

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 (<i>ntype</i>)	Nº de nós por bordo do elemento	<i>ngaus</i>	Integração	Comentário
1, 2, 3, 4, 5, 6, 9	2 (-)	1	reduzida	Resultados aceitáveis com a malha muito refinada (possível ocorrência 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 (possível ocorrência de modos de deformação espúrios)
		3	completa	Resultados bons
7,8	<i>nnode</i> , <i>ngaus</i> e <i>ngstr</i> 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 utiliza elementos de 2 nós por bordo obtém-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 do sistema de equações de equilíbrio, 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, em que

$$\underline{n}_1 = \begin{bmatrix} \frac{\partial x_1}{\partial s_1} & \frac{\partial x_2}{\partial s_1} & \frac{\partial x_3}{\partial s_1} \end{bmatrix}^T \quad (\text{B.1})$$

é o vector tangente a s_1 no nó,

$$\underline{n}_2 = \begin{bmatrix} \frac{\partial x_1}{\partial s_2} & \frac{\partial x_2}{\partial s_2} & \frac{\partial x_3}{\partial s_2} \end{bmatrix}^T \quad (\text{B.2})$$

é o vector tangente a s_2 no nó, e

$$\underline{n}_3 = \underline{n}_1 \times \underline{n}_2 \quad (\text{B.3})$$

é o vector normal ao plano tangente à superfície média do elemento ($s_3 = 0$) no nó. O versor correspondente ao vector \underline{n}_3 determina-se por:

$$\hat{n}_3 = \frac{\underline{n}_3}{\|\underline{n}_3\|} = [n_{13} \quad n_{23} \quad n_{33}]^T. \quad (\text{B.4})$$

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

$$\underline{n}_1 = \hat{n}_3 \times \hat{i}_1 \quad (\text{B.5})$$

sendo o versor,

$$\hat{n}_1 = \frac{\underline{n}_1}{\|\underline{n}_1\|} \quad (\text{B.6})$$

paralelo ao plano $x_2 x_3$.

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

$$\underline{n}_1 = \hat{i}_2 \times \hat{n}_3 \quad (\text{B.7})$$

sendo o vector \hat{n}_1 paralelo ao plano $x_1 x_3$.

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

$$\hat{n}_2 = \hat{n}_3 \times \hat{n}_1 \quad (\text{B.8})$$

ANEXO C

DEFINIÇÃO DO REFERENCIAL LOCAL DE UMA BARRA

Os elementos de barra que são utilizados na discretização de estruturas reticuladas ou articuladas (*n^{type}* 7 ou 8) são 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 global 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.

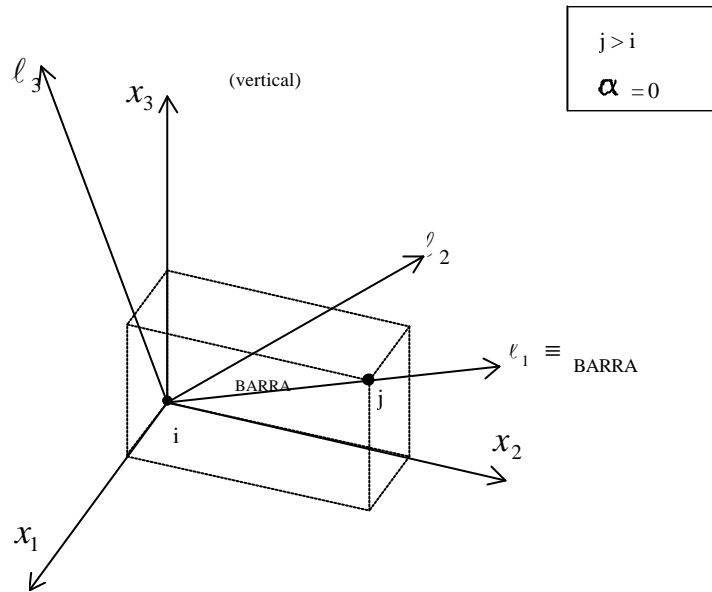
Sempre que o centro de corte não coincida com o centro de gravidade, os erros decorrentes de tal facto não se tornam significativos desde que as barras sejam suficientemente esbeltas. Neste caso todos os esforços devem ser considerados aplicados no centro de gravidade.

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

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



- x_1, x_2, x_3 - referencial global;
- l_1, l_2, l_3 - referencial local;
- i - extremidade esquerda (numeração global mais baixa);
- j - extremidade direita;
- l_2 - contido no plano horizontal definido por x_1 e x_2 ;
- l_3 - contido no plano vertical definido por l_1 e x_3 ;
- l_2 - perpendicular ao plano vertical definido por l_1 e x_3 ;

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

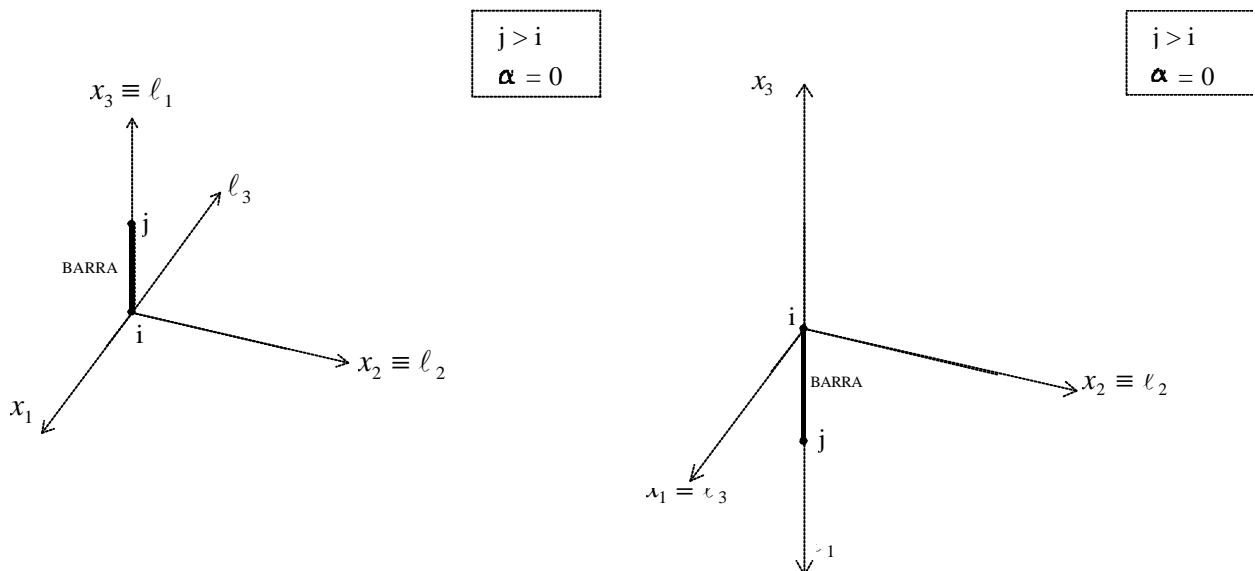


Figura C.2 - Referencial local de uma barra vertical com o ângulo α nulo (ver também a Figura C.1).

Considere-se agora que os eixos l_2 e l_3 não são principais centrais de inércia, como é o caso do perfil representado na Figura C.3, cujos eixos principais centrais de inércia são os eixos l'_2 e l'_3 ,

formando um ângulo α com os eixos l_2 e l_3 . Neste caso o referencial local da barra (l'_1, l'_2, l'_3) é obtido rodando o referencial l_1, l_2, l_3 em torno de l_1 (eixo da barra) de um ângulo α , de acordo com a regra do saca rolhas (ver Figura C.3). No ficheiro de dados deve figurar um valor de α tal que o procedimento referido leve os eixos l_2 e l_3 a coincidirem com os eixos principais centrais de inércia da secção transversal (l'_2 e l'_3). O ângulo α é sempre definido num plano perpendicular à barra.

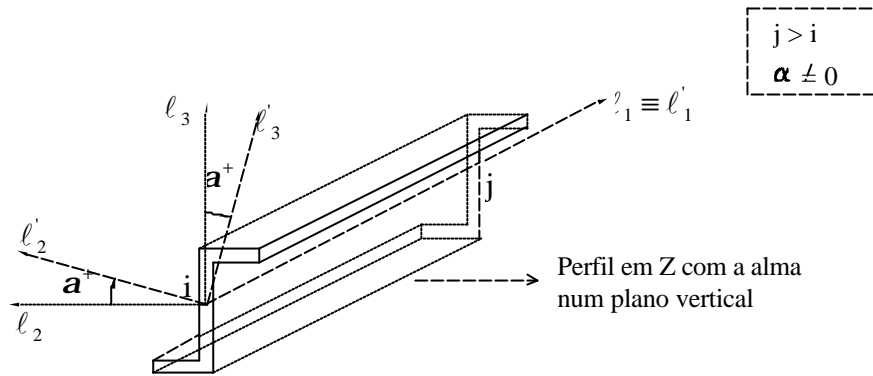


Figura C.3 - Definição do referencial local da barra para α não nulo.

A definição da posição do referencial l'_1, l'_2, l'_3 em relação ao referencial l_1, l_2, l_3 (Figura C.3) aplica-se às situações descritas nas figuras 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.

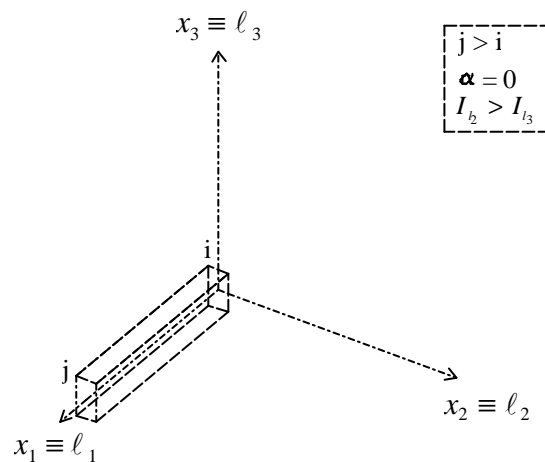


Figura C.4 - Barra segundo x_1 (horizontal) ($\alpha = 0$).

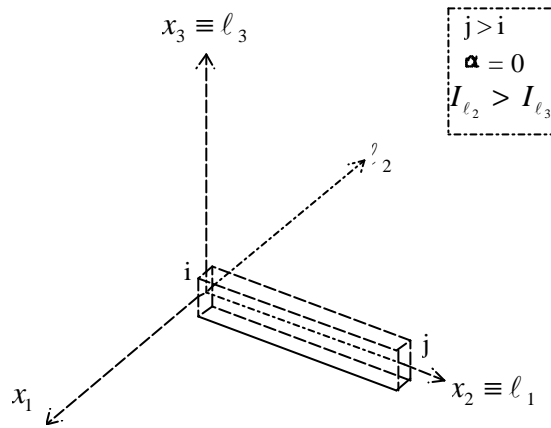


Figura C.5 - Barra segundo x_2 (horizontal) ($\alpha=0$).

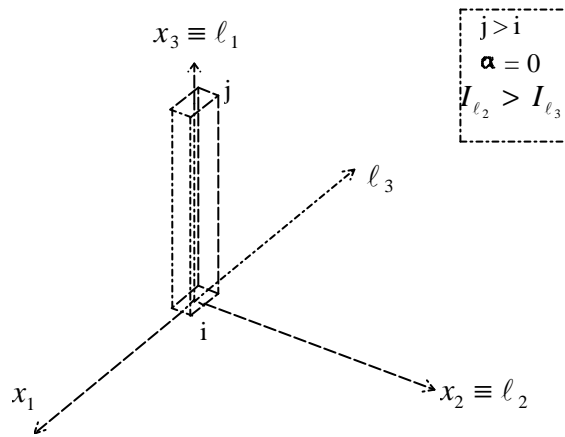


Figura C.6 - Barra segundo x_3 (vertical) ($\alpha=0$).

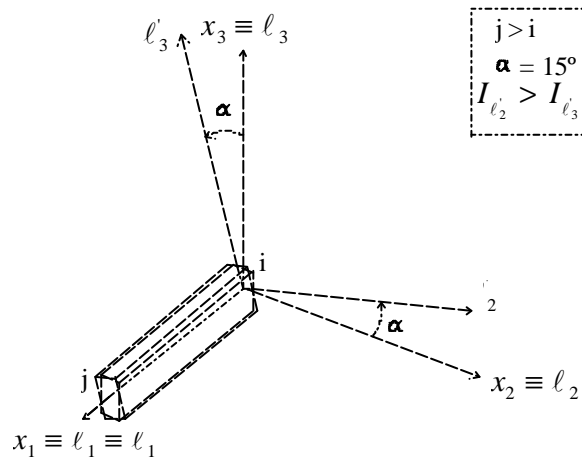


Figura C.7 - Barra segundo x_1 (horizontal) ($\alpha \neq 0$).

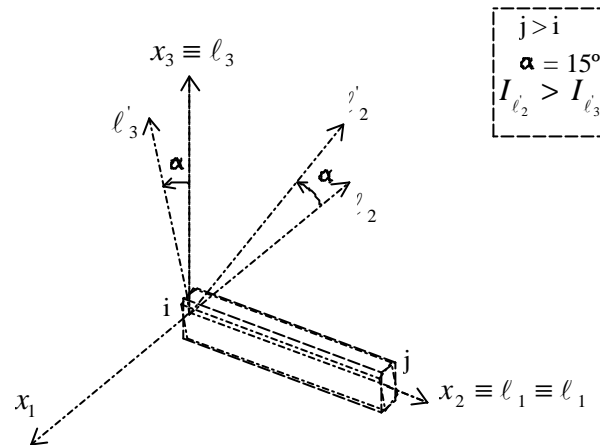


Figura C.8 - Barra segundo x_2 (horizontal) ($\alpha \neq 0$).

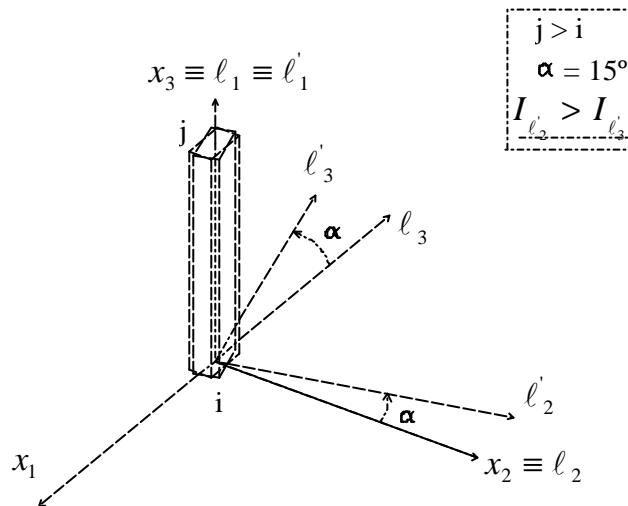


Figura C.9 - Barra segundo x_3 (vertical) ($\alpha \neq 0$).

Algumas recomendações relativas à preparação de dados de estruturas reticuladas contínuas e articuladas são apresentadas em seguida:

- As grelhas planas devem ter as coordenadas dos nós no plano x_1x_2 (representar x_1 para a direita e x_2 para cima);
- Se não existirem acções que provoquem deformações no plano da grelha, os graus de liberdade 1, 2 e 6 devem ser declarados como fixos em todos os nós. Não pode existir nenhuma acção que dê origem a reacções nestes apoios fictícios;
- Os pórticos ou treliças planas devem ter as coordenadas dos nós no plano x_1x_3 (representar x_1 para a direita e x_3 para cima);

- d) Se não existirem acções que provoquem deformações para fora do plano 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_{ℓ_2} com I_{ℓ_3} .

A numeração dos nós das barras deve crescer segundo os sentidos positivos dos eixos do referencial geral. O comando **ren** do programa **s3dcad** (ver 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:

$$\underline{Q}_b^x = \underline{T}_b^{\ell g} \underline{Q}_b^\ell$$

$$\underline{Q}_b^\ell = \underline{K}_b^\ell \underline{U}_b^\ell$$

$$\underline{U}_b^\ell = \underline{T}_b^{\ell x T} \underline{U}_b^x$$

$$\underline{Q}_b^x = \underline{T}_b^{\ell x} \underline{K}_b^\ell \underline{T}_b^{\ell x T} \underline{U}_b^x$$

$$\underline{K}_b^x = \underline{T}_b^{\ell x} \underline{K}_b^\ell \underline{T}_b^{\ell x T}$$

- ℓ - relativo ao referencial local
- x - relativo ao referencial global
- b - relativo à barra
- \underline{U} - vector dos deslocamentos generalizados
- \underline{Q} - vector das forças generalizadas
- \underline{K} - matriz de rigidez
- \underline{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.

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

Programa	Lê	Escreve
<i>prefemix</i>	*_gl.dat (F)	*_gl. bin (N)
<i>femix</i>	*_gl. bin (N) *.tmp (N)	*_tmp (N) *_di.bin (N) *_re.bin (N) *_sv.bin (N) [*_ih.g2d] (F)
<i>posfemix</i>	[*_gl. bin] (N) [*_di.bin] (N) [*_re.bin] (N) [*_st.bin] (N) [*_sv.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) [*_sp.pva] (F) [*_d.s3d] (F)
<i>s3dcad</i>	[*_s3d] (F) [*_dxf] (F) [*_dw.dat] (F)	[*_s3d] (F) [*_dxf] (F) [*_gl.dat] (F)
<i>drawmesh</i>	*_s3d (F) *_cfg] (F) [*_*_pav] (F)	[*_pix] (N) [*_cfg] (F)
<i>graph2d</i>	*_g2d (F) [*_def] (F)	[*_pix] (N) [*_def] (F)
<i>s3djoin</i>	*_s3d (F)	*_s3d (F)
<i>s3dsplit</i>	*_s3d (F)	*_s3d (F)
<i>pixtojet</i>	*_pix (N)	*_jet (N)

* - Nome variável

F - Ficheiro formatado

N - Ficheiro não formatado

[] - Opcional

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.2 - Significado das extensões dos ficheiros.

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

Conteúdo	Descrição
<i>dw</i>	<i>divisions and weights</i> - divisões e pesos
<i>gl</i>	<i>geometry and loads</i> - geometria e cargas
<i>di</i>	<i>displacements</i> - deslocamentos
<i>re</i>	<i>reactions</i> - reacções
<i>rs</i>	<i>results</i> - resultados (deslocamentos, tensões/esforços, reacções)
<i>me</i>	<i>mesh (undeformed)</i> - malha indeformada
<i>dm</i>	<i>deformed mesh</i> - malha deformada
<i>ps</i>	<i>principal stresses</i> - tensões/esforços principais
<i>st</i>	<i>stresses</i> - tensões/esforços
<i>sg</i>	<i>stress graphics</i> - diagramas de esforços com barras
<i>sp</i>	<i>soil pressures</i> - pressões no solo
<i>cm</i>	<i>combination matrix</i> - matriz com os coeficientes das combinações
<i>ih</i>	<i>iteration history</i> - evolução do erro ao longo do ciclo iterativo

Tipo de ficheiro	Descrição
<i>.s3d</i>	formato específico do programa <i>drawmesh</i> (*)
<i>.g2d</i>	formato específico do programa <i>graph2d</i> (**)
<i>.dat</i>	ficheiro formatado contendo diversos tipos de dados
<i>.bin</i>	ficheiro não formatado (binário) (não pode ser alterado com um editor)
<i>.lpt</i>	ficheiro destinado a ser enviado para uma impressora
<i>.pva</i>	ficheiro complementar para a visualização de campos escalares com o programa <i>drawmesh</i> (*)
<i>.tmp</i>	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 *d*ev30_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 *dev30_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*, os pontos nodais da estrutura com graus de liberdade definidos em sistema de eixos especificados, os apoios elásticos, 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 PainJet 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..