





## **ANEXO I**

Guia para criação do ficheiro *input* (Excel) do programa DynBridges 1.0

A.I.1 Folha “Nós”

NOS	Coordenadas			Apoios						Cargas/Momentos Concentrados (kN)					
	x1	x2	x3	ax1	ax2	ax3	rx1	rx2	rx3	ax1	ax2	ax3	rx1	rx2	rx3
1	0	0	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0	0	0	0	0	0
2	0	3,64E-11	4,50748	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0	0	0	0	0	0
3	0	8,00E-11	9,01496	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0	0	0	0	0	0
4	0	1,24E-10	13,5224	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0	0	0	0	0	0
5	0	1,60E-10	18,0299	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0	0	0	0	0	0
6	0	1,96E-10	22,5374	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0	0	0	0	0	0
7	0	2,40E-10	27,0449	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0	0	0	0	0	0
8	0	2,84E-10	32,5523	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0	0	0	0	0	0
9	0	3,20E-10	38,0598	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0	0	0	0	0	0
10	0	3,57E-10	44,5673	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0	0	0	0	0	0
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
395	0	537,468	100,585	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0	0	0	0	0	0
396	0	535,5	105,327	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0	-1000	0	0	0	0
397	0	385,5	40,0042	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0	0	-500	0	2000	0
398	0	0	-13,785	1E+15	1E+15	1E+15	1E+15	1E+15	1E+15	0	0	0	0	0	0
399	0	0	-6,89	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0	0	0	0	0	0
400	0	49,589	-16,953	1E+15	1E+15	1E+15	1E+15	1E+15	1E+15	0	0	0	0	0	0
401	0	109,584	-36,37	1E+15	1E+15	1E+15	1E+15	1E+15	1E+15	0	0	0	0	0	0
402	0	235,532	-90,0659	1E+15	1E+15	1E+15	1E+15	1E+15	1E+15	0	0	0	0	0	0
403	0	535,5	-87,0644	1E+15	1E+15	1E+15	1E+15	1E+15	1E+15	0	0	0	0	0	0

Figura A.I.1 - Preenchimento da folha NÓS [ficheiro input da malha de EF de barra 3D], correspondente às características dos nós da estrutura – coordenadas estruturais, condições de apoio e cargas concentradas.

**A.I.2 Folha “Elementos”**

ELEM	Incidências		Mat	Lib_internas	Área	Inércias			Cargas Distribuídas (kN/m)			Elemento estrutural
	No1	No2				A	I11	I22	I33	ax1	ax2	
1	398	399	1	0	14,8	215,6	90,3	202,1	0	0	0	P15
2	399	1	1	0	14,8	215,6	90,3	202,1	0	0	0	
3	1	2	1	0	14,8	215,6	90,3	202,1	0	0	0	
4	2	3	1	0	14,8	215,6	90,3	202,1	0	0	0	
5	3	4	1	0	14,8	215,6	90,3	202,1	0	0	0	
6	4	5	1	0	14,8	215,6	90,3	202,1	0	0	0	
7	5	6	1	0	14,8	215,6	90,3	202,1	0	0	0	
8	6	7	1	0	14,8	215,6	90,3	202,1	0	0	0	
9	7	8	1	0	14,8	215,6	90,3	202,1	0	0	0	
10	8	9	1	0	14,8	215,6	90,3	202,1	0	0	0	
11	9	10	1	0	14,8	215,6	90,3	202,1	0	0	0	
12	10	11	1	9	14,8	215,6	90,3	202,1	0	0	0	
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	
481	365	116	4	13	0,0084	1,123E-05	5,61499E-06	5,615E-06	0	0	0	T19L12
482	362	115	4	13	0,0081	1,04422E-05	5,22108E-06	5,221E-06	0	0	0	T19L11
483	359	114	4	13	0,00795	1,0059E-05	5,0295E-06	5,029E-06	0	0	0	T19L10
484	356	113	4	13	0,00765	9,31415E-06	4,65707E-06	4,657E-06	0	0	0	T19L9
485	353	112	4	13	0,0072	8,25059E-06	4,1253E-06	4,125E-06	0	0	0	T19L8
486	350	111	4	13	0,0069	7,57737E-06	3,78868E-06	3,789E-06	0	0	0	T19L7
487	347	110	4	13	0,00645	6,62124E-06	3,31062E-06	3,311E-06	0	0	0	T19L6
488	344	109	4	13	0,00615	6,01964E-06	3,00982E-06	3,01E-06	0	0	0	T19L5
489	341	108	4	13	0,00585	5,44668E-06	2,72334E-06	2,723E-06	0	0	0	T19L4
490	338	107	4	13	0,00585	5,44668E-06	2,72334E-06	2,723E-06	0	0	0	T19L3
491	335	106	4	13	0,006	5,72958E-06	2,86479E-06	2,865E-06	0	0	0	T19L2
492	332	105	4	13	0,0072	8,25059E-06	4,1253E-06	4,125E-06	0	0	0	T19L1

**Figura A.I.2** - Preenchimento da folha ELEMENTOS [ficheiro input da malha de EF de barra 3D], correspondente às características dos elementos da estrutura – incidências, tipo de material, libertações internas da matriz de rigidez elementar, áreas, inércias e cargas.

### A.I.3 Folha “Materiais”

TIPO	M. Elasticidade E (kN/m <sup>2</sup> )	M. Torção G	Peso Específico Pesp (kN/m <sup>3</sup> )	Elementos estrutural	Ansys
1	3,20E+07	13333333,33	25	Pilares	beam188
2	3,70E+07	15416666,67	31,25	Tabuleiro	beam188
3	3,30E+07	13750000	25	Mastros	beam188
4	2,10E+08	87500000	85	Tirantes	link180
5	1,00E+14	4,16667E+13	0,00001	Elementos Horizontais Mastros	beam188
		(Projeto)		Super Rígidez	

Figura A.I.3 - Preenchimento da folha MATERIAIS [ficheiro input da malha de EF de barra 3D], correspondente às características dos materiais da estrutura – módulo de elasticidade, módulo de torção e peso específico.

### A.I.4 Folha "Secções"

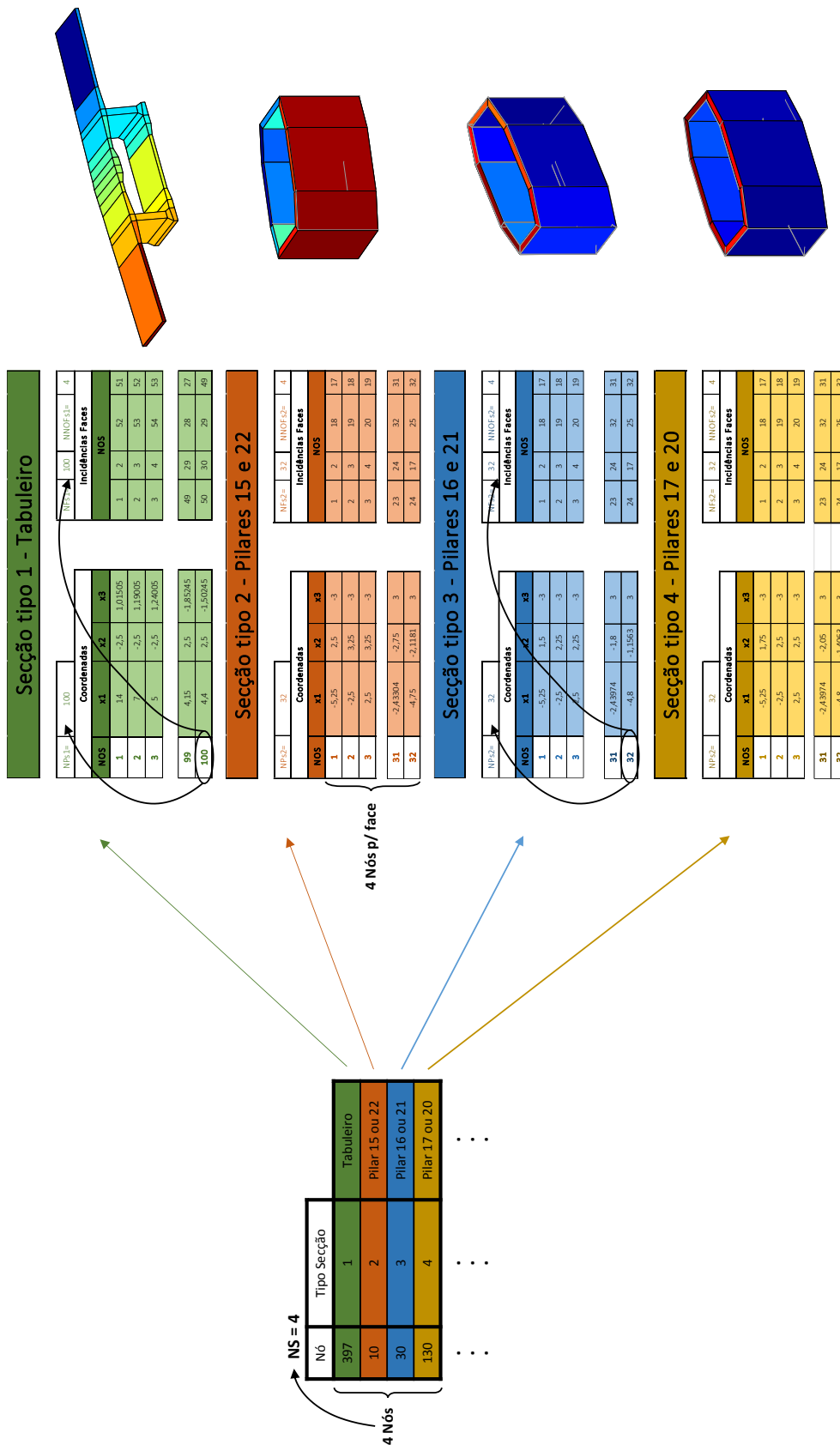


Figura A.I.4 - Preenchimento da folha SECÇÕES [ficheiro input da malha de EF de barra 3D], correspondente às características das secções associadas ao respetivo nó da estrutura.



## **ANEXO II**

Guia para modelação de estruturas com elementos finitos de barra no programa ANSYS Mechanical APDL

## A.II.1 Introdução

O programa ANSYS é um *software* de análise pelo método dos elementos finitos, tendo sido desenvolvido não só para a análise estrutural, mas também para fluídos, magnetismo, termodinâmica, etc. No presente anexo será descrita uma parte do programa associada apenas à análise estrutural, tomando como exemplo o viaduto do Corgo. A versão do programa é o ANSYS Mechanical APDL 13, no qual se pode dar as ordens ao programa através da linha de comandos. Sendo esta uma das grandes vantagens do programa, foi criada uma rotina de código que, depois de copiada para a linha de comando, faz o cálculo dinâmico do viaduto automaticamente. Por isso, em cada capítulo, serão abordadas as funções que substituem as ações manuais do utilizador.

Na Figura A.II.1 apresenta-se o aspeto do espaço de trabalho do Mechanical APDL. Na coluna da esquerda, é de destacar os botões *Preprocessor*, *Solution* e *General Postproc*, pois serão esses os utilizados para a modelação do viaduto. O *Preprocessor* é responsável por toda a informação *input* relativamente ao tipo de barras, materiais, geometria, cargas, etc.; o *Solution* é onde vai ser definido o tipo de análise a efetuar; e o *General Postproc* é onde será feita a leitura dos resultados dos cálculos. No botão *Preferences* define-se imediatamente o tipo de análise *Structural*, de maneira a remover funções do programa desnecessárias a este tipo de análise e assim facilitando a visualização das demais.

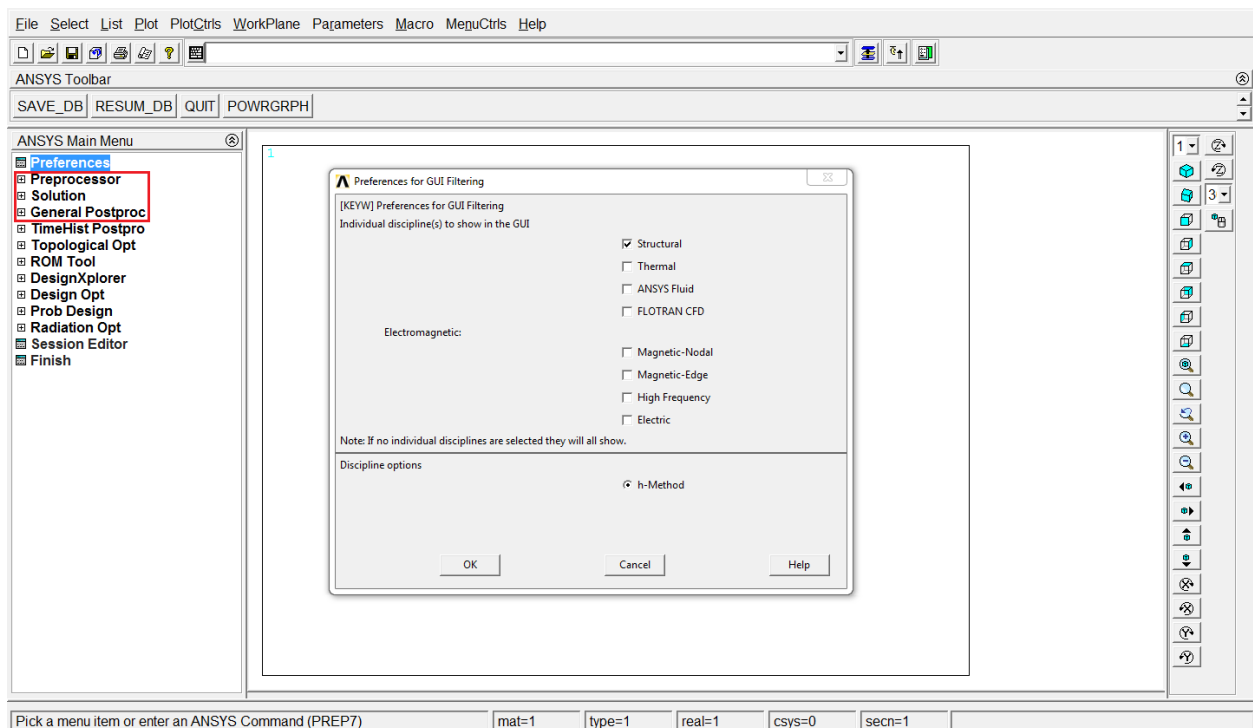


Figura A.II.1 - Ambiente de trabalho Mechanical APDL.

## A.II.2 Considerações iniciais

À partida, devem-se já ter definidas as unidades das características dos materiais, cargas aplicadas, coordenadas dos nós, etc. O programa, em si, não define unidades de medida, por isso é fundamental introduzir os valores dos vários parâmetros em unidades SI, para que haja coerência de valores.

Deve ser previamente escolhido o tipo de elementos a utilizar. Neste caso, a estrutura desenhada é composta apenas por elementos de barra (elementos de viga pelo método de Timoshenko - *beam188*) - e elementos de tirante (*link180*). Existem também outros elementos como casca, tubo, formas geométricas 3D, etc.

Deve-se considerar a posição do(s) nó(s) de referência, uma vez ser necessário definir os eixos locais dos elementos, através da criação de um plano formado pelo elemento e o nó de referência. Para o modelo do viaduto do Corgo, sendo desenhado apenas no plano global YZ, é utilizado apenas um nó de referência. Aconselha-se a utilizar um nó que fique afastado da estrutura, ainda que no mesmo plano, de forma a evitar que haja elementos coincidentes com o nó de referência, levando à ocorrência de erros, já que torna impossível a criação de um plano. A orientação dos elementos será explicada com detalhe mais à frente.

## A.II.3 Preprocessor (/prep7)

### A.II.3.1 Tipos de elementos e constantes reais

*Preprocessor – Element Type – Add/Edit/Delete*

*Preprocessor – Real Constants – Add/Edit/Delete*

Começa-se então pela definição dos tipos de barras a utilizar (Figura A.II.2 e Figura A.II.3). O viaduto foi modelado com elementos de viga, *beam188*, e elementos de tirante, *link180*. Ao contrário dos elementos *link180*, não é necessário atribuir constantes reais aos *beam188*. Uma vez que o programa assume os elementos de tirante com secção circular, nas constantes reais já serão definidas as suas áreas, bem como uma massa adicional opcional (Figura A.II.4 e Figura A.II.5). Aos elementos *beam188* serão posteriormente atribuídas secções.

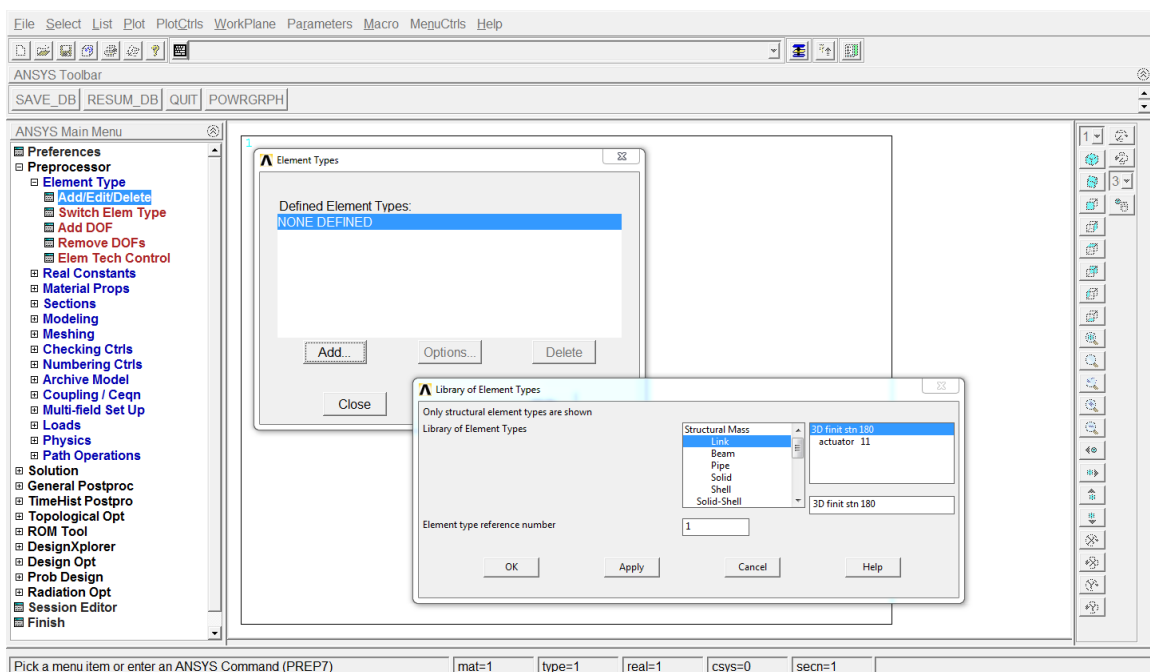


Figura A.II.2 - Definição dos tipos de elemento.

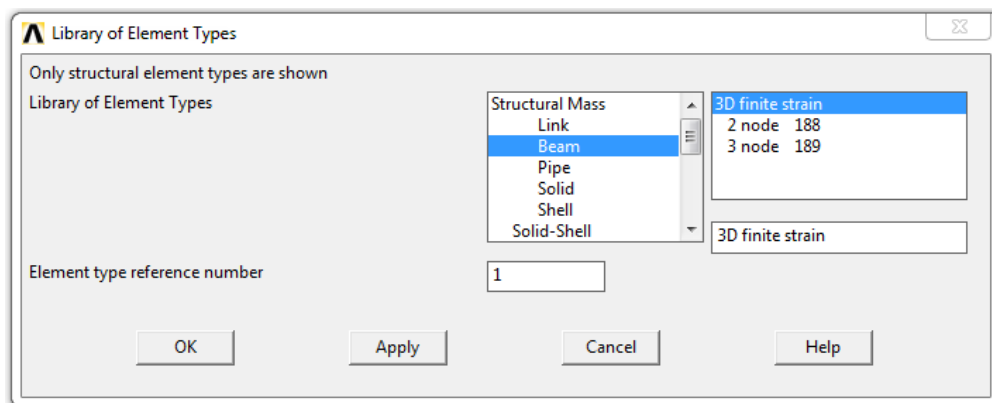
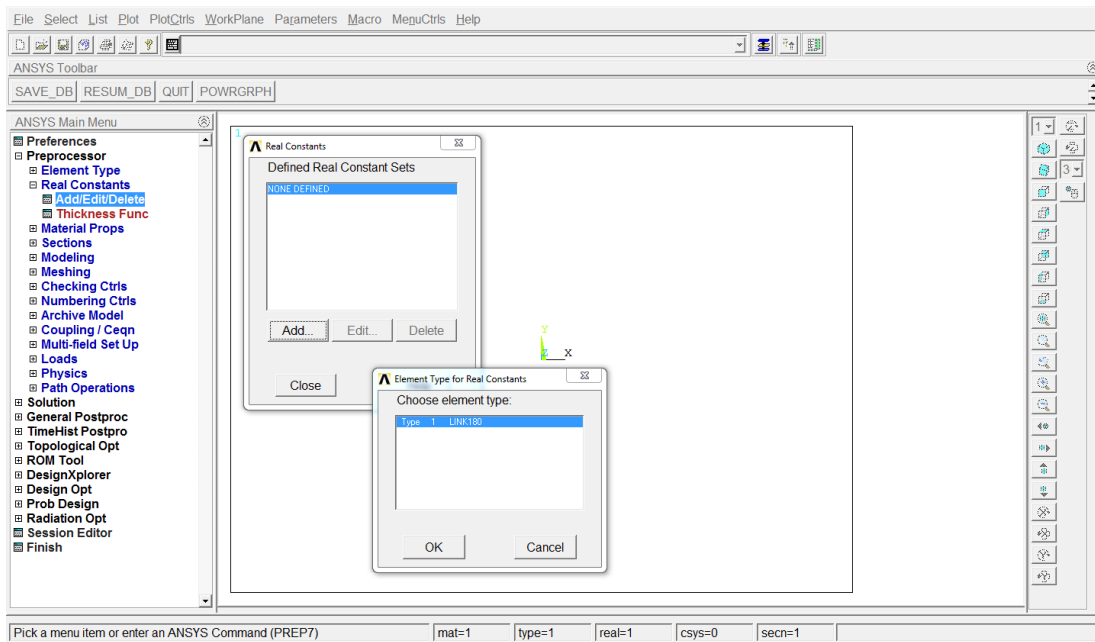
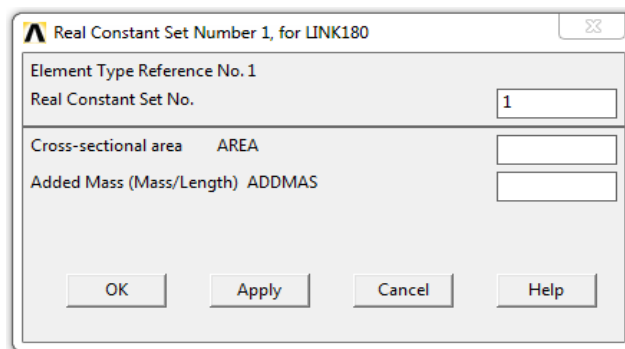


Figura A.II.3 - Biblioteca dos tipos de elementos.

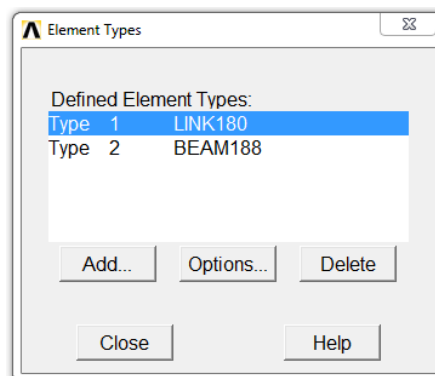


**Figura A.II.4** - Definição das constantes reais dos elementos link180.



**Figura A.II.5** - Parâmetros de uma constante real de um elemento link180.

No caso do viaduto, fica-se então com dois tipos de barra, *link180* e *beam188* (Figura A.II.6), e com vinte e duas constantes reais (Figura A.II.7), já que os semi-leques são todos iguais e compostos por vinte e dois tirantes.



**Figura A.II.6** - Tipos de elemento utilizados no viaduto.

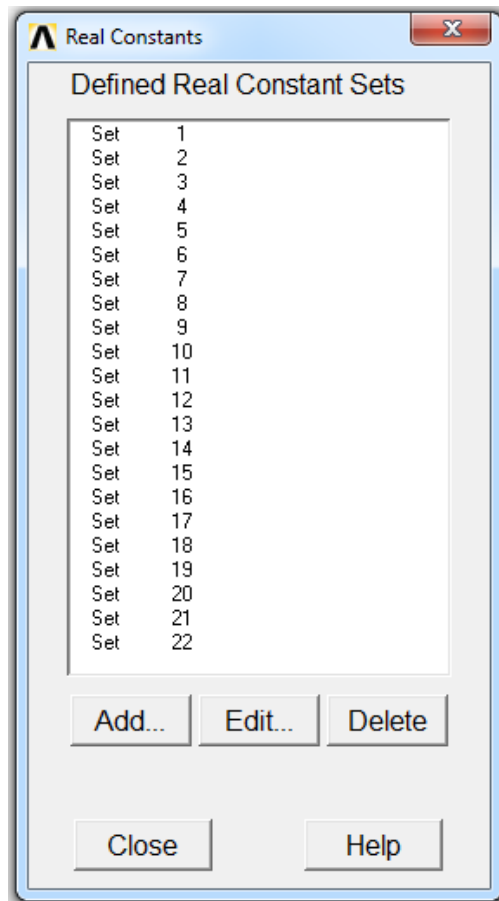


Figura A.II.7 - Constantes reais utilizadas no viaduto.

Todo este processo pode ser automatizado com os comandos *et* e *r* (Tabela A.II.1).

Tabela A.II.1 - Comandos para desenho dos elementos tipo e constantes reais.

Comando	Parâmetros	Descrição	Código exemplo	Comentários
et	nset	Numeração do tipo de elemento	/prep7 !Inicia funções no Preprocessor et,1,link180 r,1,área1 r,2,área2 ...	Exemplo de código para a criação de dois elementos diferentes, link180 e beam188, e as constantes reais respetivas ao elemento tipo 1
	tipo (link180 e beam188)	Tipo de elemento		
r	nset	Numeração da constante real	r,21,área21 r,22,área22	
	área	Área da constante real	et,2,beam188	
<b>et,nset,tipo</b> - cria um tipo de elemento <b>r,nset,área</b> - cria uma constante real				

### A.II.3.2 Materiais

#### Preprocessor – Material Props – Material Models

A definição das características dos materiais é simples mas para vários materiais torna-se mais fácil já ter uma rotina criada. Observa-se na Figura A.II.8a, o leque de opções dos modelos de materiais, em função do tipo de cálculo a efetuar. No viaduto foram utilizados cinco tipos de materiais diferentes (Figura A.II.8b).

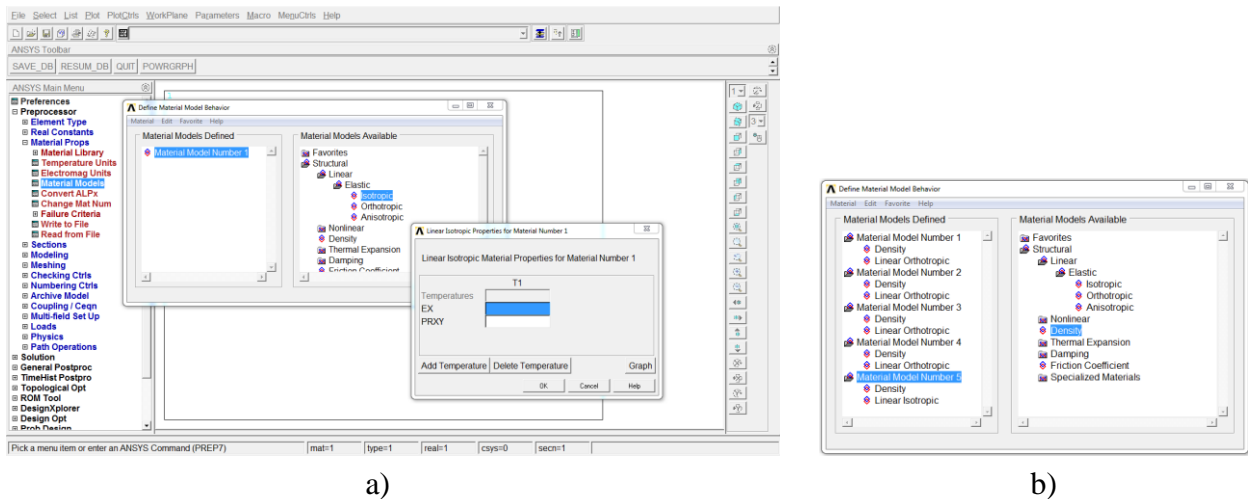


Figura A.II.8 - Criação de materiais: a) definição das suas características; b) tipos de materiais utilizados.

Todo este processo pode ser automatizado com o comando *mp* (Tabela A.II.2).

Tabela A.II.2 - Comando para criação dos tipos de materiais.

Comando	Parâmetros	Descrição	Código exemplo	Comentários
<b>mp</b>	<b>característica</b> (ex, prxy, dens, etc.)	Característica do material	!Material 1 mp,ex,1,3.5e7 !ex - Módulo de Elasticidade, kN/m <sup>2</sup> mp,prxy,1,0.2 !prxy - Coeficiente de Poisson mp,dens,1,2.54842 !dens - Massa Volúmica kg/m <sup>3</sup>	Exemplo de código para a criação de dois materiais e as suas características
	<b>nset</b>	Numeração do material	!Material 2 mp,ex,2,3.7e7 !Módulo de Elasticidade, kN/m <sup>2</sup> mp,prxy,2,0.2 !Coeficiente de Poisson mp,dens,2,3.185525 !Massa Volúmica kg/m <sup>3</sup>	
	<b>valor</b>	Valor da característica e material respetivos		
<b>mp,caracterista,nset,valor</b> - cria um material				

### A.II.3.3 Secções

#### Preprocessor – Sections – Beam – Common Sections

O ANSYS já oferece ao utilizador um grande número de secções, sendo apenas necessário definir os parâmetros correspondentes. Na Figura A.II.9, observa-se o exemplo de uma secção “User Section”, onde é necessário definir parâmetros como a área, inércias, módulo de torção, coordenadas do centróide, etc. No entanto há a possibilidade de escolher secções retangulares, circulares, em I, em U, tubulares ocas, etc., onde os parâmetros passam principalmente pelas dimensões da secção.

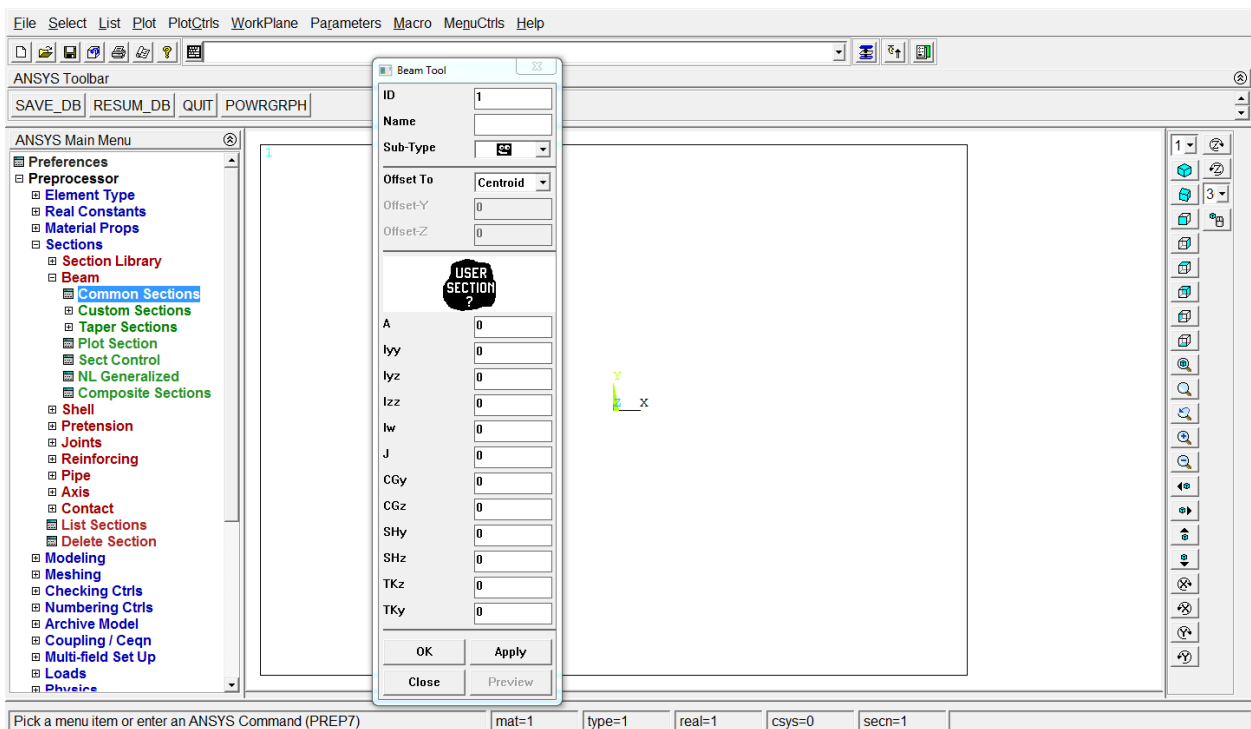


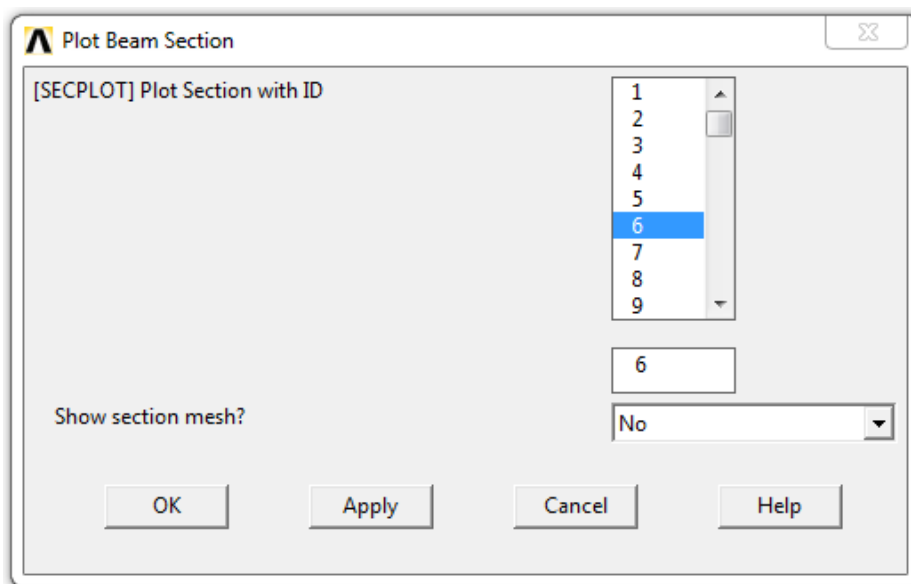
Figura A.II.9 - Criação de um tipo de secção definida pelo utilizador.

Este processo automatiza-se através dos comandos *sectype* e *secdata* (Tabela A.II.3).

**Tabela A.II.3** - Comandos para criação dos vários tipos de secção.

Comando	Parâmetros	Descrição	Código exemplo	Comentários
<b>sectype</b>	<b>nset</b>	Numeração da secção	<pre>! Secção 1 (Retangular com 2 metros por 3 metros, associada a um elemento BEAM) !Tipo de secção retangular (RECT) sectype,1,elementotipo,rect !Dados da secção secdata,2,3  ! Secção 2 (Definida apenas pelas suas características geométricas) !Tipo de secção definida pelo utilizador (ASEC) sectype,2,elementotipo,asec secdata,13.5,47,0.01,164,54,129,0,0,0,0</pre>	Exemplo de código para a criação de uma secção retangular (rect) e uma secção definida pelo utilizador (asec). O comando <i>secdata</i> vem sempre a seguir ao comando <i>sectype</i> e dá as informações relativas ao tipo de secção que se iniciou
	<b>elemt (beam)</b>	Tipo de elemento associado à secção		
	<b>sect (rect,asec)</b>	Tipo de secção		
<b>secdata</b> (do tipo - rect)	<b>b</b>	Numeração dos tipos de secção		
	<b>h</b>	Cria uma constante real		
<b>secdata</b> (do tipo - asec)	Cria uma secção com características geométricas introduzidas manualmente pelo utilizador			
<b>sectype,nset,elemt,sect</b> - cria um tipo de secção <b>secdata,b,h</b> ou <b>secdata,área,Iyy,Iyz,Izz,Iw,J,CGy,CGz,TKz,TKy</b> - define as características da secção				

No viaduto foram utilizadas 61 secções diferentes (Figura A.II.10), com secções do tipo *rect* e *asec*. Não foram criadas secções circulares para os tirantes porque, tal como foi explicado anteriormente, o programa assume os elementos do tipo *link180* como circulares, necessitando apenas de lhes ser associada uma constante real que já indica o valor da sua área.



**Figura A.II.10** - Lista das secções utilizadas no viaduto (61 no total).

### A.II.3.4 Nós

#### Preprocessor – Modeling – Create – Nodes – In Active CS

Para criar nós, é apenas necessário atribuir-lhes o número de contagem (*nset*) e as suas coordenadas (Figura A.II.11). Mas em estruturas com muitos nós, a melhor opção é criar uma rotina que os desenhe a todos automaticamente, sem que seja necessário introduzir manualmente centenas, ou às vezes milhares de coordenadas.

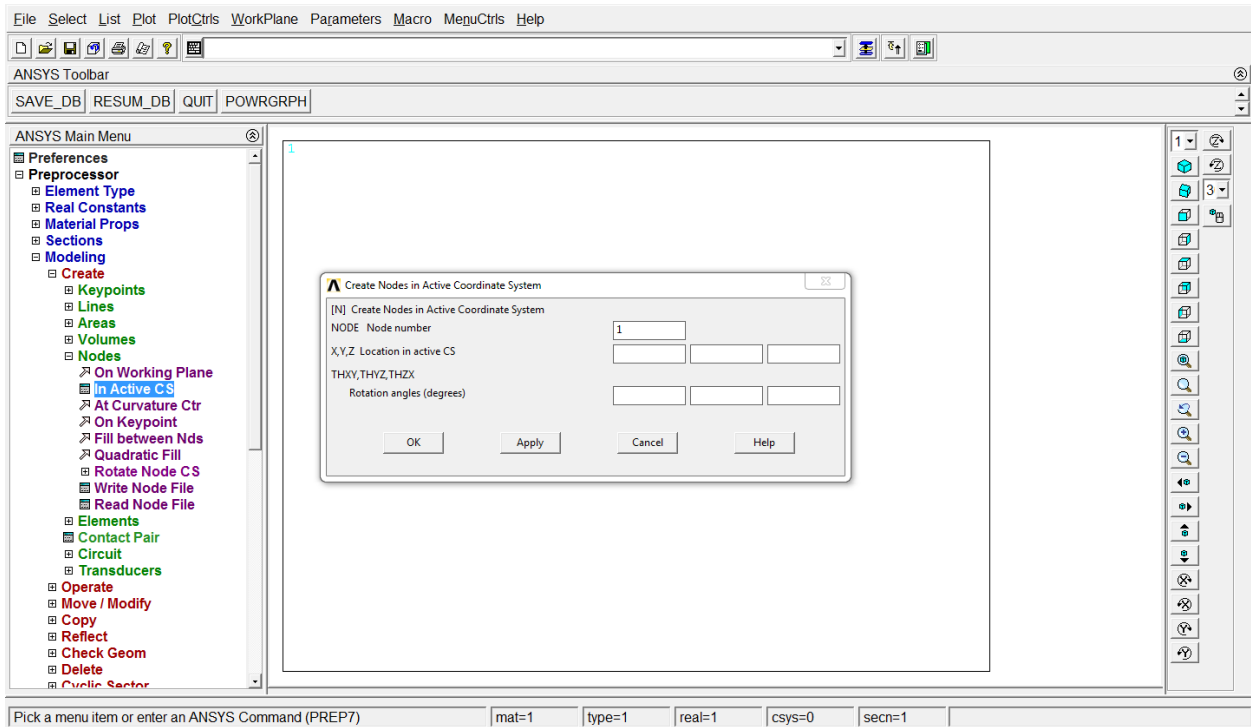


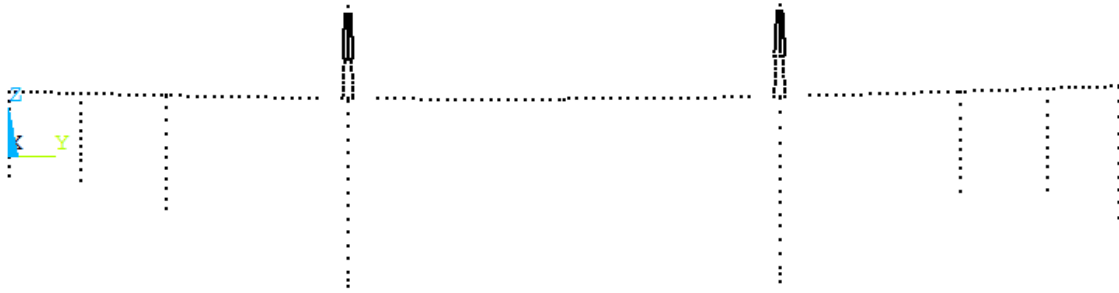
Figura A.II.11 - Criação de nós.

Este processo automatiza-se através do comando *n* (Tabela A.II.4).

Tabela A.II.4 - Comandos para criação dos nós.

Comando	Parâmetros	Descrição	Código exemplo	Comentários
<b>n</b>	<b>nset</b>	Numeração da coordenada	<pre>!Definição de nós no plano YZ n, 1, 0, 0, 0 n, 2, 0, 3.64E-11, 4.50748 n, 3, 0, 8.00E-11, 9.01496 n, 4, 0, 1.24E-10, 13.5224 ... n, 401, 0, 109.584, -36.37 n, 402, 0, 235.532, -90.0659 n, 403, 0, 535.5, -87.0644 ! Nó de referência para os planos locais x'z' dos elementos. O eixo local y' será perpendicular a esse plano. n, 404, 0, 800, 250</pre>	Exemplo de código para a criação de 404 nós
	<b>x</b>	Coordenada em X		
	<b>y</b>	Coordenada em Y		
	<b>z</b>	Coordenada em Z		
<b>n,nset,x,y,z</b> - cria um nó no espaço				

Na Figura A.II.12, é de destacar o nó 404, no canto superior direito, pois será o nó de referência para a definição dos eixos locais dos elementos beam188.

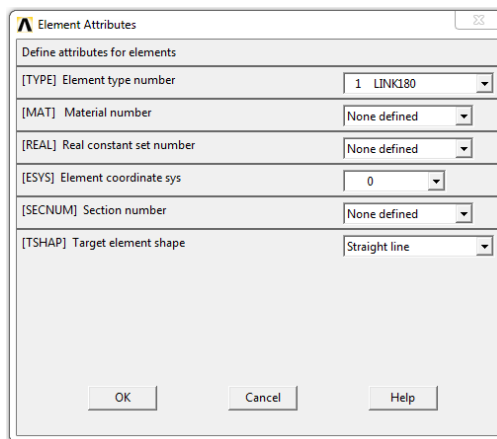


**Figura A.II.12** - Nós do viaduto.

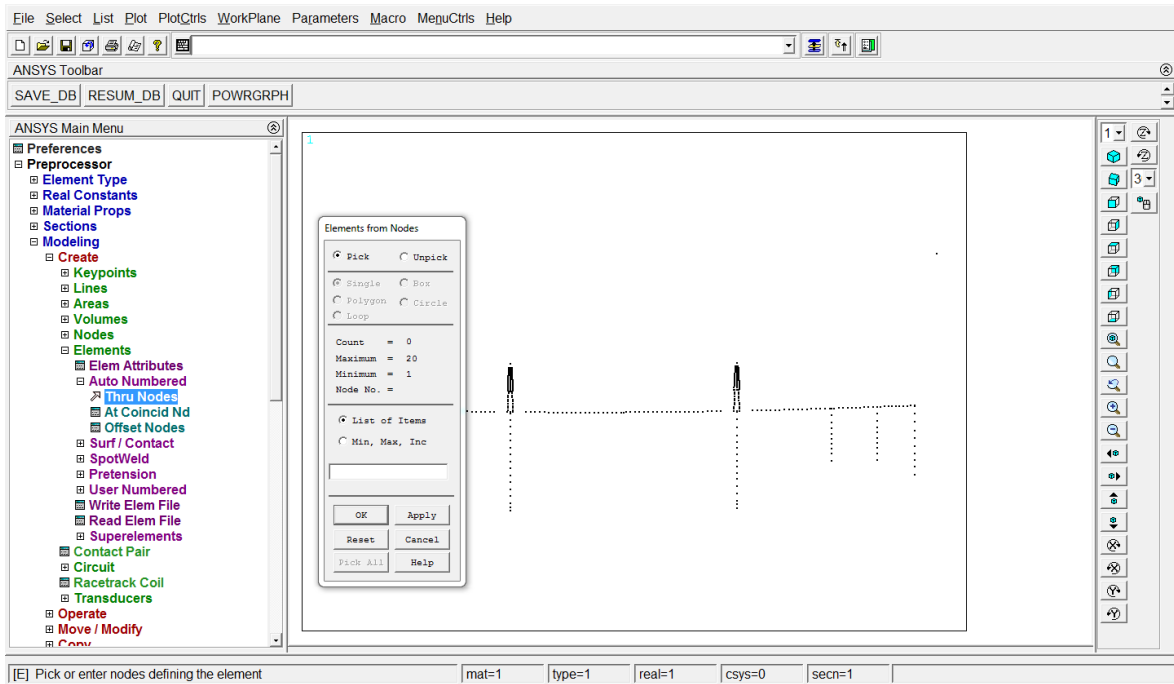
### A.II.3.5 Elementos e atribuição de características

#### *Preprocessor – Modeling – Create – Elements – Thru Nodes*

A todos os elementos que vão ser criados é necessário, antes, atribuir-lhes algumas características: material (*mat*), tipo de elemento (*type*), constante real (*real*) e secção (*secn*) (Figura A.II.13). É possível desenhar elementos de várias formas, sendo uma delas a forma manual, através de nós já desenhados (Figura A.II.14). Mas, tal como para desenhar nós, é muito trabalhoso desenhar os elementos manualmente. É então aconselhado utilizar a rotina de comandos para desenho dos elementos eficientemente.

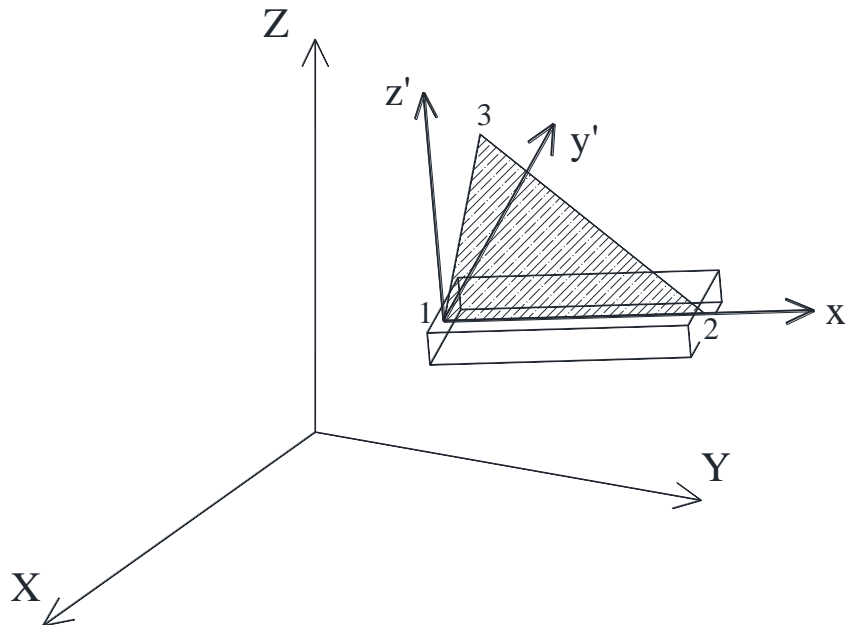


**Figura A.II.13** - Características do elemento que se vai criar.



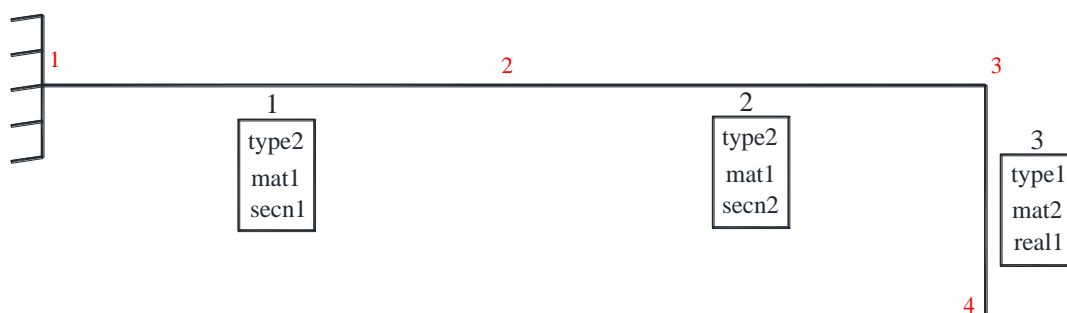
**Figura A.II.14** - Criação de elementos através de nós já desenhados.

Para desenhar elementos utilizando a linha de comandos, é fundamental criar um nó de referência, pois para cada elemento é preciso definir os seus eixos locais. Como se pode ver pela Figura A.II.15, o plano local  $x'z'$  do elemento é formado pelo plano onde o mesmo está contido (nó 1 a nó 2) e o nó de referência (nó 3). Quer isto dizer que o eixo local  $y'$  será perpendicular ao plano formado pelo elemento e o nó de referência.



**Figura A.II.15** - Esquema de orientação dos elementos.

Tal como foi possível ver na Figura A.II.12, o nó 404 foi também criado no plano global YZ. Sendo esse o plano em que o viaduto está desenhado, todos os elementos terão o seu eixo local y' na direção do eixo global X. Desta forma, será facilitada a orientação das secções das peças. Para criar uma rotina que desenhe todos os elementos automaticamente, ativa-se antes as características do elemento que vai desenhar. Para efeitos de simplificação, o bloco de código seguinte pretende desenhar uma consola com um cabo preso na extremidade (Figura A.II.16), tomando atenção às características de cada elemento. Os elementos 1 e 2 são do tipo 2 e material 1, mas com secções diferentes. O elemento 3 é do tipo 1, material 2 e constante real 1.



**Figura A.II.16** - Consola exemplo.

Ao escrever-se “type,2” está-se a dizer que todos os elementos que vão ser criados de seguida serão desse tipo, até ordem para mudar de tipo. O mesmo acontece para o tipo de material, de secção e de constante real. No código seguinte, é possível perceber que os elementos 1 e 2 são do tipo 2, mas o elemento 3 já será do tipo 1.

Este processo automatiza-se através do comando *en* (Tabela A.II.5).

**Tabela A.II.5** - Comando para criação dos elementos.

Comando	Parâmetros	Descrição	Código exemplo	Comentários
<b>en</b>	<b>nset</b>	Numeração da coordenada	type,2 mat,1 secn,1	Exemplo de código para desenho dos três elementos da consola, criando um elemento através de dois nós e orientado (eixos locais) por um nó de referência
	<b>nóini</b>	Nó inicial do elemento	en,1,1,2,5 !Elemento 1 (type 2; mat 1; secn 1) secn,2	
	<b>nófin</b>	Nó final do elemento	en,2,2,3,5 !Elemento 2 (type 2; mat 1; secn 2) type,1 mat,2 real,1	
	<b>nóref</b>	Nó de referência do elemento	en,3,3,4,5 !Elemento 3 (type 1; mat 2; real 1; não assume secn 2 pois é um element link180, guardando essa informação na constante real)	
<b>en,nset,nóini,nófin,nóref</b> - cria um elemento com 2 nós, em função de um nó de referência				

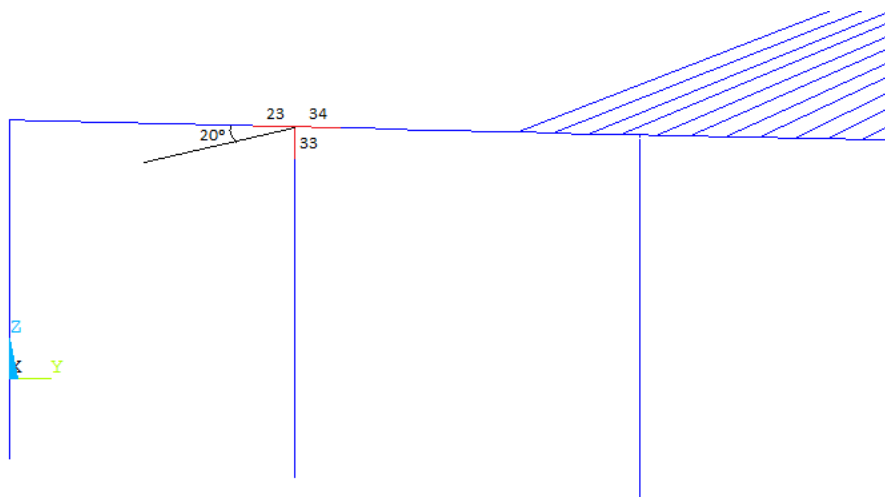
### A.II.3.6 Libertações internas

Por vezes, para modelar com rigor uma estrutura, é necessário introduzir apoios que libertem restrições de movimento em determinada direção. Chamam-se a essas libertações - libertações internas. No caso do viaduto, no topo de alguns pilares, foi necessário simular rótulas cilíndricas que libertam o movimento de translação na direção do eixo global Y e o movimento de rotação no eixo global X (Figura A.II.17). Mais uma vez se aconselha a utilização da linha de comandos, facilitando a introdução destas informações.

Este processo automatiza-se através do comando *endrelease* (Tabela A.II.6).

**Tabela A.II.6** - Comando para provocar libertações internas entre elementos escolhidos.

Comando	Parâmetros	Descrição	Código exemplo	Comentários
<b>endrelease</b>		Cria libertações internas no nó de interseção de elementos. O grau serve para indicar a partir de que ângulo, entre elementos, o comando irá funcionar ou seja, se os elementos fizerem um ângulo inferior ao valor do grau, o comando não atua. É útil para interseções com mais de dois elementos e funciona para no máximo quatro libertações internas. Entre os elementos da mesma intersecção selecionados, não irá haver restrição de movimento nos graus de liberdade escolhidos. Muito importante: este comando toma como referência o elemento com a numeração mais baixa, sendo que o grau começa a contar a partir dele.		Exemplo de código para libertação interna num nó de 3 elementos do viaduto
	<b>grau</b>		mat,2 secn,1	
	<b>GL1</b>		en,23,41,42,404	
	<b>GL2</b>		mat,1 secn,4	
	<b>GL3</b>		en,33,42,137,404	
	<b>GL4</b>		endrelease,,20,UY,ROTX	
<b>endrelease, ,grau,GL1,GL2,GL3,GL4</b> - cria libertações internas, ao nível de um nó, entre elementos				



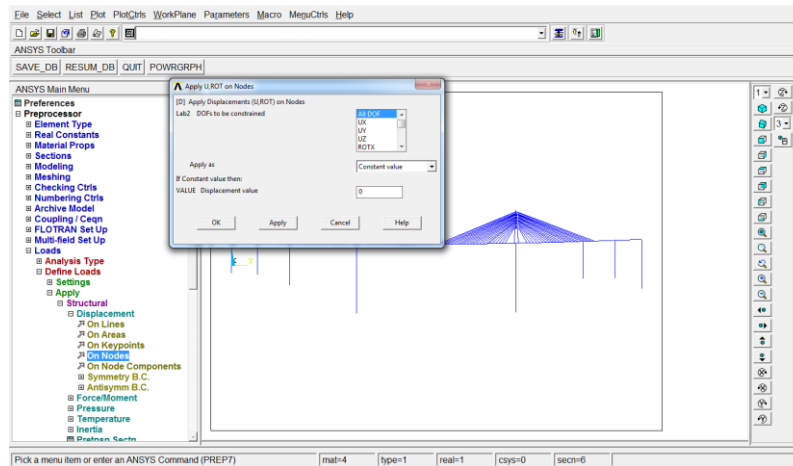
**Figura A.II.17** - Libertações internas entre elementos de um nó.

Desta forma, apenas o elemento 33 é libertado do elemento 23, nos graus de liberdade escolhidos. Como o elemento 34 não é incluído no *endrelease*, manter-se-á a ligação ao elemento 23. Assim o tabuleiro poderá deslizar ao longo de Y, em cima do pilar.

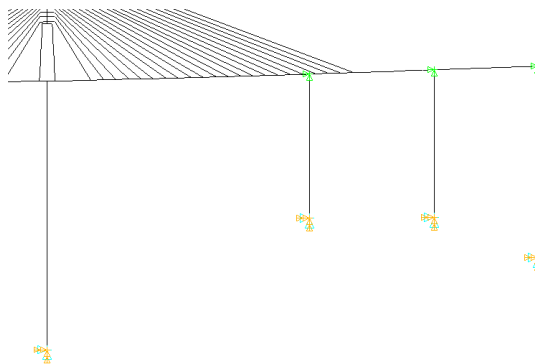
### A.II.3.7 Condições de fronteira

*Preprocessor – Loads – Define Loads – Apply – Structural – Displacement – On Nodes*

Para se definir condições de fronteira num nó, impõe-se um certo deslocamento aos graus de liberdade a restringir (Figura A.II.18). Para simular apoios encastrados na base dos pilares, seleccionam-se os nós e impõe-se deslocamento nulo nos seis graus de liberdade (Figura A.II.19).



**Figura A.II.18** - Simulação de um apoio encastrado. Restrição em todos os graus de liberdade (DOF).



**Figura A.II.19** - Encastramento na base dos pilares.

Este processo automatiza-se através do comando *d* (Tabela A.II.7).

**Tabela A.II.7** - Comando para a criação das condições de fronteira (apoios encastrados).

Comando	Parâmetros	Descrição	Código exemplo	Comentários
d	nó	Escolha do nó	!Apoio encastrado - nó 400 d,400,ux,0 d,400,uy,0 d,400,uz,0 d,400,rotx,0 d,400,roty,0 d,400,rotz,0	Exemplo de código para introdução de um apoio encastrado no nó 400 (deslocamentos nulos)
	GL	Restringe o grau de liberdade do nó escolhido ao deslocamento imposto		
	deslocamento	Deslocamento imposto		
<b>d,nó,Gl,deslocamento</b> - restringe um dado deslocamento num GL de um nó				

### A.II.3.8 Cargas concentradas

*Preprocessor – Loads – Define Loads – Apply – Structural – Force/Moment – On Nodes*

*Preprocessor – Loads – Define Loads – Apply – Structural – Pressure – On Elements*

*Preprocessor – Loads – Define Loads – Apply – Structural – Pressure – On Areas*

É da mesma forma que se impõe um deslocamento a um nó, que se aplicam forças ou momentos concentrados (Figura A.II.20). Para aplicar cargas distribuídas selecionam-se elementos, para aplicar pressões selecionam-se áreas.

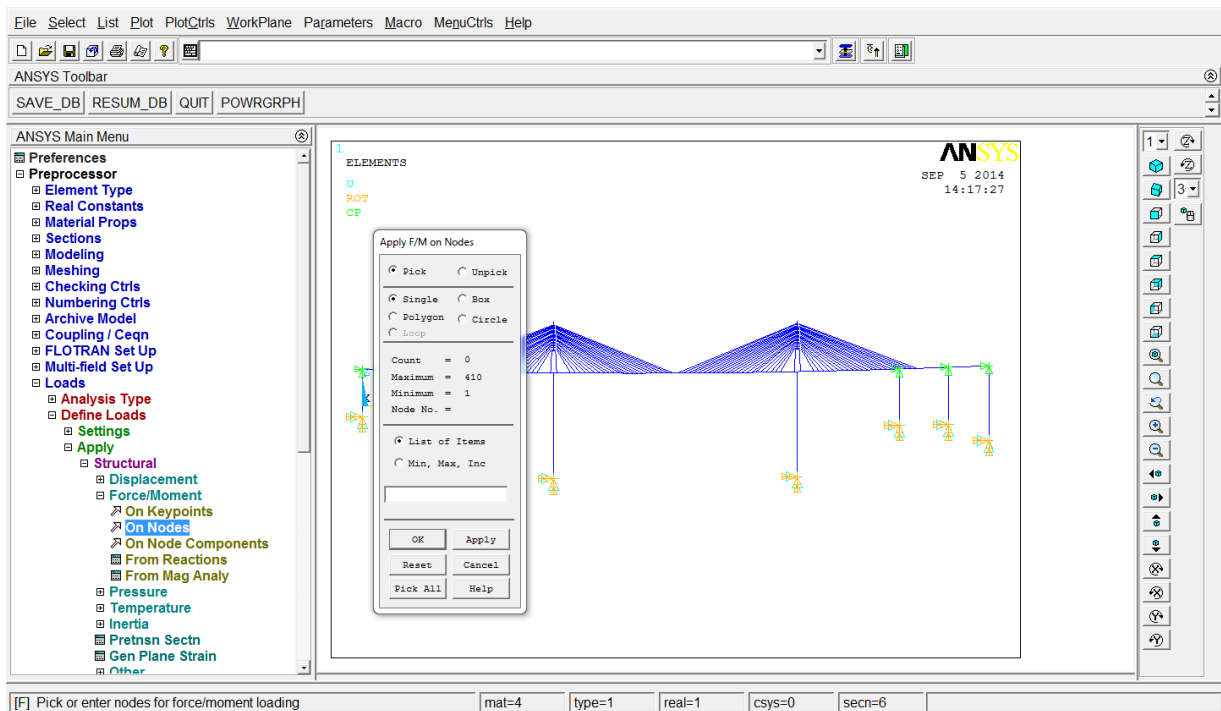


Figura A.II.20 - Definição de cargas ou momentos concentrados.

Este processo automatiza-se através do comando *f* (Tabela A.II.8).

Tabela A.II.8 - Comando para definição de cargas concentradas.

Comando	Parâmetros	Descrição	Código exemplo	Comentários
<b>f</b>	<b>nó</b>	Escolha do nó	f,200,fx,20 f,300,fy,-30 f,397,fz,-10	Exemplo de código para criar forças concentradas, em direções diferentes, nos nós: 200, 300 e 397.
	<b>GL</b>	Aplica ao grau de liberdade, GL, o valor da força imposta		
	<b>valor</b>	Valor da força imposta		
<b>f,nó,GL,valor</b> - aplica uma força/momento nodal				

## A.II.4 Solution (/sol)

### A.II.4.1 Tipos de análise

#### *Solution – Analysis Type – New Analysis*

Depois de definido o modelo, deve-se definir o tipo de análise que se pretende fazer (Figura A.II.21). Depois de escolhida a análise, deve-se definir as opções a tomar (Figura A.II.22 e Figura A.II.23).

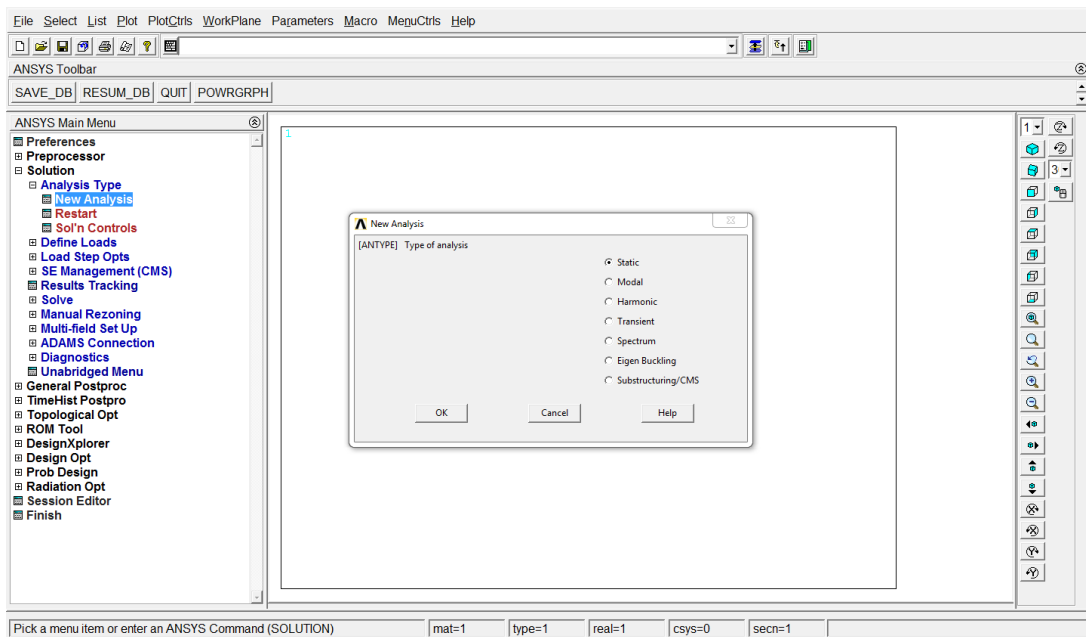


Figura A.II.21 - Definição dos tipos de análise.

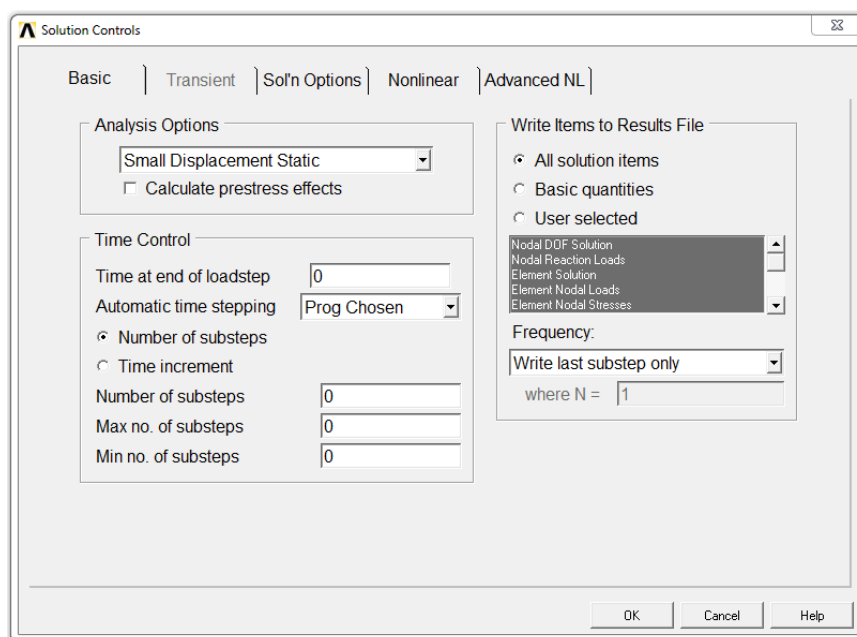


Figura A.II.22 - Definição dos parâmetros da análise estática.

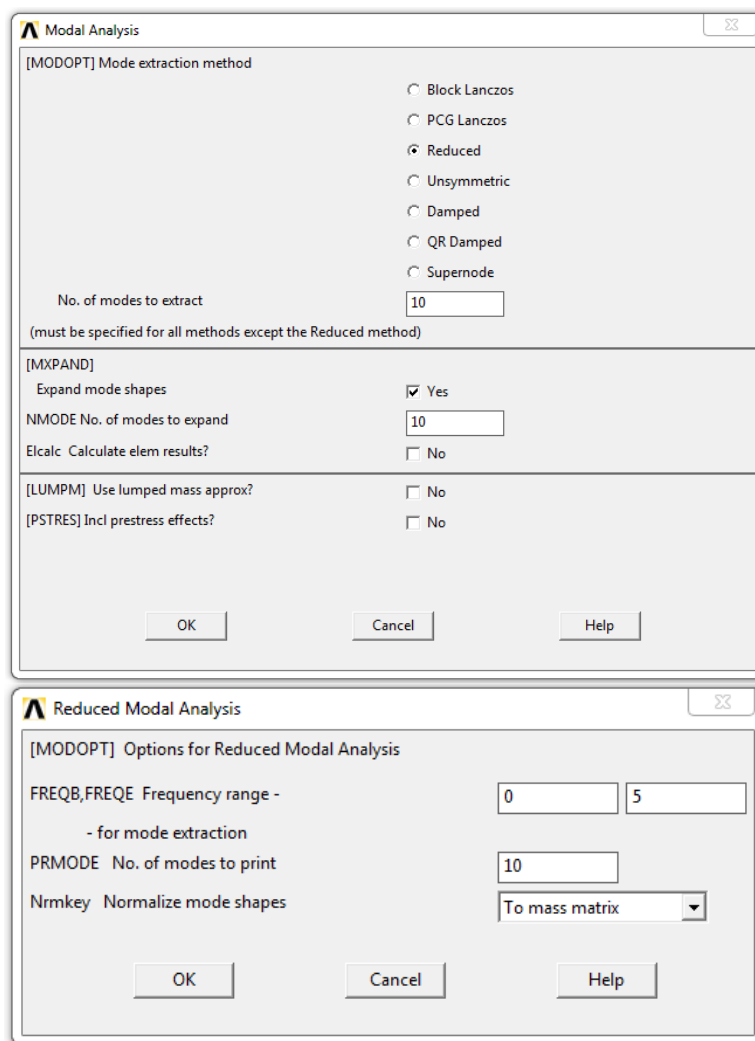


Figura A.II.23 - Definição dos parâmetros da análise dinâmica.

Este processo automatiza-se através do comando *antype*, *modopt*, *total* e *solve* (Tabela A.II.9).

Tabela A.II.9 - Comandos para definição do tipo de análise.

Comando	Parâmetros	Descrição	Código exemplo	Comentários
<b>antype</b>	<b>n</b> (1-estática; 2-modal)	Escolhe o tipo de análise	<pre> /sol !Inicia funções no Solution !Análise modal antype,2 ! Modo reduzido com 10 modos modopt,redc,10 !Número de graus de liberdade master total,100,0 /status,solu solve </pre>	Exemplo de código para uma análise modal e definição de algumas opções
<b>modopt</b>	<b>redc</b>	Tipo de análise modal - reduzida		
	<b>nmod</b>	Número de modos a considerar		
<b>total</b>	<b>nGL</b>	Número de GL master		
<b>solve</b>	<b>GL</b>			
<p><b>antype,n</b> - seleciona o tipo de análise</p> <p><b>modopt,redc,nmod</b> - comando para fazer análise modal reduzida</p> <p><b>total,nGL</b> - número de GL master (obrigatório selecionar para efetuar o cálculo)</p> <p><b>solve</b> - comando que faz a análise, após definição de todas as características</p>				

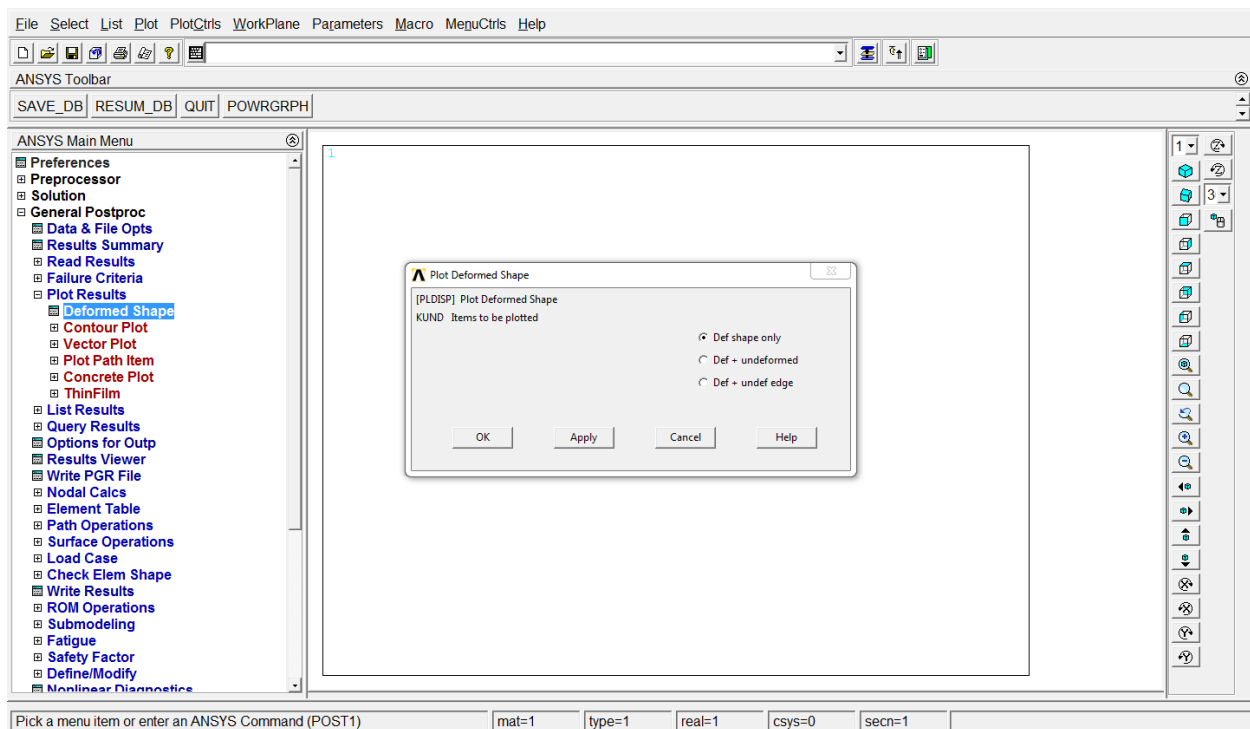
## A.II.5 Postproc (/post1)

### A.II.5.1 Desenho (plotagem)

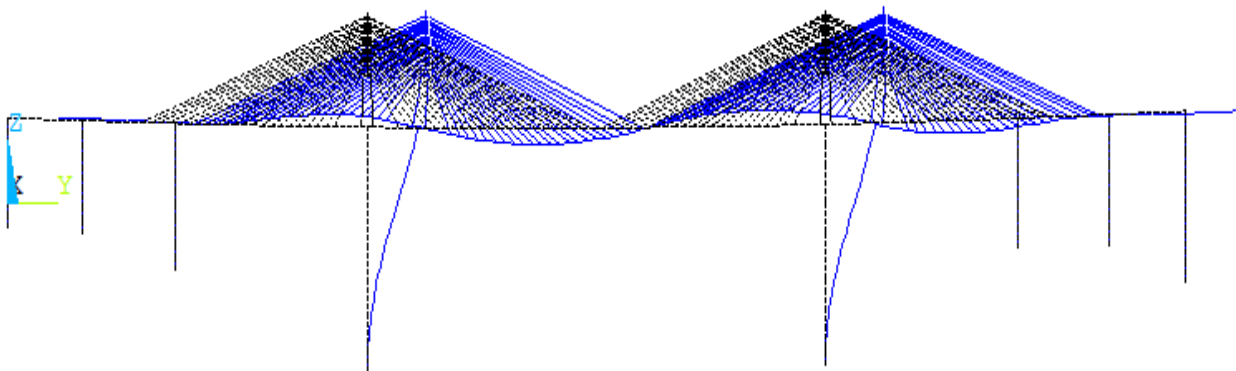
*Postproc – Plot Results – Deformed Shape*

*Postproc – Read Results – Next Set*

Depois do cálculo feito, a solução pode visualizada através do “*Plot Results*” (Figura A.II.24 e Figura A.II.25). No caso da análise modal, para se visualizar os vários modos é necessário ir a “*Read Results*”, clicar em “*Next Set*” e depois voltar a plotar o desenho da estrutura.



**Figura A.II.24** - Tipos de desenho da solução.



**Figura A.II.25** - Primeiro modo de vibração do viaduto: deformada (azul) e indeformada (preto).





<b>ANEXO I</b> .....	<b>I-3</b>
<b>A.I.1</b> Folha “Nós” .....	<b>I-4</b>
<b>A.I.2</b> Folha “Elementos” .....	<b>I-5</b>
<b>A.I.3</b> Folha “Materiais” .....	<b>I-6</b>
<b>A.I.4</b> Folha “Secções” .....	<b>I-7</b>
<b>ANEXO II</b> .....	<b>II-9</b>
<b>A.II.1</b> Introdução .....	<b>II-10</b>
<b>A.II.2</b> Considerações iniciais .....	<b>II-11</b>
<b>A.II.3</b> Preprocessor (/prep7) .....	<b>II-12</b>
A.II.3.1 Tipos de elementos e constantes reais .....	II-12
A.II.3.2 Materiais.....	II-15
A.II.3.3 Secções.....	II-16
A.II.3.4 Nós .....	II-18
A.II.3.5 Elementos e atribuição de características .....	II-19
A.II.3.6 Libertações internas.....	II-22
A.II.3.7 Condições de fronteira .....	II-23
A.II.3.8 Cargas concentradas.....	II-24
<b>A.II.4</b> Solution (/sol).....	<b>II-25</b>
A.II.4.1 Tipos de análise.....	II-25
<b>A.II.5</b> Postproc (/post1).....	<b>II-27</b>
A.II.5.1 Desenho (plotagem) .....	II-27

## Anexo I

- Figura A.I.1** - Preenchimento da folha NÓS [ficheiro input da malha de EF de barra 3D], correspondente às características dos nós da estrutura – coordenadas estruturais, condições de apoio e cargas concentradas. .... I-4
- Figura A.I.2** - Preenchimento da folha ELEMENTOS [ficheiro input da malha de EF de barra 3D], correspondente às características dos elementos da estrutura – incidências, tipo de material, libertações internas da matriz de rigidez elementar, áreas, inércias e cargas. .... I-5
- Figura A.I.3** - Preenchimento da folha MATERIAIS [ficheiro input da malha de EF de barra 3D], correspondente às características dos materiais da estrutura – módulo de elasticidade, módulo de torção e peso específico. .... I-6
- Figura A.I.4** - Preenchimento da folha SECÇÕES [ficheiro input da malha de EF de barra 3D], correspondente às características das secções associadas ao respetivo nó da estrutura. .... I-7

## Anexo II

- Figura A.II.1** - Ambiente de trabalho Mechanical APDL. .... II-10
- Figura A.II.2** - Definição dos tipos de elemento. .... II-12
- Figura A.II.3** - Biblioteca dos tipos de elementos. .... II-12
- Figura A.II.4** - Definição das constantes reais dos elementos link180. .... II-13
- Figura A.II.5** - Parâmetros de uma constante real de um elemento link180. .... II-13
- Figura A.II.6** - Tipos de elemento utilizados no viaduto. .... II-13
- Figura A.II.7** - Constantes reais utilizadas no viaduto. .... II-14
- Figura A.II.8** - Criação de materiais: a) definição das suas características; b) tipos de materiais utilizados. .... II-15
- Figura A.II.9** - Criação de um tipo de secção definida pelo utilizador. .... II-16
- Figura A.II.10** - Lista das secções utilizadas no viaduto (61 no total). .... II-17
- Figura A.II.11** - Criação de nós. .... II-18
- Figura A.II.12** - Nós do viaduto. .... II-19
- Figura A.II.13** - Características do elemento que se vai criar. .... II-19
- Figura A.II.14** - Criação de elementos através de nós já desenhados. .... II-20
- Figura A.II.15** - Esquema de orientação dos elementos. .... II-20
- Figura A.II.16** - Consola exemplo. .... II-21
- Figura A.II.17** - Libertações internas entre elementos de um nó. .... II-22
- Figura A.II.18** - Simulação de um apoio encastrado. Restrição em todos os graus de liberdade (DOF). .... II-23
- Figura A.II.19** - Encastramento na base dos pilares. .... II-23
- Figura A.II.20** - Definição de cargas ou momentos concentrados. .... II-24
- Figura A.II.21** - Definição dos tipos de análise. .... II-25
- Figura A.II.22** - Definição dos parâmetros da análise estática. .... II-25
- Figura A.II.23** - Definição dos parâmetros da análise dinâmica. .... II-26
- Figura A.II.24** - Tipos de desenho da solução. .... II-27
- Figura A.II.25** - Primeiro modo de vibração do viaduto: deformada (azul) e indeformada (preto). .... II-27

# Índice de tabelas

## Capítulo 3

<b>Tabela 3.1</b> - Regime livre sem amortecimento.....	23
<b>Tabela 3.2</b> - Regime livre com amortecimento.....	23
<b>Tabela 3.3</b> - Regime forçado com amortecimento.....	24
<b>Tabela 3.4</b> - Aproximação de sinais através de sobreposição de ondas harmónicas.....	45

## Anexo II

<b>Tabela A.II.1</b> - Comandos para desenho dos elementos tipo e constantes reais. ....	II-14
<b>Tabela A.II.2</b> - Comando para criação dos tipos de materiais. ....	II-15
<b>Tabela A.II.3</b> - Comandos para criação dos vários tipos de secção. ....	II-17
<b>Tabela A.II.4</b> - Comandos para criação dos nós. ....	II-18
<b>Tabela A.II.5</b> - Comando para criação dos elementos. ....	II-21
<b>Tabela A.II.6</b> - Comando para provocar libertações internas entre elementos escolhidos. ....	II-22
<b>Tabela A.II.7</b> - Comando para a criação das condições de fronteira (apoios encastrados). ....	II-23
<b>Tabela A.II.8</b> - Comando para definição de cargas concentradas. ....	II-24
<b>Tabela A.II.9</b> - Comandos para definição do tipo de análise. ....	II-26