

3 - CALCULO DE DESLOCAMENTOS E REACÇÕES COM O PROGRAMA FEMIX	42
3.1 - Considerações gerais	42
3.2 - Métodos de resolução do sistema de equações	43
3.3 - Critério para a selecção do método de resolução do sistema de equações	44
3.4 - Fórmulas aproximadas destinadas a prever tempos de execução	46
3.5 - Parâmetros que quantificam o erro associado à solução final	47
4 - POSPROCESSAMENTO COM O PROGRAMA POSFEMIX	49
4.1 - Considerações gerais	49
4.2 - Descrição das diversas opções de posprocessamento	51
4.2.1 - Opção 1 (_gl.lpt)	51
4.2.2 - Opção 2 (_rs.lpt)	51
4.2.3 - Opção 3 (_me.s3d)	59
4.2.4 - Opção 4 (_dm.s3d)	60
4.2.5 - Opção 5 (_ps.s3d)	60
4.2.6 - Opção 6 (_di.pva)	61
4.2.7 - Opção 7 (_st.pva)	61
4.2.8 - Opção 8 (_sg.s3d)	62
4.3 - Combinações de resultados	63
Anexo A - Selecção do tipo de elemento e do número de pontos de Gauss	65
Anexo B - Determinação do referencial local associado a um nó genérico de um elemento de casca espesso (Ahmad)	68
Anexo C - Definição do referencial local de uma barra	70
Anexo D - Sequência dos programas a executar e ficheiros envolvidos	79