

Manual do Usuário do Programa xFram

Edgard S. Almeida Neto
Escola Politécnica da USP

Versão 6.4

21 de Setembro de 2018

Conteúdo

1	Manual do Usuário	2
1.1	Introdução	2
1.2	Parâmetros da Análise (:PARM)	2
1.3	Aceleração da Gravidade (:GRAV)	3
1.4	Pós-Processamento (:PLOT)	3
1.5	Envoltória de Esforços Solicitantes (:ENVL)	4
1.6	Nós (:NODE)	4
1.6.1	Coordenadas	4
1.6.2	Vinculação dos Graus de Liberdade	5
1.6.3	Deslocamentos Impostos	5
1.6.4	Constantes de Mola	6
1.6.5	Esforços Nodais	6
1.6.6	Equações de Restrição	7
1.7	Materiais (:MATE)	9
1.7.1	Conversão de Unidades	10
1.7.2	Exemplos	11
1.8	Planos Principais (:XZPL)	11
1.9	Seções Transversais (:SECT)	12
1.9.1	Seções Prismáticas	12
1.9.2	Seções de Barras Especiais	16
1.10	Atributos Gerais (:ATTR)	18
1.11	Liberção dos Graus de Liberdade Locais (:RLSE)	20
1.12	Elementos de Barra (:BARR)	21
1.12.1	Parâmetros	21
1.12.2	Barra de Treliça	21
1.12.3	Barras de Pórtico	22
1.13	Elementos Finitos Sólidos (:BODY)	25
1.13.1	Resultados	27
1.14	Forças Distribuídas no Contorno (:DSTR)	30

Capítulo 1

Manual do Usuário

1.1 Introdução

1.2 Parâmetros da Análise (:PARM)

O bloco de parâmetros descreve o tipo de análise e prepara o programa para a leitura dos dados da estrutura. A primeira linha de parâmetros é obrigatória enquanto a segunda depende do tipo de análise.

O título, com até 80 caracteres, identifica o problema nos arquivos de saída (listagens impressas, traçados gráficos etc.). Todas as grandezas e coeficientes presentes no arquivo de dados devem ser consistentes com as quatro unidades das grandezas básicas de força, comprimento, tempo e temperatura. Em implementações futuras, as unidades serão empregadas para gerar as unidades dos resultados do programa.

```
:PARM. % Analysis parameters
% strAnlsType strMedmType Version fPrnt fReac
      LnrStat   Fram_2D_      61     0     1
%      nLoads
      1
% Title
Hshp2Dc
%
% Units ([F]/[L]/[T]/[Temp]): {4}
kN cm s C
%
```

strAnlsType	tipo de análise:
ChckAnls	check input data (ni);
LnrStat	análise estática linear;
LnrDym	análise dinâmica linear (ni);
PseuStat	análise não-linear pseudo-estática (ni).
strMedmType	descrição do contínuo
AxisSymm	modelo axissimétrico;
PlanStrs	estado plano de tensão;
PlanStrn	estado plano de deformação;
Fram_2D_	pórtico bidimensional;
Fram_3D_	pórtico tridimensional.

Version	versão do programa; arquivos de dados da versão v4.2 e posteriores ainda são lidos pelo programa.
fPrnt	<i>flag</i> de impressão para depuração: 0 não imprime; 1 imprime.
fReac	<i>flag</i> de cálculo das reações: (implementação parcial) 0 não calcula; 1 calcula e imprime.

Parâmetros Específicos para cada Tipo de Análise Os seguintes parâmetros devem ser fornecidos dependendo do tipo de análise:

LinrStat A análise estática linear admite múltiplos carregamentos e o traçado da envoltória dos diagramas de momentos fletores a partir de coeficiente fornecidos pelo usuário para cada carregamento.

nLoads número de casos de carregamento.

1.3 Aceleração da Gravidade (:GRAV)

```
:GRAV. % [optional] Gravitational acceleration
% iLoad   g1   g2   g3
      1   0.0  0.0 -9.8
      0
```

A aceleração da gravidade ($[L]/[T]^2$) é fornecida na forma vetorial e é considerada apenas nos grupos de elementos com o indicador `fDensLoad` ativado. As forças gravitacionais levam em conta a densidade do material e o volume calculado dos elementos. A tabela de entrada de dados deve terminar com uma linha com `iLoad = 0`.

`iLoad` número do carregamento em que serão consideradas as forças gravitacionais;
 g_i componentes da aceleração da gravidade ($i = 1, \dots, n_{sd}$).

1.4 Pós-Processamento (:PLOT)

```
:PLOT. % [optional] Plot parameters
% Type (PS PostScript, GiD, None)
PS
```

O bloco de pós-processamento é opcional e define apenas o software usado para lidar com os resultados da análise.

Momentos fletores são traçados do lado tracionado das barras. Visando identificar os lados inferior e superior das barras, as tensões extremas σ' e σ'' são traçadas no lado em que atuam se forem de tração e no lado oposto se forem de compressão.

None Nenhum arquivo para plotagem de resultados é gerado.

PS O programa gera arquivos em formato eps (encapsulated post-script) que podem ser lidos no programa `gsview`. Por sua vez, o `gsview` permite a conversão do arquivo para o formato pdf, que pode ser lido pelo programa `Freehand`. Também é possível editar o arquivo eps, modificando a escala do desenho sem alterar a escala das letras.

GiD Se o programa GiD for usado para gerar os dados de entrada, essa opção gera arquivos de saída no formato do GiD, permitindo que os resultados sejam visualizados nesse programa.

1.5 Envoltória de Esforços Solicitantes (:ENVL)

Dada uma estrutura reticulada, a envoltória de um esforço solicitante fornece seus valores extremos considerando as combinações mais desfavoráveis dos carregamentos em cada seção transversal. Adicionalmente são apresentados os valores concorrentes dos demais esforços solicitantes. Ou seja, são apresentados os valores máximos e mínimos do esforço especificado acompanhados dos correspondentes valores, não necessariamente extremos, dos demais esforços.

Assim, a especificação de uma envoltória envolve a definição de um esforço solicitante, dos carregamentos que participam da envoltória e de seus coeficientes de minoração e majoração para as situações em que são favoráveis ou desfavoráveis na composição dos valores extremos do esforço.

Nota 1 (Alerta) Na elaboração das envoltórias, só são considerados os esforços nas seções de extremidade das barras. Portanto, para obter traçados mais realistas em barras submetidas a cargas distribuídas, as mesmas devem ser subdivididas em pelo menos quatro trechos.

```
:ENVL.
% nIntnForc
      2
% Internal force
      M   % Bending-moment enveloping
% iLoad  GammUnfv  GammFvrb
      1      1.4      0.9
      2      1.5      0.0
      0
%.....
% Internal force
      V   % Shear-force enveloping
% iLoad  GammUnfv  GammFvrb
      1      1.4      0.9
      2      1.5      0.0
      0
% (ENVL)
%
```

iLoad número do carregamento;
GammUnfv coeficiente no caso do momento ser desfavorável;
GammFvrb coeficiente no caso do momento ser favorável.

1.6 Nós (:NODE)

```
:NODE. % Nodes
% nNodes
      3
```

1.6.1 Coordenadas

A tabela de coordenadas é precedida por um fator de escala que permite converter rapidamente as coordenadas para uma outra unidade. Para cada nó, são fornecidos seu número de identificação e

‘nSpatDimns’ coordenadas na mesma linha. Os nós não precisam estar ordenados, mas todos os ‘nNodes’ nós devem estar presentes.

```
::COOR. % Coordinates
% Unit multiplier
1.0
% Node      X1      X2
      1      0.0     0.0
      2      6.0     0.0
      3     12.0     0.0
%
```

1.6.2 Vinculação dos Graus de Liberdade

Cada nó restringido deve ter sua vinculação descrita na tabela de vinculação, a qual contém linhas com o número do nó seguido pelas condições de vinculação de todos os graus de liberdade. Um nó nulo assinala o término da tabela para o programa.

% 2D (Body)			% 2D (Frame)				% 3D (Frame)						
::RSTR. % Restraints			::RSTR. % Restraints				::RSTR. % Restraints						
% Node	d1	d2	% Node	d1	d2	r3	% Node	d1	d2	d3	r1	r2	r3
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
3	1	0	3	1	0	0	3	1	0	0	0	0	0
0			3	0	0	1	3	0	0	1	0	0	0
			0				0						

Quando um nó aparece mais de uma vez na tabela, o programa adiciona as condições de vinculação. Por exemplo, a vinculação final do nó 3 é [1,0,1] para o caso 2D (frame) e [1,0,1,0,0,0] para o 3D (frame) nas tabelas acima.

As restrições podem ser verificadas graficamente se o pré-processador do programa GiD for usado. Os símbolos correspondem a projeções de uma pirâmide de base quadrangular como mostra a Fig. 1.1. Quando todos os três GL's estão vinculados, como no ponto A, as perspectivas da pirâmide são semelhantes nos planos Oxy , Oyz e Ozx . Quando os GL's nas direções x e y estão vinculados, como no ponto B, as projeções geram um triângulo de lados paralelos a essas direções no plano Oxy e retângulos com o lado menor paralelo à direção bloqueada nos demais planos. Quando um GL numa determinada direção está vinculado, as projeções mantêm o eixo da pirâmide alinhado com essa direção. Assim, para o nó C vinculado em x , as projeções geram triângulos nos planos Oxy e Ozx e um quadrado no plano Oyz .

O engastamento total é representado pela projeção de uma pirâmide de base dupla, mas outras restrições que misturam vínculos de deslocamento e rotação não possuem símbolos específicos e a pirâmide de base dupla é orientada de acordo com os GL's de deslocamento ignorando os de rotação. O problema pode ser contornado impondo-se, separadamente, as restrições de deslocamento e de rotação. Desse modo, o pré-processador irá superpor duas pirâmides, uma descrevendo os vínculos de deslocamento e outra os de rotação.

1.6.3 Deslocamentos Impostos

Os deslocamentos estáticos são sempre impostos a graus de liberdade nodais. Na tabela de deslocamentos, eles são identificados pela ordem de entrada e associados aos respectivos graus de liberdade.

Na análise estática, os deslocamentos impostos estão presentes em todos os carregamentos. Defina uma combinação de carregamentos caso seja necessário eliminar o efeito de um deslocamento

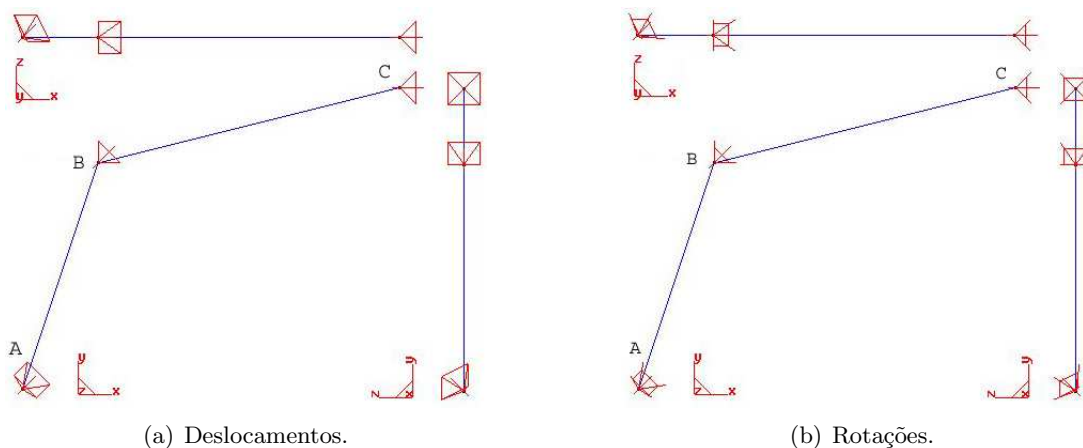


Fig. 1.1: Representação das restrições dos graus de liberdade [Edg].

imposto.

```
::BCED. % Prescribed displacements
% nBCED
    1
% Node  iDir  Displ
    3    2  -0.01
%
```

1.6.4 Constantes de Mola

As constantes de mola devem ser posicionadas em graus de liberdade livres dos nós da estrutura. As listas das constantes devem ser encerradas com um valor zero no lugar do número do nó. Em estruturas complexas, as constantes de mola suficientemente grandes podem ser usadas para obter reações de apoio nodais, funcionando como um coeficiente de penalidade aplicado ao grau de liberdade.

```
::SPRN. % Spring coeffs.
% Node  iDir      K
    1    2  1.000e+05
    0
% (SPRN)
::END.
```

1.6.5 Esforços Nodais

Os esforços nodais devem ser aplicados a graus de liberdade efetivos. No caso de um grau restringido, o programa avisará o usuário que o esforço foi ignorado e o processamento continuará normalmente. No caso de um grau escravo, o programa será interrompido com uma mensagem de erro pois essa opção ainda não foi implementada. Na tabela de esforços, as componentes são identificadas individualmente pelo nó e o grau de liberdade associado ao esforço aplicado. O sentido dos esforços concorda com o sentido dos eixos do sistema global de coordenadas.

Nos modelos axissimétricos, as forças concentradas correspondem a forças distribuídas num arco de um radiano, por exemplo kN/Rad de modo a serem compatíveis com as forças distribuídas de superfície e de volume aplicadas ao modelo.

```

::BCNF. % Prescribed nodal forces
% nNatrLoads nMaxmComps
           2          10
% iLoad
           1
% iNode  iDOF  Force
           2    2   -2.0
           0
%
% iLoad
           2
% Node  iDOF  Force
           2    1   -1.0
           2    3    3.0
           0
% (BCNF)

```

Relação dos dados de entrada:

nNatrLoads	número de casos de carregamento com carga concentrada, (<code>nNatrLoads < nLoads</code>);
nMaxmComps	número máximo de componentes de força/momento usadas em todos os casos de carregamento;
iLoad	número do carregamento;
iNode	número do nó;
iDOF	número do grau de liberdade;
	AxisSymm, PlanStrn, PlanStrs:
	1 força em X_1 ,
	2 força em X_2 ;
	Fram_2D_:
	1 força em X_1 ,
	2 força em X_2 ,
	3 momento em torno de X_3 ;
	Fram_3D_:
	1 força em X_1 ,
	2 força em X_2 ,
	3 força em X_3 ,
	4 momento em torno de X_1 ,
	5 momento em torno de X_2 ,
	6 momento em torno de X_3 .

1.6.6 Equações de Restrição

Uma equação de restrição expressa o deslocamento de um grau de liberdade, qualificado de *escravo*, como uma combinação linear dos deslocamentos de outros graus de liberdade, qualificados de *mestres*. Apenas uma equação por grau escravo é permitida, enquanto os graus mestres podem participar de várias equações de restrição.

As equações de restrição são úteis para impor condições de contorno não-convencionais, como o acoplamento rígido entre partes da estrutura ou a simetria em relação a um plano oblíquo aos eixos do sistema de coordenadas. Ela também permite a vinculação dos nós em direções diferentes das globais (apoios escostos) e a liberação dos graus de liberdade locais das barras sem o uso do

bloco 'RLSE' (problemas dinâmicos com matriz de massa consistente). Contudo as equações são difíceis de se escrever ou mesmo interpretar, podendo induzir a erros sérios de análise.

```
::CEQN. % Constraint equations
% nConstrEqs nMaxxBetas
      3      3
%iCEq NSlav iDir nBetas [neglect bar 2 axial effects]
%      NMast1 iDir2 Beta1 NMast2 iDir2 Beta2 NMast3 iDir3 Beta3
% Connect nodes 1 and 7 translational DOF's and leave rotational DOF.
      1      7      1      1
      1      1      1.0
      2      7      2      1
      1      2      1.0
% Connect bar (6) at node 6 in the axial direction only.
% 0.8 u6 + 0.6 v6 = 0.8 u2 + 0.6 v2 => u6 = 0.75 (v2-v6) + u2
      3      6      1      3
      2      2      0.75      6      2      -0.75      2      1      1.00
```

Relação dos dados de entrada:

nConstrEqs número de equações de restrição;
nMaxxBetas número máximo de coeficientes numa única equação);
iCEq número da equação de restrição;
Slav nó escravo;
iDir componente do nó escravo;
nBetas número de coeficientes na equação iCEq;
Mast_{*i*} *i*-ésimo nó mestre, *i* = 1, ..., nBetas;
iDir_{*i*} componente do nó mestre;
Beta_{*i*} coeficiente multiplicador.

O programa permite a geração da equação de restrição correspondente ao movimento de corpo rígido de um grau escravo em relação a um nó mestre. Para isto, basta fornecer $nBetas = 0$ e o número do nó mestre na linha seguinte.

```
::CEQN. % Constraint equations
% nConstrEqs nMaxxBetas
      6      3
%iCEq NSlav iDir nBetas [Rigid body constraint]
%      NMast1 iDir2 Beta1 NMast2 iDir2 Beta2 NMast3 iDir3 Beta3
      1      7      1      0
      1
      2      7      2      0
      1
      3      7      3      0
      1
      4      7      4      0
      1
      5      7      5      0
      1
      6      7      6      0
      1
% (CEQN)
```

As equações são escritas automaticamente para os graus escravos considerando os espaçamentos entre os nós e o fato do grau ser de translação ou rotação:

$$\begin{aligned} u_1^e &= u_1^m + \Delta x_3 \theta_2^m - \Delta x_2 \theta_3^m, & \theta_1^e &= \theta_1^m, \\ u_2^e &= u_2^m + \Delta x_1 \theta_3^m - \Delta x_3 \theta_1^m, & \theta_2^e &= \theta_2^m, \\ u_3^e &= u_3^m + \Delta x_2 \theta_1^m - \Delta x_1 \theta_2^m, & \theta_3^e &= \theta_3^m, \end{aligned}$$

em que $\Delta x_i = x_i^e - x_i^m$, e (u_i^e, θ_i^e) e (u_i^m, θ_i^m) são deslocamentos e rotações dos nós escravo e mestre, respectivamente.

1.7 Materiais (:MATE)

Os materiais são organizados em grupos contendo materiais do mesmo tipo. O número do grupo é referenciado por um parâmetro associado a grupos de atributos ou seções transversais; e o número do material por um parâmetro associado a um particular atributo ou seção transversal.

As propriedades devem sempre descrever um material de resposta linear para que seja válido o princípio da superposição de efeitos usado na resolução da estrutura.

Nota 2 Os parâmetros de cada material devem ser fornecidos em uma única linha, mesmo no caso de materiais anisótropos com muitos parâmetros.

Nota 3 As tensões nodais médias podem conter erros consideráveis junto às interfaces de materiais com propriedades distintas. Nesse caso, as tensões nos elementos junto a essas interfaces devem ser substituídas por valores extrapolados a partir dos pontos de Gauss, sem a suavização ('smoothing') das tensões nos nós.

```
:MATE. % Materials
% nMateGrups
      2
%. . . . . < Linear elastic isotropic
% iGrup nMates      strType
      1      2 ElasLinrIsot
% iMate      E      nu      rho      alpha      T0 (kN/m2; ;ton/m3; 1/C; C)
      1 1.00E6  0.20      1.00      1.0E-5      25. % Easier displacement check
      2 2.06E7  0.27      7.85      1.0E-5      25. % A36 steel [ANSYS tutorial]
%
%. . . . . < Linear transv. isotropic
% iGrup nMates      strType
      2      1 ElasLinrTiso
% iMate      E1      E2      G12      nu12      nu23      m1      m2      m3      rho      alpha      T0
      1      2.E6      1.E6      .7E6      0.2      0.2      1.0      0.0      0.0      2.5      1.0E-5      25.
%
```

Relação dos dados de entrada:

iMate número do material no grupo;
rho densidade;
alpha coeficiente de dilatação térmica linear;
T0 temperatura de referência.

LinrElasIsot Material elástico linear isótropo (E, ν).

E módulo de elasticidade;
 nu coeficiente de Poisson;

LinrElasTiso Material elástico linear transversalmente isótropo ($E_1, E_2, \nu_{12}, \nu_{23}, G_{12}, \mathbf{m}$).

E1 módulo de elasticidade na direção preferencial \mathbf{m} , a qual define o eixo local x_1 ;
 E2 módulo de elasticidade no plano de isotropia;
 nu12 coeficiente de Poisson da deformação transversal na direção x_2 quando o sólido é solicitado na direção x_1 ;
 nu23 coeficiente de Poisson no plano de isotropia;
 G12 módulo de elasticidade transversal nos planos contendo a direção preferencial x_1 ;
 m1 componente da direção preferencial no eixo global X_1 .
 m2 idem no eixo global X_2 .
 m3 idem no eixo global X_3 .

LinrElasOrth [não implementado] Material elástico linear ortótropo ($E_1, E_2, E_3, \nu_{12}, \nu_{23}, \nu_{13}, G_{12}, G_{23}, G_{31}, \mathbf{m}_1, \mathbf{m}_2$).

E1 módulo de elasticidade na direção preferencial \mathbf{m}_1 , a qual define o eixo local x_1 ;
 E2 idem na direção preferencial \mathbf{m}_2 ;
 E3 idem na direção preferencial \mathbf{m}_3 ;
 nu12 coeficiente de Poisson da deformação transversal na direção x_2 quando o sólido é solicitado na direção x_1 ;
 nu23 idem na direção x_2 quando o sólido é solicitado na direção x_3 ;
 nu13 idem na direção x_1 quando o sólido é solicitado na direção x_3 ;
 G12 módulo de elasticidade transversal nos planos contendo a direção preferencial x_1 ;
 iDir1 número do vetor no bloco :VECT, o qual indica a direção preferencial x_1 do material.
 iDir2 número do vetor no bloco :VECT, o qual indica a direção preferencial x_2 do material.

Caso sejam fornecidos outros coeficientes de Poisson, a simetria da matriz de elasticidade fornece as relações que permitem o cálculo dos parâmetros exigidos pelo programa,

$$\frac{\nu_{12}}{E_1} = \frac{\nu_{21}}{E_2}, \quad \frac{\nu_{23}}{E_2} = \frac{\nu_{32}}{E_3}, \quad \frac{\nu_{13}}{E_1} = \frac{\nu_{31}}{E_3}.$$

LinrElasLayr [não implementado] Caso particular de material transversalmente isótropo em que a direção preferencial coincide com a vertical ($\mathbf{m} = [0,1]$ ou $\mathbf{m} = [0,0,1]$). Ele tem por objetivo tornar mais eficiente a modelagem de camadas com o mesmo tipo de material evitando-se o cálculo e a rotação da matriz de elasticidade para cada elemento do grupo de elementos.

1.7.1 Conversão de Unidades

Força:

$$1 \text{ lb} = 0,4536 \text{ kgf} = 4,448 \text{ N} = 4,448 \times 10^{-3} \text{ kN} \quad (1.1)$$

$$1 \text{ kN} = 1 \times 10^3 \text{ N} = 224,8 \text{ lbs} \quad (1.2)$$

$$1 \text{ N} = 1 \times 10^{-3} \text{ kN} = 0,2248 \text{ lbs} \quad (1.3)$$

Pressão/Tensão:

$$1 \text{ psi} = 6,895 \times 10^{-3} \text{ MPa} = 0,6895 \times 10^{-3} \text{ kN/cm}^2 \quad (1.4)$$

$$1 \text{ kN/cm}^2 = 10 \text{ MPa} = 1450,3 \text{ psi} \quad (1.5)$$

$$1 \text{ MPa} = 0,1 \text{ kN/cm}^2 = 145,03 \text{ psi} \quad (1.6)$$

Massa:

$$1 \text{ pound} = 0,4536 \text{ kg} = 0,4536 \times 10^{-3} \text{ ton} \quad (1.7)$$

$$1 \text{ slug} = 14,59 \text{ kg} = 14,59 \times 10^{-3} \text{ ton} \quad (1.8)$$

$$1 \text{ ton} = 1 \times 10^3 \text{ kg} = 2,2046 \times 10^3 \text{ pounds} \quad (1.9)$$

$$1 \text{ kg} = 1 \times 10^{-3} \text{ ton} = 2,2046 \text{ pounds} \quad (1.10)$$

Densidade:

$$1 \text{ lbs/in}^3 = 27,68 \times 10^3 \text{ kg/m}^3 = 27,68 \times 10^{-6} \text{ ton/cm}^3 \quad (1.11)$$

$$1 \text{ ton/cm}^3 = 1 \times 10^9 \text{ kg/m}^3 = 36,13 \times 10^3 \text{ lbs/in}^3 \quad (1.12)$$

$$1 \text{ kg/m}^3 = 1 \times 10^{-9} \text{ ton/cm}^3 = 36,13 \times 10^{-6} \text{ lbs/in}^3 \quad (1.13)$$

1.7.2 Exemplos

Alumínio (Aluminum) [Venkayya1978r-optm]

$$\begin{aligned} \rho &= 2,77 \times 10^{-6} \text{ ton/cm}^3 &= 0,1 \text{ lbs/in}^3 \\ E &= 7,24 \times 10^3 \text{ kN/cm}^2 &= 10,5 \times 10^6 \text{ psi} \\ \nu &= 0,3 \end{aligned}$$

Epoxy de Grafite (Graphite Epoxy) [Venkayya1978r-optm]

$$\begin{aligned} \rho &= 1,52 \times 10^{-6} \text{ ton/cm}^3 &= 0,055 \text{ lbs/in}^3 \\ E_1 &= 12,8 \times 10^3 \text{ kN/cm}^2 &= 18,5 \times 10^6 \text{ psi} \\ E_2 &= 1,10 \times 10^3 \text{ kN/cm}^2 &= 1,6 \times 10^6 \text{ psi} \\ G_{12} &= 0,45 \times 10^3 \text{ kN/cm}^2 &= 0,65 \times 10^6 \text{ psi} \\ \nu &= 0,25 \text{ (não especifica qual dos } \nu) \end{aligned}$$

1.8 Planos Principais (:XZPL)

Barras

Os eixos do sistema local de coordenadas formam uma base dextrogira. O eixo x_1 coincide com o eixo da barra e os eixos x_2 e x_3 coincidem com os eixos centrais-principais da seção transversal. Para barras bidimensionais, o eixo x_2 encontra-se no plano da estrutura e o eixo x_3 é perpendicular a esse plano. Para barras tridimensionais, os eixos podem ser estabelecidos automaticamente pelo programa, ou podem ser obtidos a partir de planos principais fornecidos pelo usuário no bloco ':XZPL'.

Se os planos principais forem omitidos, o programa admite que a direção do eixo local x_3 coincide com a projeção sobre a seção transversal do eixo global Z segundo a direção da barra. O eixo local x_2 completa a base dextrogira $Gx_1x_2x_3$. Se o eixo Z coincidir com o eixo da barra, então é a direção de x_2 que é obtida a partir da projeção do eixo global Y sobre a seção e o eixo x_3 completa a base dextrogira $Gx_1x_2x_3$.

O bloco ':XZPL' tem a finalidade de especificar o plano principal Gx_1x_3 de um grupo de barras através do bloco das seções transversais. Cada plano é definido a partir de um vetor auxiliar \mathbf{v} e uma rotação θ em torno do eixo x_1 da barra. A projeção de \mathbf{v} no plano da seção transversal define a direção a partir da qual é medido o ângulo θ em graus. Assim, um ângulo θ nulo significa que o plano principal Gx_1x_3 contém o vetor \mathbf{v} .

```

:XZPL. % Local x1x3 plane (orientation of the principal axes)
% nPlans
      2
% iPlan      vX      vY      vZ      theta
      1      -1.0     1.0     0.0     0.0
      2      -1.0     1.0     0.0    15.0

```

Nota 4 Os eixos principais da seção obtidos a partir de \mathbf{v} e θ dependem da direção e do sentido do eixo da barra. Essa flexibilidade visa minimizar o número de planos fornecidos na análise, já que diversas barras podem compartilhar a mesma descrição de plano principal. Por exemplo, os planos principais das barras de um pórtico plano poderiam ser obtidos a partir de um único vetor contido no plano e oblíquo às vigas e pilares (o vetor \mathbf{v} não deve coincidir com o eixo da barra). Ou no caso de um pórtico espacial constituído por pórticos planos ortogonais entre si, por um vetor vertical normal aos pavimentos e outro normal a um dos planos dos pilares.

1.9 Seções Transversais (:SECT)

Nota 5 Verifique se os critérios para a escolha automática dos eixos principais estão de acordo com os do programa usado para gerar o arquivo de dados. Por exemplo, a opção AUTO em 'Line-Local-Axis' no *problemtype* nastran2 do GiD7 gera eixos locais que estão de acordo com os do programa.

Todas as listas descrevendo as seções nos grupos devem terminar com uma linha contendo o número zero.

1.9.1 Seções Prismáticas

```

:SECT. % Cross Sections
% nSectGrups fStrs
      8      1
%. . . . .< Section Genr
% iGrup iMateGrup strSectType bShear bWink
%
%          (Sec. T: ha=0.2m, ea=0.01m; bf=0.10, ef=0.005m)
%      1      1      Genr      0      0
% iSect iMate iXZplan      A1      A2      A3      IT      I2      I3 (m2; m4)
%      1      1      0 0.003      0.0      0.0      0.075E-6 0.833E-6 16.67E-6
%      0
%
%. . . . .< Section Rect
% iGrup iMateGrup strSectType bShear bWink
%      2      1      Rect      0      0
% iSect iMate iXZplan      b      h (m, m)
%      1      1      1 0.05      0.02 % A=0.001
%      2      1      0 0.50      0.20 % A=0.100
%      0
%
%. . . . .< Section Circ
% iGrup iMateGrup strSectType bShear bWink
%      3      1      Circ      0      0
% iSect iMate iXZplan      Ri      Re (m)
%      1      1      0 0.0      0.20

```

```

0
%
%. . . . .< Section Tube
% iGrup iMateGrup strSectType bShear bWink
   4      1      Tube      0      0
% iSect iMate iXZplan Ri Re (m)
   1      1      0  0.15  0.20
0
%
%. . . . .< Section Boxed
% iGrup iMateGrup strSectType bShear bWink
   5      1      Boxd      0      0
% iSect iMate iXZplan b h tfs tfi tw (m, m)
   1      1      0  0.14  0.18  0.01  0.01  0.01
0
%
%. . . . .< Section Tshp
% iGrup iMateGrup strSectType bShear bWink
   6      1      Tshp      0      0
% iSect iMate iXZplan h bf tf tw (m, m)
   1      1      0  0.14  0.18  0.01  0.01
0
%
%. . . . .< H-shaped
% iGrup iMateGrup strSectType bShear bWink
   7      1      Hshp      0      0
% iSect iMate iXZplan h bfs tfs bfi tfi tw (cm)
   1      1      0  50.  40.  5.  40.  5.  10. %
0
%(SECT)

```

Relação dos dados de entrada:

nSectGrups número total de grupos de seções transversais;
fStrs código para cálculo das tensões:
 0 não calcula tensões, apenas os esforços solicitantes,
 1 valores extremos das tensões (com traçado gráfico em 2D),
 2 valores das tensões em pontos pré-determinados da ST,
 3 valores de σ' e σ'' nas fibras extremas (2D apenas, com traçado gráfico);
iGrup número do grupo de seções;
iMateGrup número do grupo de materiais :MATE;
strSectType tipo da seção:
 Boxd caixão,
 Circ circular (ver Tube),
 Genr genérica,
 Hshp em H ou I,
 Hvar delgada em H com altura da alma variável,
 Rect retangular,
 Tshp em T,
 Tube em coroa de círculo;

bShear	deformação por cisalhamento ¹ : 0 desprezar, 1 considerar;
bWink	seção sobre apoio elástico ² : 0 sem apoio elástico, 1 com apoio elástico;
iSect	número da seção;
iMate	número do material no grupo iMateGrup;
iXZplan	O parâmetro iXZplane refere-se ao plano principal descrito no bloco :XZPL (no caso de barras bidimensionais ou quando iXZplan = 0, os eixos principais são escolhidos automaticamente pelo programa conforme descrito na Seção 1.8);

Para facilitar a conversão entre modelos 2D e 3D, as medidas de largura de uma mesma seção referem-se a eixos y_2 e y_3 , respectivamente, distintos dos eixos locais x_2 e x_3 (Fig. 1.2). Em 3D, as larguras são medidas em x_2 e as alturas em x_3 . Reciprocamente em 2D, as larguras são medidas em x_3 e as alturas em x_2 . Esta convenção está em sintonia com a escolha automática dos eixos locais para modelos 3D, permitindo que as seções sejam descritas do modo usual empregado na Engenharia Civil.

A seção genérica (**Genr**) merece uma atenção especial quando se converte um modelo 2D em 3D. A conversão requer a troca das propriedades associadas a x_2 e x_3 , ao contrário das seções descritas em termos de alturas e larguras para as quais as propriedades são calculas automaticamente.

Seção Retangular (Rect, Fig. 1.2)

b	largura;
h	altura.

Seção T (Tshp, Fig. 1.3)

h	altura total;
b_f	largura da mesa.
t_f	espessura da mesa.
t_w	espessura da alma.

Seção H (Hshp, Fig. 1.4)

h	altura total;
b_{fs}	largura da mesa superior.
t_{fs}	espessura da mesa superior.
b_{fi}	largura da mesa inferior.
t_{fi}	espessura da mesa inferior.
t_w	espessura da alma.

Seção Caixaõ (Boxd, Fig. 1.5)

b	largura total;
h	altura total;
t_{fs}	espessura da mesa superior.
t_{fi}	espessura da mesa inferior.

¹Por ser uma variável binária, a leitura de outro valor diferente de 0 ou 1 pode gerar um *loop* infinito no programa.

²Ver descrição dos parâmetros adicionais na seção 1.9.1.1.

t_w espessura da alma lateral.

Seção em Coroa de Círculo (Tube, Fig. 1.6)

R_i raio interno;
 R_e raio externo;

Seção Circular (emprega o procedimento da ST em coroa de círculo)

$R_i = 0$ raio interno nulo;
 $R_e = R$ raio externo;

Seção Genérica (Genr)

- A1 área da seção;
- A2 área de cisalhamento na direção x_2 ;
- A3 área de cisalhamento na direção x_3 ;
- IT momento de inércia à torção;
- I2 momento de inércia à flexão em relação ao eixo x_2 ;
- I3 momento de inércia à flexão em relação ao eixo x_3 .

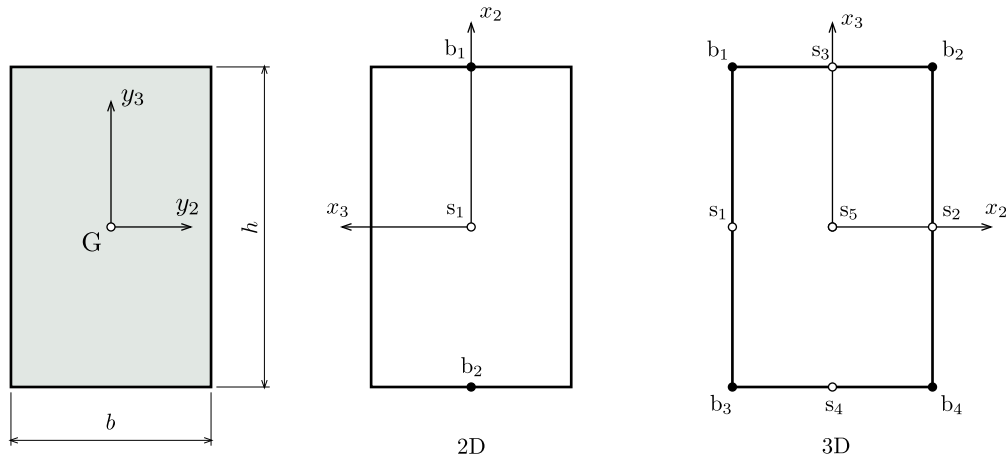


Fig. 1.2: Posição dos pontos de tensão na seção retangular.

1.9.1.1 Seções sobre Apoio Elástico

```
:SECT. % Bars on Winkler foundation
% nSectGrups fStrs
      2      1
%. . . . . < Section Rect
% iGrup iMateGrup strSectType bShear bWink
      2      1      Rect      0      1
% iSect iMate iXZplan      b      h      kx      ky      kt      e
      1      1      0      1.0    0.20    0.0    14.E3    0.0    0.0
      2      1      0      1.0    0.25    0.0    14.E3    0.0    0.0
      0
%(SECT)
```

Quando bWink é igual a 1, o programa lê quatro valores adicionais para cada seção:

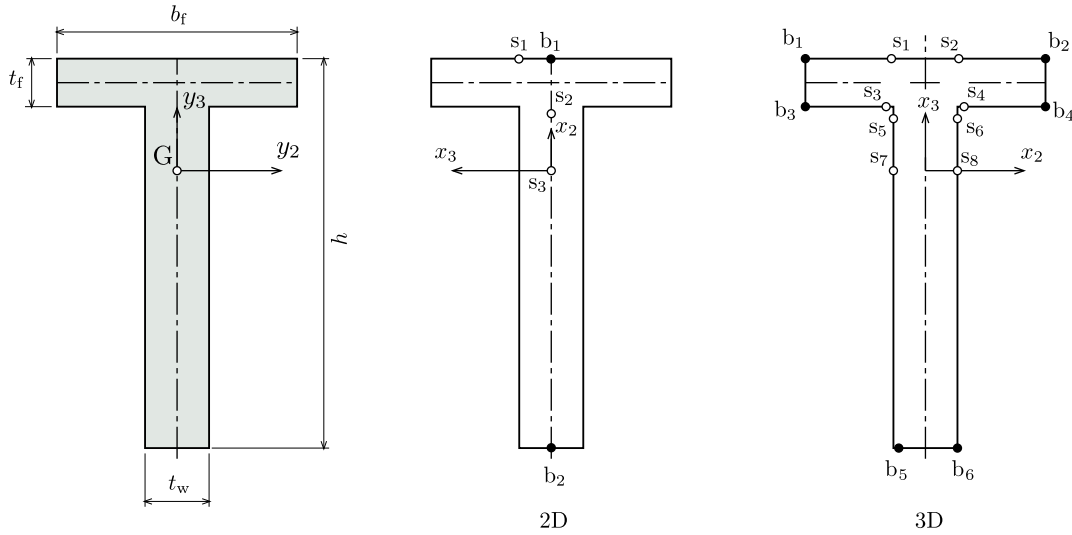


Fig. 1.3: Posição dos pontos de tensão na seção T.

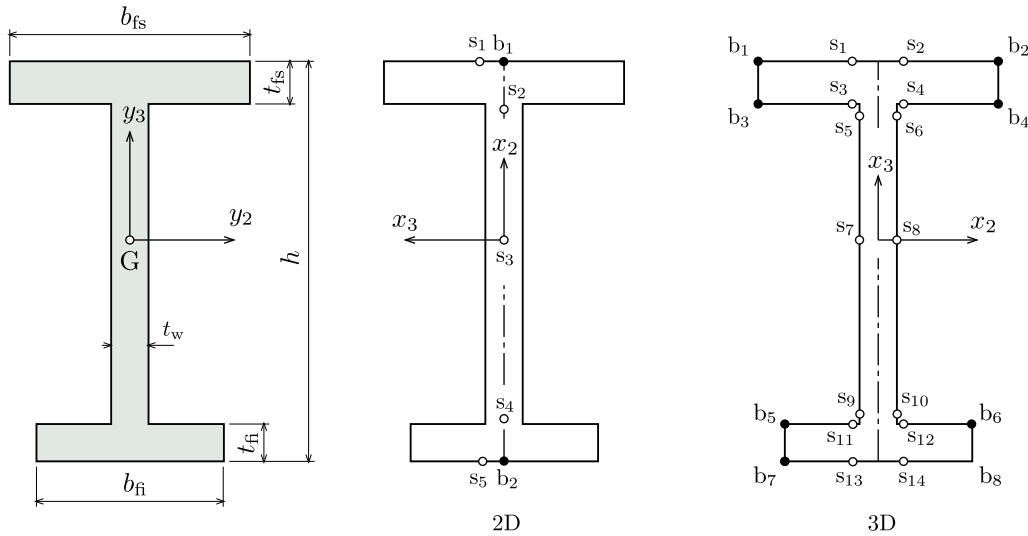


Fig. 1.4: Posição dos pontos de tensão na seção H.

- k_x coeficiente de mola linear na direção axial, [F]/[L]²;
- k_y coeficiente de mola linear na direção transversal, [F]/[L]²;
- k_t coeficiente de mola rotacional em relação ao eixo z , [F]/[Rad];
- e excentricidade do eixo da barra em relação à fundação elástica, [L];

Todos os coeficientes de mola são distribuídos por unidade de comprimento da barra.

1.9.2 Seções de Barras Especiais

```
:SECT. % Cross Sections
% nSectGrups fStrs
      3      1
%. . . . .< Section for flexible joints
% iGrup iMateGrup strSectType bShear bWink
      1      1      Flex      0      0
```

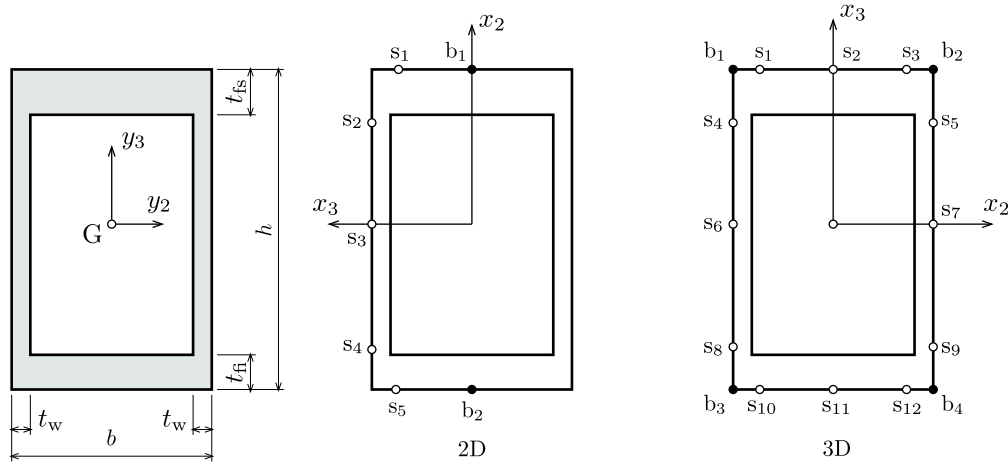


Fig. 1.5: Posição dos pontos de tensão na seção Caixaõ.

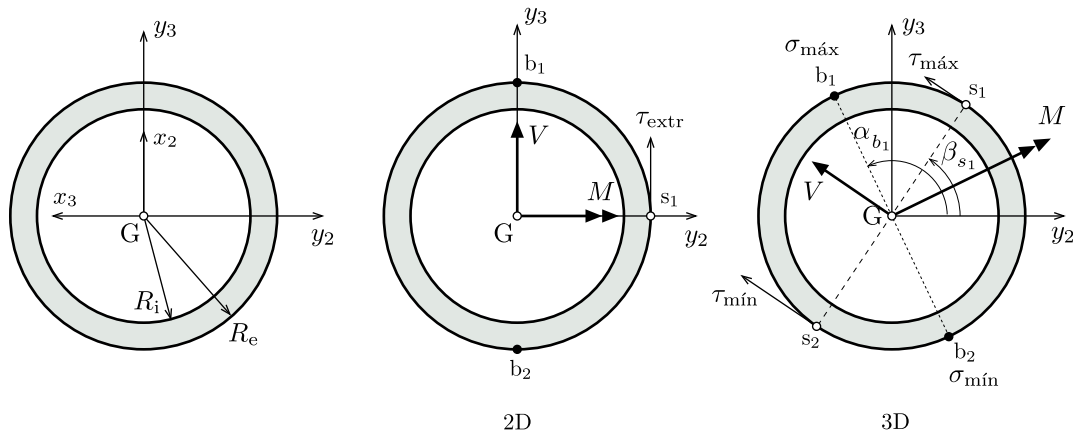


Fig. 1.6: Posição dos pontos de tensão extrema na seção em Coroa de Círculo ($\tau > 0$ no sentido anti-horário).

```
% iSect  iXZPlan      A      I      gami      gamj
      1      0      0.380  0.00286  1.0      1.0
      2      0      0.200  0.00267  1.0      1.0
      0

%
%. . . . .< Tapered H-shaped
% iGrup  iMateGrup strSectType  bShear  bWink
      3      1      Hvar      0      0
% iSect  iMate  iXZPlan      hi      hj      bf      tf      tw
      1      1      0      0.40  0.80  0.20  0.02  0.01
      0
%(SECT)
```

Relação dos dados de entrada:

- nSectGrups número total de grupos de seções transversais;
- fStrs código para cálculo das tensões:
 - 0 não calcula tensões, apenas os esforços solicitantes,
 - 1 valores extremos das tensões (com traçado gráfico em 2D),

	2	valores das tensões em pontos pré-determinados da ST,
	3	valores de σ' e σ'' nas fibras extremas (2D apenas, com traçado gráfico);
iGrup		número do grupo de seções;
iMateGrup		número do grupo de materiais :MATE;
strSectType		tipo da seção:
	Flex	com conexões flexíveis nas extremidades da barra,
	Hvar	delgada em H com altura da alma variável,
bShear		apenas a opção em que a deformação por cisalhamento é desprezada foi implementada, bShear = 0;
bWink		apenas a opção sem apoio elástico foi implementada, bWink = 0;
iSect		número da seção;
iMate		número do material no grupo iMateGrup;
iXZplan		apenas a opção em que os eixos são escolhidos automaticamente foi implementada, iXZplan = 0;

Seção de barra com conexões flexíveis (Flex)

A	área da seção;
I_z	momento de inércia em relação ao eixo z ;
γ_i	parâmetro da conexão em i ;
γ_j	parâmetro da conexão em j ;

O parâmetro γ_α da conexão na extremidade $\alpha = i, j$ da barra é dado pela fórmula $\gamma_\alpha = (1 + \frac{3EI}{\ell} \phi_\alpha)^{-1}$, em que $\phi_\alpha = \theta_\alpha / M_\alpha$ é a flexibilidade à rotação na extremidade.

Seção H delgada com altura variável (Hvar, Fig. 1.7)

h_I	altura inicial (distância entre planos médios das mesas);
h_J	altura final;
b_f	largura das mesas.
t_f	espessura das mesas.
t_w	espessura da alma.

1.10 Atributos Gerais (:ATTR)

Para não sobrecarregar a descrição dos elementos, seus atributos são reunidos em conjuntos que por sua vez são agrupados conforme os números de parâmetros inteiros e reais. O significado de cada parâmetro depende do elemento finito a ele associado. Por exemplo, o parâmetro real pode fornecer a área de um elemento finito de treliça e, ao mesmo tempo, a espessura de um elemento finito do estado plano de tensão. Os rótulos dos parâmetros e as variáveis strProp_i servem apenas para orientar o usuário e auxiliar na documentação dos arquivos de saída.

Para evitar confusão, os atributos dos elementos de barra são fornecidos em um bloco distinto (SECT:) por causa do grande número e da variedade dos parâmetros.

```
:ATTR. % Attributes
% nAttrGrups
      2
%. . . . . < Plane-stress (Isot)
```

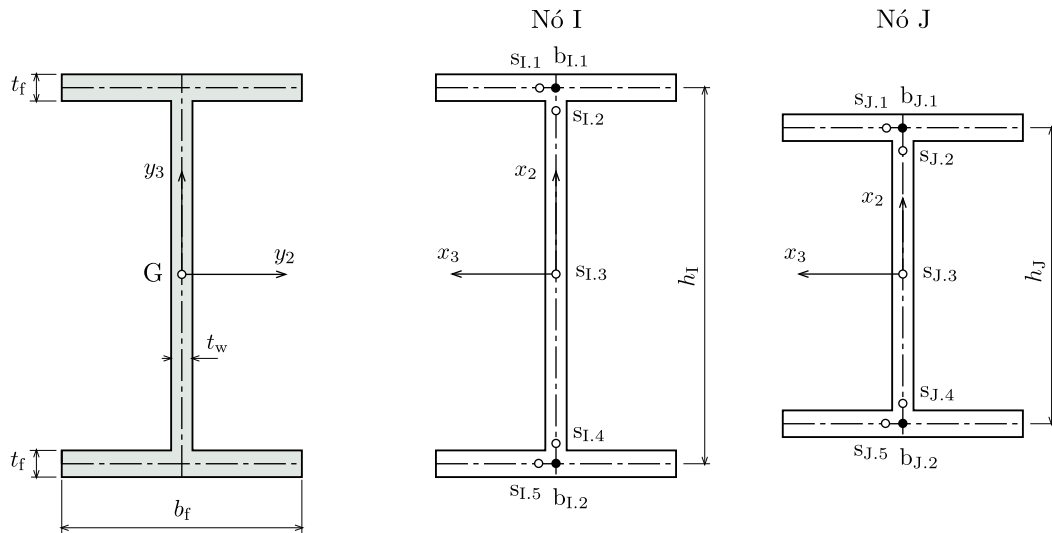


Fig. 1.7: Posição dos pontos de tensão na seção H delgada com altura variável.

```
% iGrup  nAttrSets  iMateGrup  fStrs  strProp
      1      2      1      1  Thickness
% iAttr  iMate  Thickness
      1      1      1.0E-2
      2      2      2.0E-2
%. . . . .< Truss cross-section
% iGrup  nAttrSets  iMateGrup  fStrs  strProp
      2      2      1      1      Area
% iAttr  iMate      Area
      1      1      2.1
      2      1      2.2
% (ATTR)
%
```

Relação dos dados de entrada:

- nAttrGrups número total de grupos de atributos;
- iGrup número do grupo;
- nAttrSets número de conjuntos de atributos no grupo;
- iMateGrup número do grupo de materiais :MATE;
- fStrs código para cálculo das tensões:
- PlanStrs, PlanStrn, AxisSymm**
- 0 tensões nos pontos de Gauss,
- 1 tensões médias nos pontos nodais (nodal averaging);
- strProp descrição do parâmetro real.
- iAttr número do conjunto de atributos;
- I1 parâmetro inteiro (iMate);
- R1 parâmetro real (thickness/area).

1.11 Liberação dos Graus de Liberdade Locais (:RLSE)

A condição de esforço nodal nulo na extremidade de um elemento pode ser imposta liberando-se o correspondente grau de liberdade (GL) local. Dos diversos arranjos de liberação possíveis, só são aceitáveis aqueles que mantêm os elementos estaticamente determinados. Isto decorre do fato da matriz de rigidez e vetor carregamento serem obtidos por condensação estática, o que limita o uso desse recurso às análises estáticas ou quase-estáticas.

Os arranjos são descritos por sequências de dígitos associados aos graus de liberdade dos nós do elemento e identificam as condições de liberação. Os dígitos devem ser separados por espaços, com o dígito 1 designando a liberação e o 0 a manutenção da ligação.

```
:RLSE. % Member releases (local DOF's)
% nRlseGrups
      2
%. . . . . < 2D-Bar releases
% iGrup nRlses nUnknsPerElem
      1      7      6
% iRlse  x1y1zz  x2y2zz
      1  0 0 1   0 0 1  % truss bar
      2  0 0 0   0 0 1  % 2nd rotational DOF
      3  0 0 1   0 0 0  % 1st rotational DOF
      4  1 0 0   1 0 0  % 1st axial release
      5  0 1 0   0 1 0  % 1st shear release
      6  0 0 0   0 1 1  % 2nd shear and rotational releases
      7  0 0 0   1 0 1  % 2nd axial and rotational releases
%
%. . . . . < 3D-Bar releases
% iGrup nRlses nUnknsPerElem
      2      3      12
% iRlse  x1y1z1xxyyzz  x2y2z2xxyyzz
      3  0 0 0 1 1 1   0 0 0 1 1 0  % pinned bar (rod)
      1  0 0 1 0 0 0   0 0 1 0 0 0  % rotational DOF
      2  1 0 0 0 0 0   0 0 0 0 0 0  % axial release
%
```

Analogamente aos atributos da seção transversal, o número do grupo de liberações é referenciado como um parâmetro do grupo de elementos, enquanto o número de um arranjo específico é referenciado a nível de elemento na tabela de incidência. Esta estratégia permite descrever condições de liberação para diversos tipos de elemento.

Nota 6 (Deformada - 2004jun05) Embora os esforços solicitantes sejam traçados corretamente nas barras com graus de liberdade liberados, o mesmo não ocorre com o traçado da deformada pois o programa utiliza os deslocamentos dos nós de extremidade independentemente da liberação. Quando o traçado da deformada é fundamental, ele pode ser obtido duplicando-se o nó de extremidade envolvido na liberação e empregando-se equações de restrição para recompor as ligações entre o nó recém-criado da barra e o nó original da estrutura.

Nota 7 (Elementos de Treliça) O uso de elementos de treliça é aconselhável no caso da liberação dos momentos nas duas extremidades da barra. Além de mais econômicos, eles não apresentam problemas com o traçado da deformada.

1.12 Elementos de Barra (:BARR)

A unidade básica de entrada e saída de dados dos elementos é o grupo. Um grupo contém elementos do mesmo tipo, os quais compartilham atributos (seções transversais e materiais) e condições de vinculação (liberação dos graus de liberdade) semelhantes.

Cada grupo contém uma lista de parâmetros especificando o tipo de elemento, o tamanho do grupo e a interação com outros objetos da análise. Uma tabela descreve a conectividade com os nós da estrutura, os materiais e as condições de vinculação para cada elemento do grupo. Os esforços distribuídos nos elementos, quando existirem, são fornecidos logo a seguir separados por carregamento. O término de um grupo de elementos é indicado com a linha de comando '::END'.

```
:BARR. % Bars
% nElemGrups  strBarrForm
           1  BarrMatrAnls
```

nElemGrups número total de grupos de barras;
strBarrForm título da formulação:
 BarrMatrAnls análise matricial de barras.

1.12.1 Parâmetros

Cada grupo de elementos possui uma linha de parâmetros. O usuário deve fornecer zero quando um parâmetro não se aplicar ao tipo de elemento ou análise.

```
%. . . . . < Rods
% iGrup  strElem  iSectGrup  iRlseGrup  fDensLoad
           1  BarrTrus           1           0           0
```

iGrup número do grupo;
strElem tipo de barra:
 BarrTrus barra de treliça,
 BarrFram barra prismática de pórtico,
 BarrTapr barra reta com seção de altura variável³,
 BarrFlex barra prismática 2D com conexões flexíveis nas extremidades⁴;
iSectGrup número do grupo das seções transversais das barras (ver :SECT);
iRlseGrup número do grupo de liberação dos graus de liberdade ou do grupo de constantes elásticas (ver :RLSE ou :BSPR);
fDensLoad indicador da presença de forças gravitacionais (não implementado).

1.12.2 Barra de Treliça

Barras de treliça devem ser usadas quando a eficiência é importante (elevado número de barras, cálculo de sensibilidade etc.) ou o traçado da estrutura deformada é o objetivo da análise.

```
::CONN. % Connectivity
% iElem  N1  N2  iSect
           1   6   3    2
           2   3   1    2
```

³Limitada à análise 'Fram_2D_' e à seção H delgada com dupla simetria Hvar.

⁴Limitada à análise 'Fram_2D_' e à seção Flex contendo os parâmetros $\gamma_i = (1 + \frac{3EI}{\ell}\phi_i)^{-1}$ das conexões, $\phi_i = \theta_i/M_i$ sendo a flexibilidade à rotação da extremidade i da barra.

```

3  7  5  2
4  5  2  2
5  1  2  2
6  3  4  2
7  4  5  2
0

```

A lista de incidência das barras sempre deve terminar com uma linha contendo o número zero.

1.12.3 Barras de Pórtico

Os grupos de barras de pórtico são descritos pelas incidências das barras no subloco `::CONN` e, se necessário, por cargas distribuídas no subloco `::DSTR`.

1.12.3.1 Incidência

```

::CONN. % Connectivity
% iElem N1 N2 iSect iRlse
  1  6  3  2  0
  2  3  1  2  0
  3  7  5  2  0
  4  5  2  2  0
  5  1  2  2  0
  6  3  4  2  0
  7  4  5  2  0
  0

```

A lista de incidência das barras deve terminar com uma linha contendo o número zero.

Geralmente todos os graus de liberdade das barras estão conectados a graus de liberdade da estrutura ($iRlse = 0$). Se isso não ocorrer, a liberação dos graus de liberdade locais dos elementos pode ser descrita no bloco `:RLSE`, com `iRlse` passando a indicar o número do arranjo de liberações do grupo `iRlseGrup` especificado como parâmetro.

Nota 8 (Esforços solicitantes e deformada - 2017jul29) Tanto os diagramas de esforços solicitantes quanto a deformada da barra não estão sendo traçados corretamente para as barras sobre apoio elástico em virtude de ignorarem as contribuições dos apoios elásticos.

1.12.3.2 Carregamento Distribuído

```

::DSTR. % Distributed Load
% nDstrSets nMaxmCmpnsPerLoad iLevlDir
      3          10          2
% iLoad
  1
% iElem Syst Type iDir Value
  1  L UNIF  -1  0.2  % Load generation
  2  1          % LastElem Step
  2  G DENS   1 -9.8
  0
% iLoad
  2
% iElem Syst Type iDir Value [Value2]

```

```

1   L  UNIF      1   0.2
2   L  TEMP      2   50.0      30.0  % temperatures at upper and lower fibers.
1   G  LINR      2   0.2      0.3
0
% iLoad
3
% iElem Syst  Type  iDir  Value  [Value2  Value3]
2   G  LEVL      1   5.0      2.0     -0.5
2   L  LEVL      1   0.3      2.0      0.1
2   L  LEVL      2  -5.0      2.0      1.0
0
% (DSTR)

```

Parâmetros

nDstrSets	número de grupos de cargas distribuídas;
nMaxmCmpnsPerLoad	máximo número de cargas especificadas em todos os grupos;
iLevlDir	número do eixo global no qual são medidas as coordenadas w usadas para definir as cargas variáveis.

O usuário pode fornecer mais de uma carga distribuída por barra, mas deve haver uma associação única entre o conjunto de cargas distribuídas e um determinado carregamento. Isto facilita a verificação das cargas distribuídas aplicadas, já que o programa desenha as forças resultantes nas barras para cada carregamento, e evita cálculos algébricos adicionais na determinação do momento fletor máximo.

As cargas distribuídas podem ser especificadas no sistema local (L) ou global (G) conforme ilustrado na Fig. 1.8 para problemas bidimensionais.

CONC* Embora exista a opção CONC para cargas concentradas nas barras, ela só deve ser usada na verificação de exercícios de análise matricial pois tanto o desenho do carregamento quanto os esforços solicitantes nas barras ignoram a presença dessas cargas.

DENS carregamento de peso próprio em que o valor fornecido é multiplicado pelo produto da área da seção transversal e a densidade de seu material.

UNIF força uniformemente distribuída. O valor fornecido refere-se à magnitude da força, Fig. 1.8.

LINR carregamento linearmente distribuído. Os valores referem-se às magnitudes da força distribuída nas extremidades I e J da barra.

LEVL carga linearmente distribuída variando em relação ao eixo global w definido pelo parâmetro $iLevlDir$. O sentido da carga no sistema local depende da orientação dos eixos da barra. Os três valores fornecidos são: (1) a força distribuída de referência p_0 , (2) a coordenada w_0 do ponto em que p_0 atua e (3) a variação ν da força ao longo do eixo w escolhido, Fig. 1.9.

TEMP distribuição da temperatura na seção transversal. O programa admite uma variação linear entre as fibras extremas na direção y_{idir} , o primeiro valor atuando na fibra superior e o segundo na inferior. Os eixos referem-se aos eixos locais da seção transversal (y_2 ou y_3) e não aos da barra (x_2 ou x_3) adotados para os demais carregamentos distribuídos (Fig. 1.10). Internamente o programa calcula as variações de temperatura em relação à temperatura inicial T_0 , e depois decompõe o diagrama em dois: um uniforme e outro linear com temperatura nula no centro de gravidade (G). Por causa dessa decomposição, que requer a altura da seção e a posição de G, as seções genéricas (GENR) só admitem uma distribuição uniforme, ou seja $VALUE = VALUE2$.

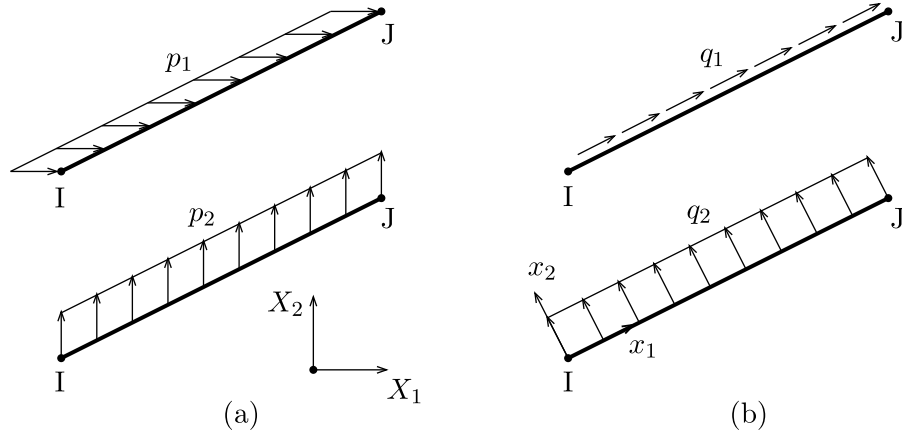


Fig. 1.8: Forças uniformemente distribuídas nos sistemas (a) global e (b) local.

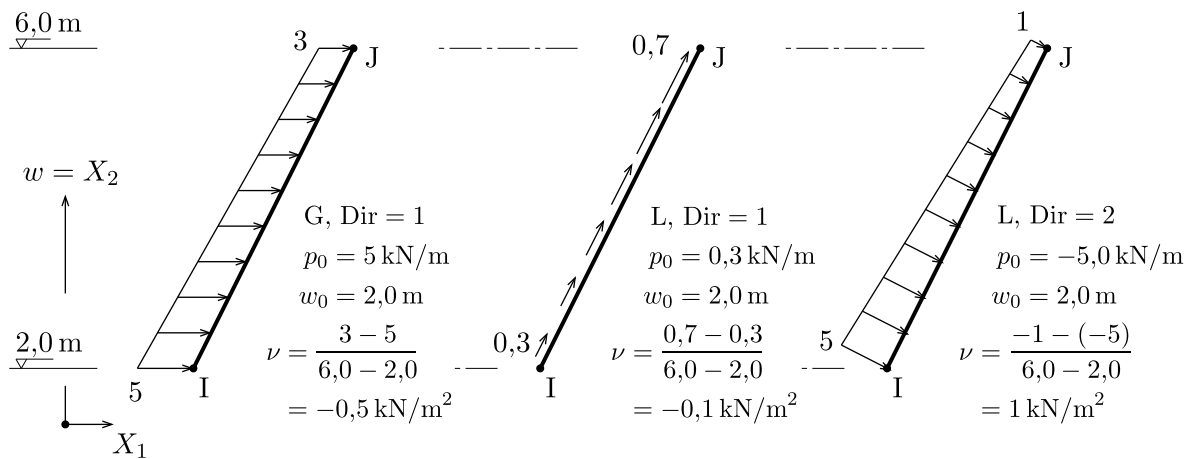


Fig. 1.9: Forças linearmente distribuídas especificadas em relação ao eixo $w \equiv X_2$.

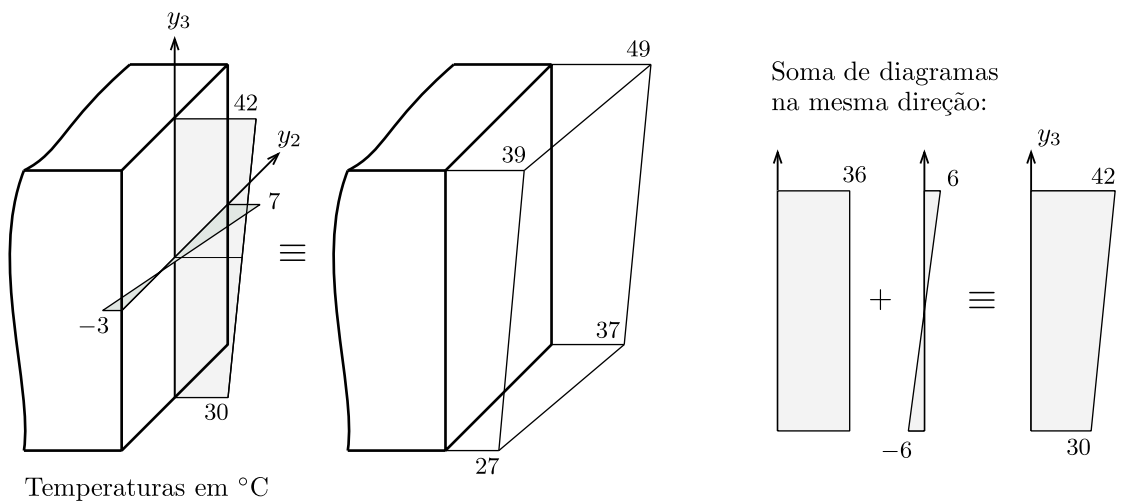


Fig. 1.10: Distribuição de temperaturas na seção.

1.12.3.3 Resultados

Esforços Solicitantes As convenções de sinais no arquivo de saída são diferentes das adotadas nos traçados dos diagramas. No arquivo, são listadas os esforços externos de extremidade que equili-

bram a barra isolada; enquanto nos diagramas, são traçados os esforços solicitantes considerando-se uma orientação única das seções da barra.

- a) Arquivo .out Os esforços nas extremidades I e J da barra são orientados de acordo com as direções dos eixos locais x_i (Fig. 1.11).

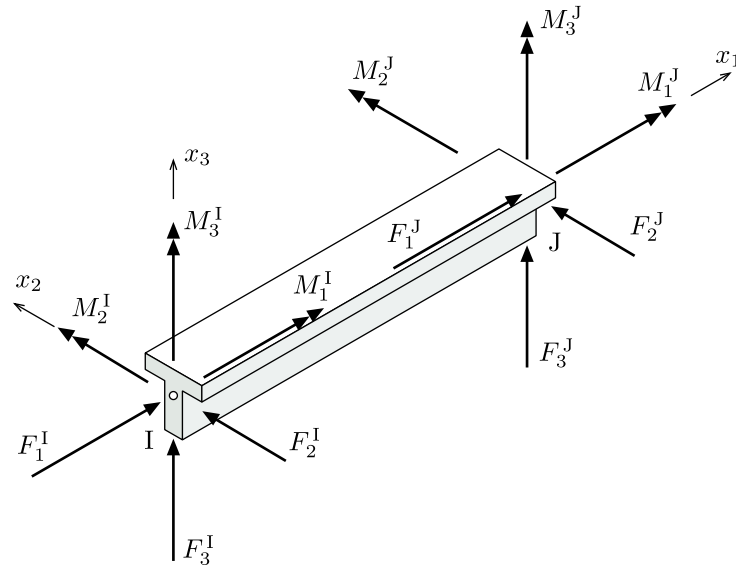


Fig. 1.11: Esforços nas Extremidades das Barras.

- b) Diagramas de Esforços Solicitantes Nas modelos 2D, as convenções de sinais dos diagramas seguem as da Resistência dos Materiais. Nos modelos 3D, os sentidos positivos das componentes da força cortante concordam com os dos eixos na seção transversal I vista segundo a direção de x_1 .

- Força Normal, $N > 0$ indica tração.
- Momento de Torção, $M_T > 0$ indica um vetor momento saindo da ST. M_T é igual ao momento axial M_1 quando o centro de gravidade coincide com o centro de cisalhamento.
- Força Cortante
Em 2D a força cortante tende a girar a seção no sentido horário. Em 3D, as hachuras nos diagramas têm as direções e os sentidos das componentes V_2 e V_3 da força cortante vistas segundo $+e_1$, ou seja, detrás do início da barra.
- Momento Fletor
Os diagramas das componentes M_2 e M_3 do momento fletor são sempre desenhados nos planos principais do lado tracionado da seção.

A convenção de força cortante positiva quando ela tende a girar a seção no sentido horário pode ser obtida em perspectivas cavaleiras ou isométricas para as orientações particulares dos eixos globais e das barras indicadas na Fig. 1.12. Para o problema da Fig. ??, em que a orientação das barras está indicada por flechas, o programa GiD fornece os diagramas da Fig. ?? em que os valores dos esforços e os sinais foram acrescentados posteriormente.

1.13 Elementos Finitos Sólidos (:BODY)

```
:BODY. % Solid elements
```

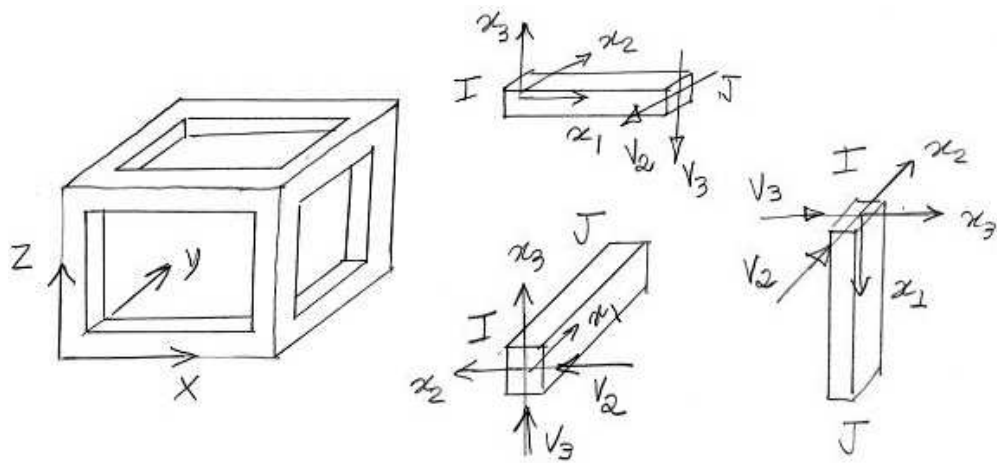


Fig. 1.12: Orientações dos eixos globais e locais que simulam a convenção de sinais da Resistência dos Materiais em 3D.

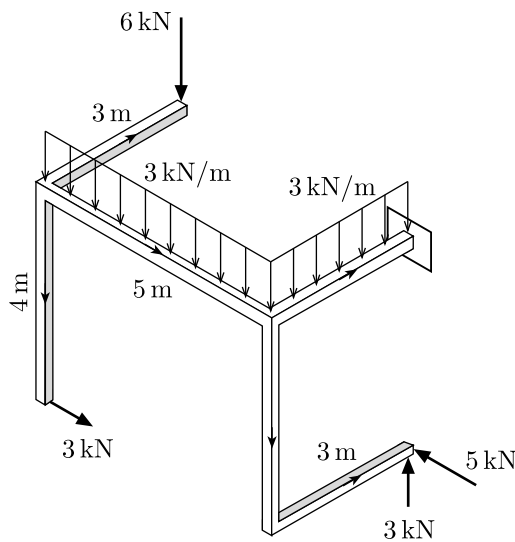


Fig. 1.13: Exemplo de problema tridimensional.

```
% nElemGrups   strElemType
      1   BodyGenrDisp
```

nElemGrups número total de grupos de elementos;
 strElemType título da formulação:
 BodyGenrDisp formulação em deslocamentos.

Parâmetros

```
%. . . . . < Triangles
% iGrup nElems strElem nNodes iAttrGrup fDensLoad
      1      2   Tria      6          1          0
```

Incidência

```
::CONN. % Connectivity
```

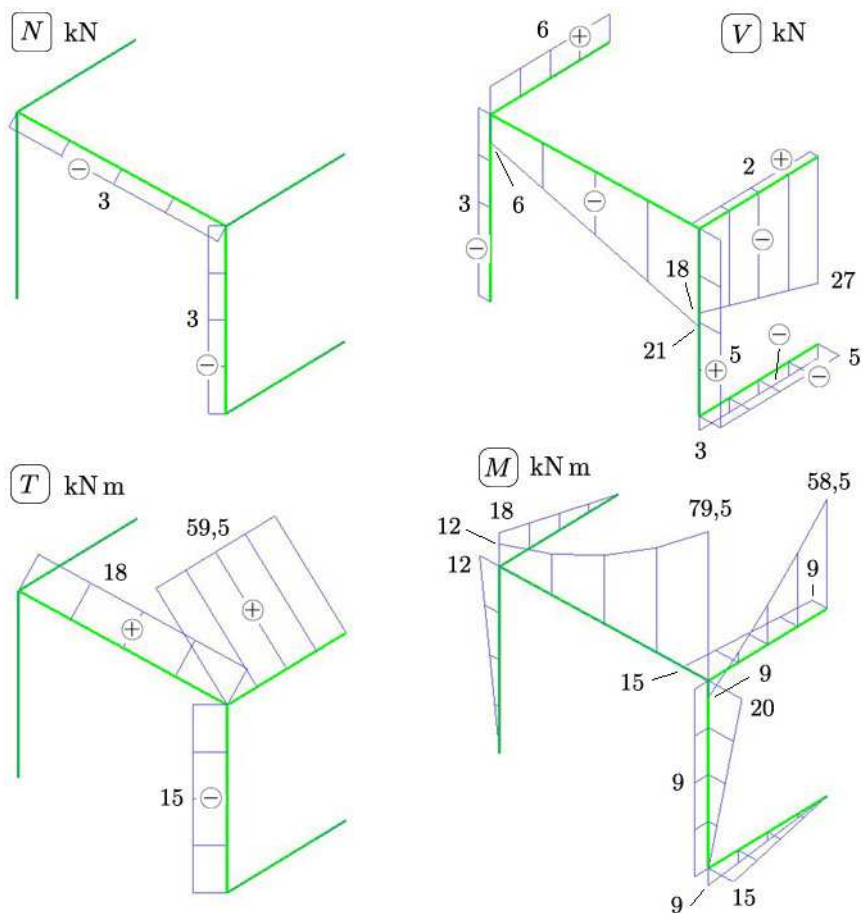


Fig. 1.14: Diagramas de esforços solicitantes.

```
% iElem  N1  N2  N3  N4  N5  N6  iAttr
           1   9   3   1   6   2   5   1
           2   7   9   1   8   5   4   1
% (CONN)
```

Término do Grupo O término de cada grupo de elementos deve ser indicado com a seguinte linha antes de passar para o próximo grupo ou bloco.

::END

1.13.1 Resultados

Tensões

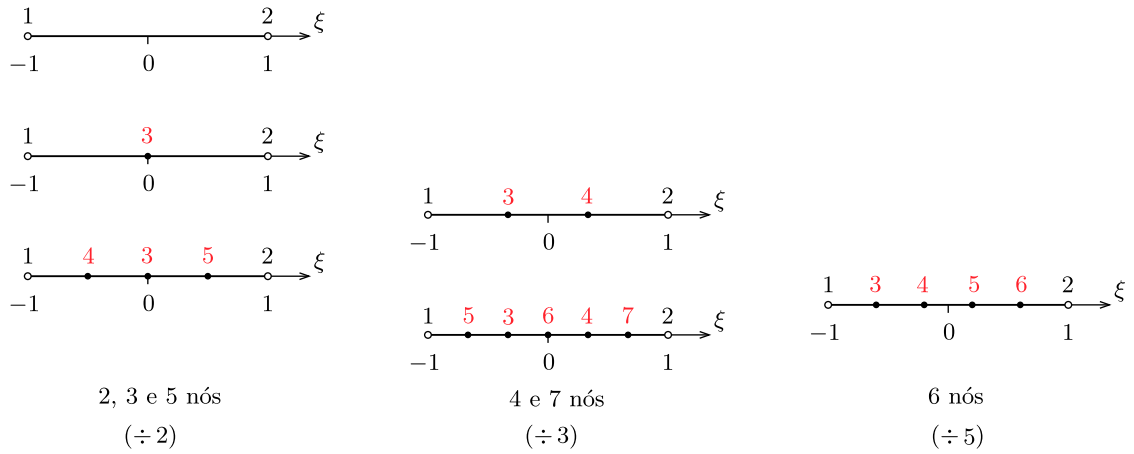


Fig. 1.15: Elementos lineares: numeração dos nós.

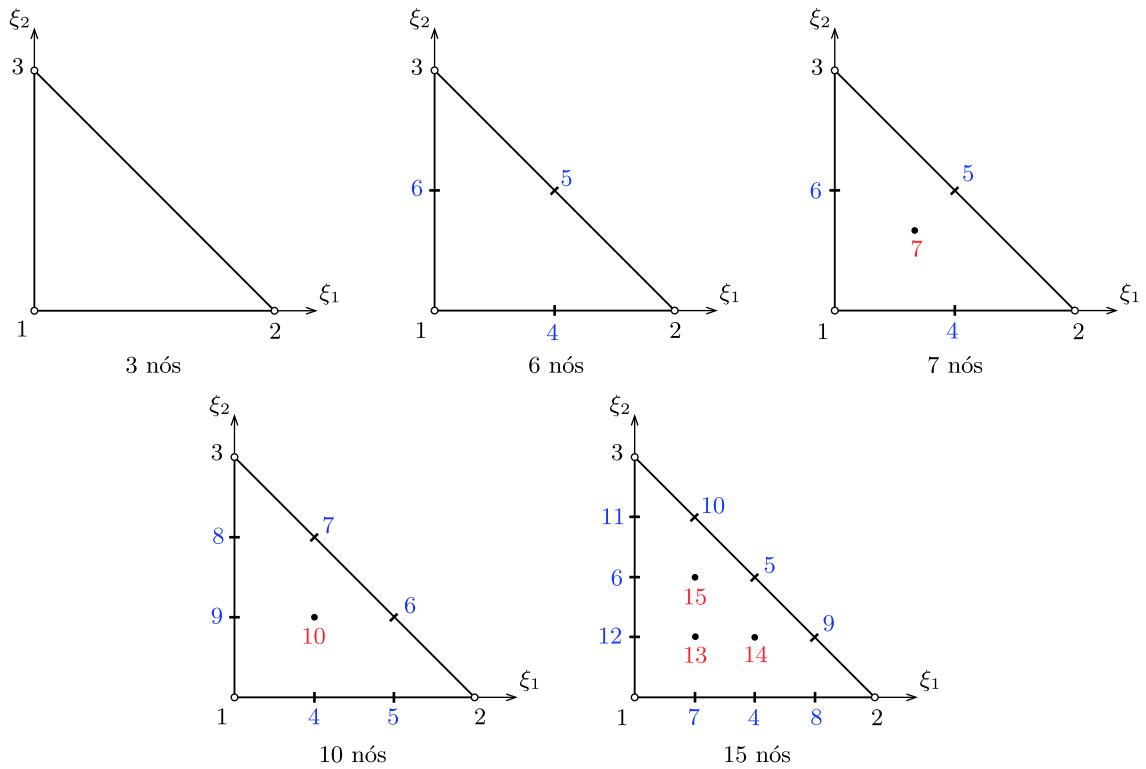


Fig. 1.16: Elementos triangulares: numeração dos nós.

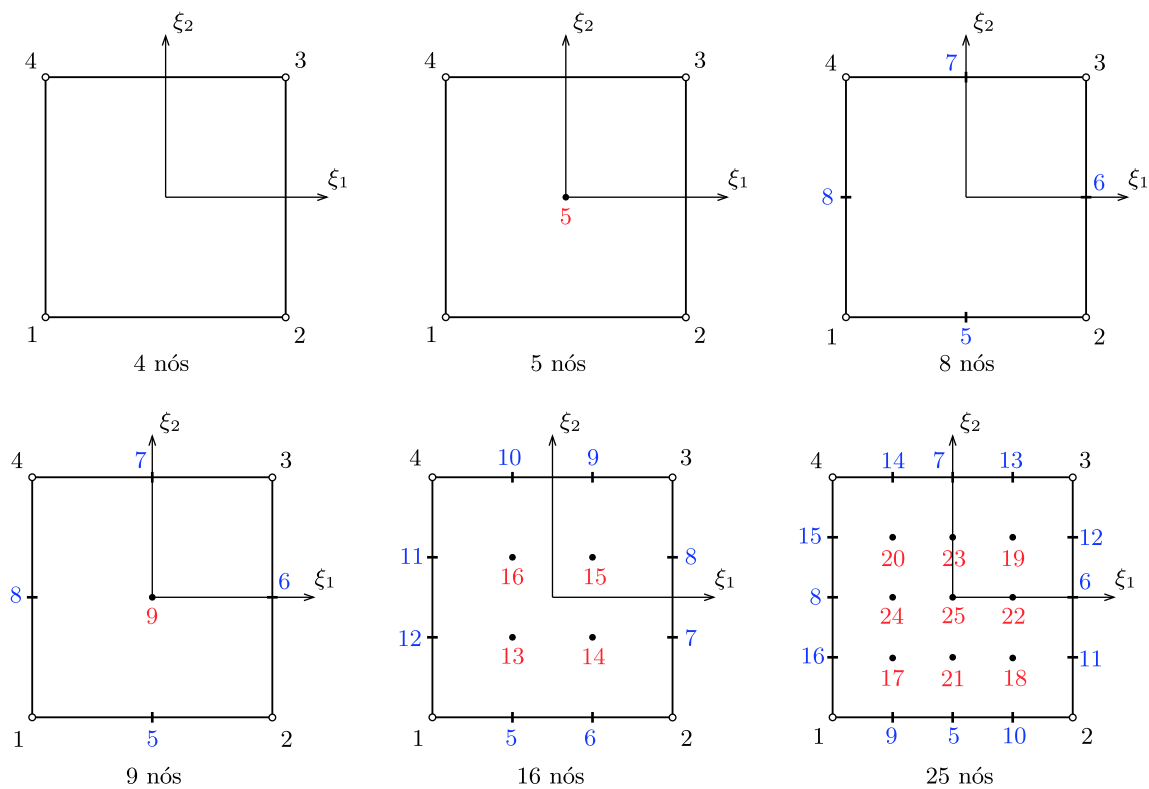


Fig. 1.17: Elementos quadrangulares: numeração dos nós.

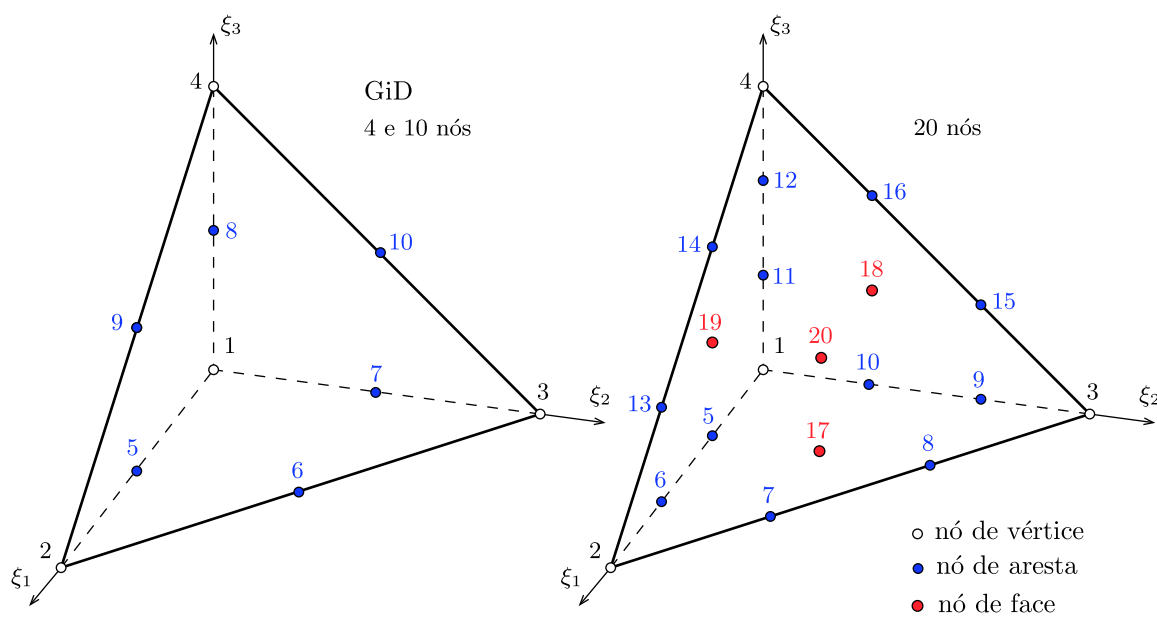


Fig. 1.18: Elementos tetraédricos: numeração dos nós.

1.14 Forças Distribuídas no Contorno (:DSTR)

As forças distribuídas no contorno da malha de elementos finitos, mais especificamente nas faces ou arestas⁵ dos elementos, são descritas separadamente dos elementos em que atuam. Isto é possível quando arestas e faces carregadas não são compartilhadas com outros elementos e a definição das forças prescinde das propriedades do material.

```
:DSTR. % Distributed loads
% nLoadGrups
      1
```

Parâmetros

```
%. . . . .< Distributed Load
% iGrup  iLoad  nSides  strGeom  nNodes  RefrCoor  iCoorDir
      1      3      5      Line      3      20.0      3
```

Relação dos parâmetros:

iGrup número do grupo de lados (faces ou arestas);
iLoad número do carregamento a que esse grupo se refere;
nSides número de lados em que são aplicadas as forças;
strGeom geometria dos lados (**Line**, **Tria**, **Quad**);
nNodes número de nós em cada lado;
RefrCoor coordenada de referência que define a pressão hidrostática;
iCoorDir eixo global ao qual se refere a coordenada RefrCoor.

O número de lados ou faces com cargas distribuídas, **nSides**, é obtido quando a lista termina com uma linha contendo o número zero.

Forças

```
% iSide  Syst  Type  iDir  iProj      q      NodeList
      1      G  UNIF   2      0     -2.000      9      7      8
      2      L  UNIF   1      0      1.000      5      9      6
      3      L  LINR   1      0      1.000      9      7      8
      4      G  PROJ   1      2      1.000      9      7      8
      5      G  PROJ   2      2      1.000      9      7      8
      0
% iSide  Syst  Type  iDir  iProj      q0      w0      nu      NodeList
      6      G  LEVL   1      2      5.000      2.00  -1.0     11      9      10
      7      G  LEVL   1      2      5.000      2.00  -1.0     13     11     12
      0
% (DSTR)
```

Relação dos dados:

iSide número sequencial do lado (face ou aresta);
Syst sistema de coordenadas (**G**: global, ou **L**: local; no sistema local **iDir**= 1 corresponde à direção da normal externa ao contorno);

⁵A seguir usaremos o termo *lado* para designar genericamente arestas de elementos bidimensionais e faces de elementos tridimensionais

Type	tipo de força distribuída (os tipos estão descritos a seguir);
iDir	direção da força;
iProj	PROJ: direção da normal ao plano de projeção (iProj= 1, 2, 3 corresponde às direções globais, com iProj= 0 nos demais tipos); LEVL: direção do gradiente da força distribuída;
q	UNIF e PROJ: força distribuída por unidade de superfície ($[F]/[L]^2$), exceto no caso de estado plano de tensão em que a força distribuída é fornecida por unidade de comprimento ($[F]/[L]$); HIDR e LINR: variação da magnitude da força por unidade de comprimento;
w0	coordenada no eixo global iProj associada ao valor q da força;
nu	gradiente da força distribuída segundo o eixo global iProj;
NodeList	conectividade dos nós do lado contendo nNodesPerSide nós;

O contorno carregado é descrito pelas arestas ou faces que o compõem. As conectividades das arestas e faces seguem as convenções dos elementos unidimensionais e bidimensionais, respectivamente. As arestas dos elementos bidimensionais devem ser percorridas no sentido anti-horário; em decorrência, os contornos externos são percorridos no sentido anti-horário e os internos, no sentido horário. A conectividade das faces dos elementos tridimensionais obedecem a regra da mão direita com a orientação voltada para o interior do elemento .

Quanto aos tipos de força distribuída, estão disponíveis:

UNIF força na direção iDir distribuída uniformemente no lado do elemento; q é positiva no sentido de iDir;

HYDR força normal ao contorno distribuída linearmente no lado do elemento (Syst= L, iDir= 1); q é a variação por unidade de comprimento no eixo iCoorDir da distribuição linear que se anula a partir da coordenada RefrCoor nesse eixo; corresponde ao carregamento de pressão hidrostática sem forças acima do nível RefrCoor;

LINR força linearmente distribuída no lado de um elemento, $t = q(w_{ref} - w)$, onde q é a variação por unidade de comprimento no eixo iCoorDir da distribuição linear que troca de sinal na coordenada $w_{ref} = \text{RefrCoor}$ nesse eixo (adote Syst= L e iDir= 1 para uma força normal ao contorno);

PROJ força na direção global iDir uniformemente distribuída na superfície normal à direção global iProj; o sentido positivo de q concorda com o do respectivo eixo global conforme indicado na Fig. 1.19.

LEVL força distribuída com intensidade $t = q + \nu(w - w_0)$ aplicada na direção iDir (G, L), em que q é o valor da força na coordenada w_0 medida sobre o eixo global iProj e nu é a variação por unidade de comprimento ao longo desse eixo;

Para as forças distribuídas normais ao contorno, valores positivos de q indicam tração e valores negativos, compressão. Para as forças projetadas, valores positivos de q concordam com o sentido da normal ao lado (aresta ou face), Fig. 1.19, e podem mudar de sinal no lado de um elemento quadrático para permitir a definição da força em linhas ou superfícies curvas. No caso da pressão hidrostática, são ignorados os valores aplicados acima do nível RefrCoor, independentemente do sinal da força.

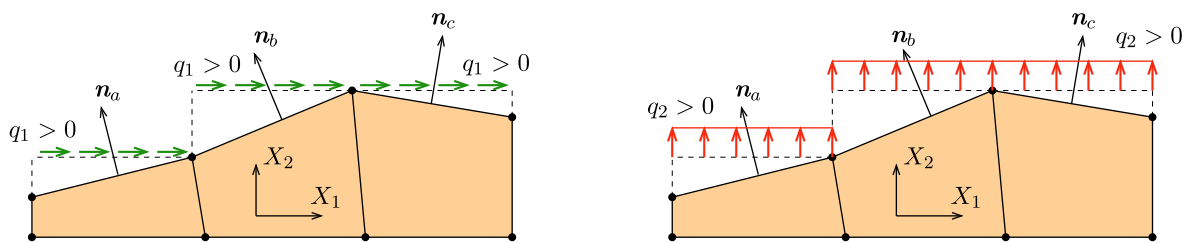


Fig. 1.19: Sentidos positivos das forças nas direções dos eixos X_1 e X_2 e uniformemente distribuídas na superfície normal à direção X_2 [PROJ]. A normal n depende da conectividade do lado e pode ter sentido oposto ao da normal externa a um elemento.