

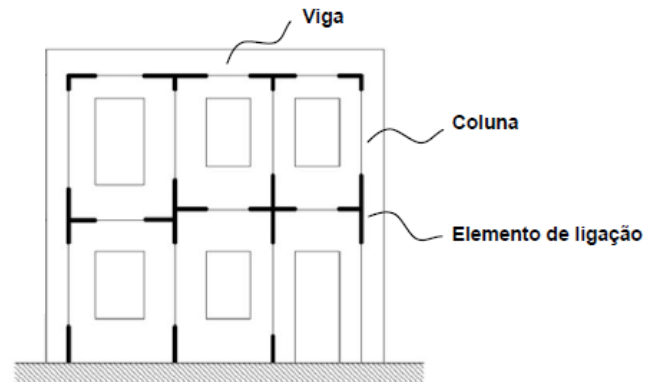
MODELAÇÃO NÃO LINEAR DE EDIFÍCIOS

**Exemplo de modelação e
análise estática não linear de uma
Parede de Alvenaria em SAP2000**

Ana Simões, Rita Bento

Objectivos:

1. Modelação de uma parede de alvenaria através de um **pórtico equivalente** constituído por colunas e vigas definidas por elementos de barra susceptíveis de deformações de corte e flexão.
2. Definição do comportamento não linear da alvenaria através de rótulas plásticas (*plastic hinges*).
3. Determinação das curvas de capacidade da estrutura.



Exemplo de modelação e análise estática não linear de uma Parede de Alvenaria em SAP2000

1. Definição da Geometria
2. Definição do Material
3. Comportamento Não Linear
4. Análise Estática Não Linear (*Pushover*)
5. Referências

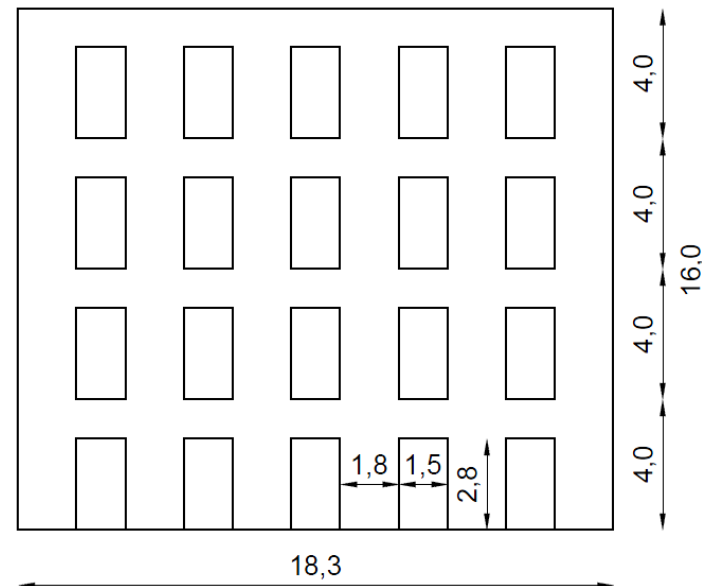
1. Definição da Geometria



Pombalino



Gaioleiro



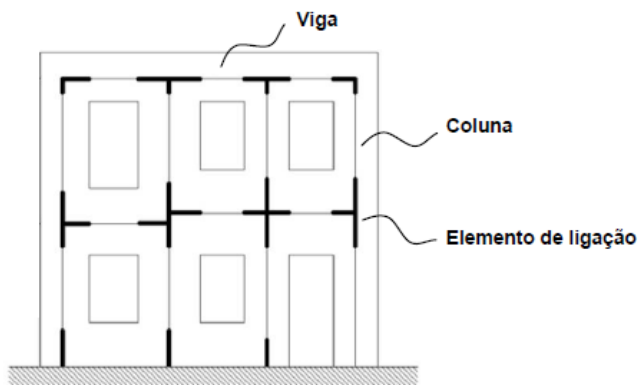
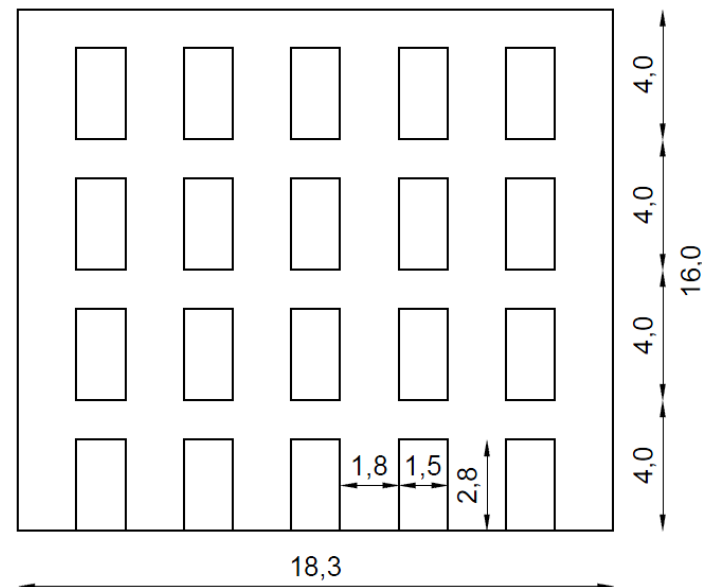
1. Definição da Geometria



Pombalino



Gaioleiro



A parede é modelada através de um pórtico equivalente onde cada nêmo e lintél de alvenaria é definido através de um macro-elemento (elemento de barra).

O modelo fica definido por conjunto de **colunas** e **vigas**, ligadas entre si através de **elementos de ligação rígidos**.

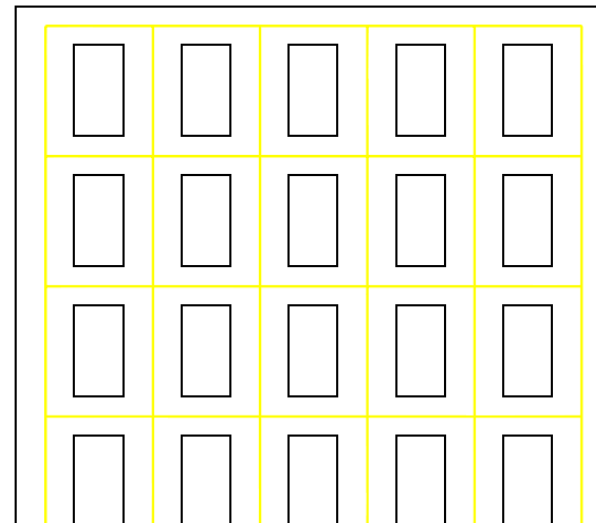
1. Definição da Geometria



Pombalino



Gaioleiro



Pórtico Equivalente

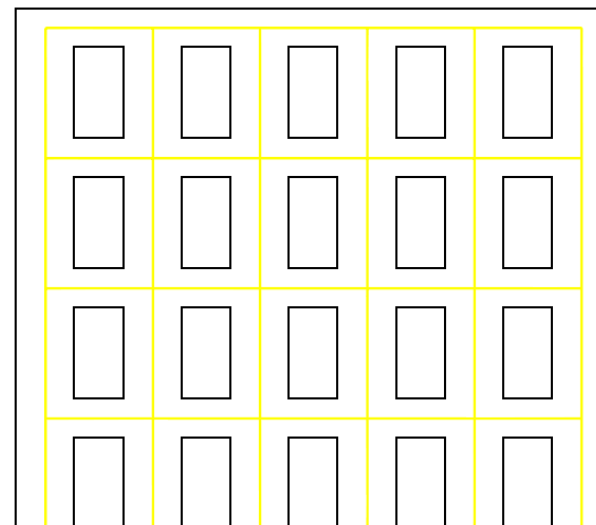
1. Definição da Geometria



Pombalino

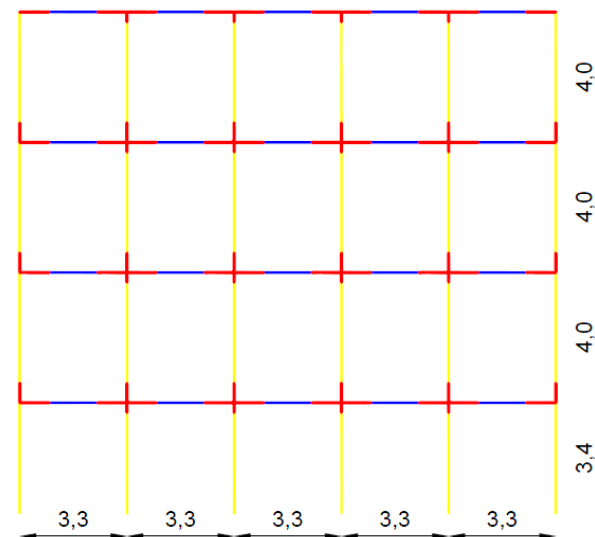


Gaioleiro

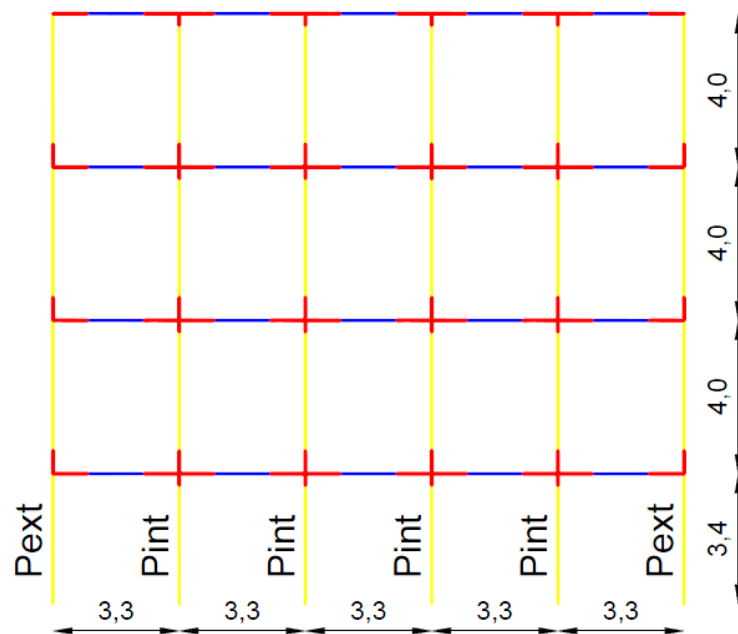


Pórtico Equivalente

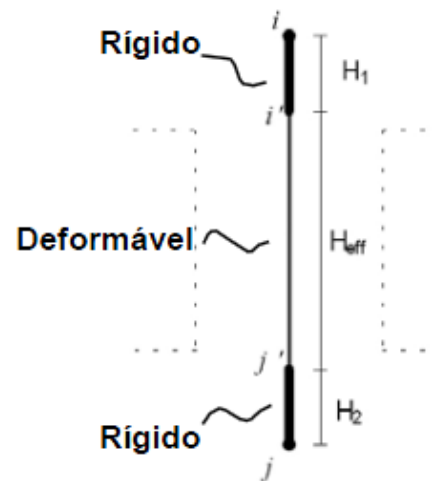
- Colunas (*Piers*)
- Vigas (*Spandrels*)
- Nós Rígidos (*Rigid Nodes*)



1. Definição da Geometria



Colunas (Piers)



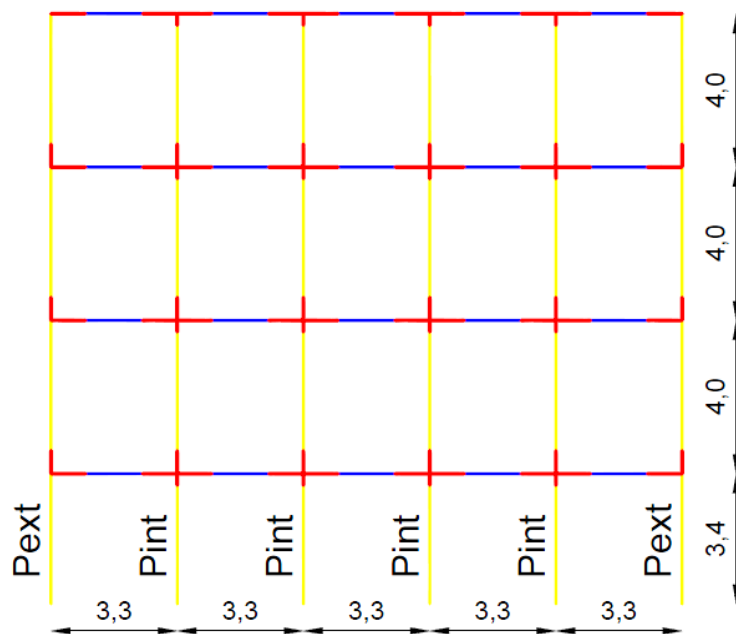
Colunas	D (m)	\bar{H} (m)	h' (m)	H_{eff} (m)
P_{ext}	1,80	4,00	3,30	3,40
P_{int}	1,80	4,00	2,80	3,10

Vigas	h (m)	L (m)	L_{eff} (m)
	1,20	3,30	1,50

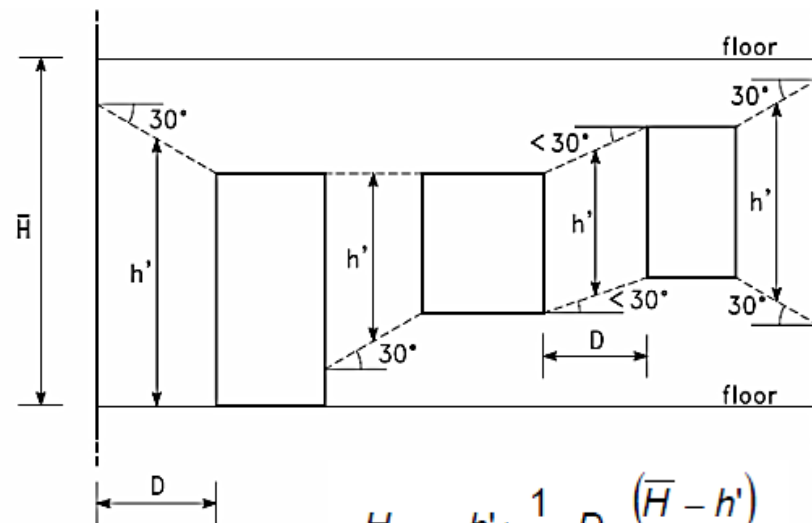
H_{eff} – Altura Deformável

H_1 e H_2 – Altura Rígida (ligação)

1. Definição da Geometria



Colunas (Piers)



$$H_{eff} = h' + \frac{1}{3} \cdot D \cdot \frac{(\bar{H} - h')}{h'}$$

Colunas	D (m)	\bar{H} (m)	h' (m)	H_{eff} (m)
P_{ext}	1,80	4,00	3,30	3,40
P_{int}	1,80	4,00	2,80	3,10

Vigas	h (m)	L (m)	L_{eff} (m)
	1,20	3,30	1,50

H_{eff} – Altura eficaz

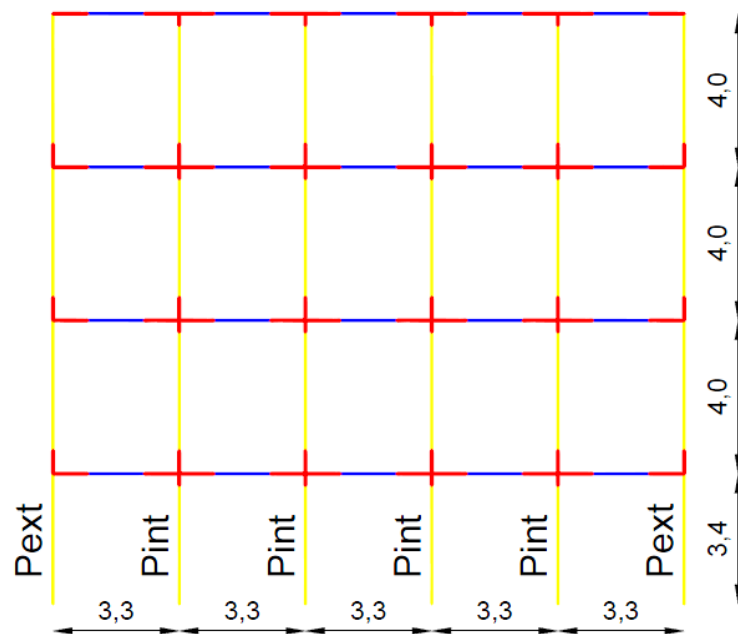
h' – Altura resultante das relações geométricas

\bar{H} – Altura entre pisos

D – Largura da coluna

(Dolce, 1989)

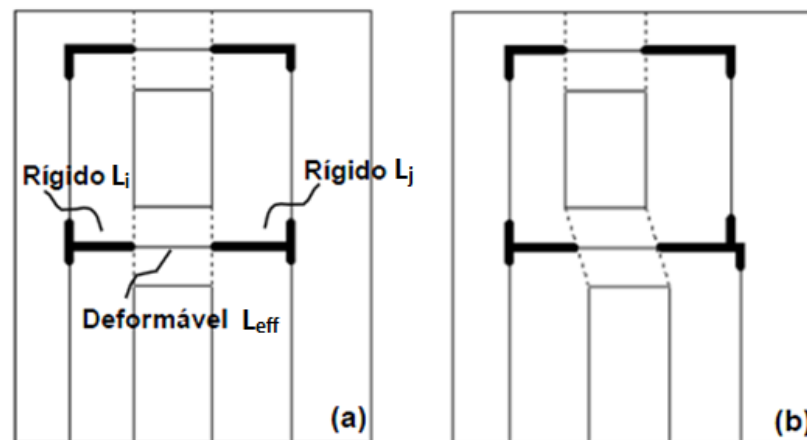
1. Definição da Geometria



Colunas	D (m)	\bar{H} (m)	h' (m)	H_{eff} (m)
P_{ext}	1,80	4,00	3,30	3,40
P_{int}	1,80	4,00	2,80	3,10

Vigas	h (m)	L (m)	L_{eff} (m)
	1,20	3,30	1,50

Vigas (*Spandrels*)

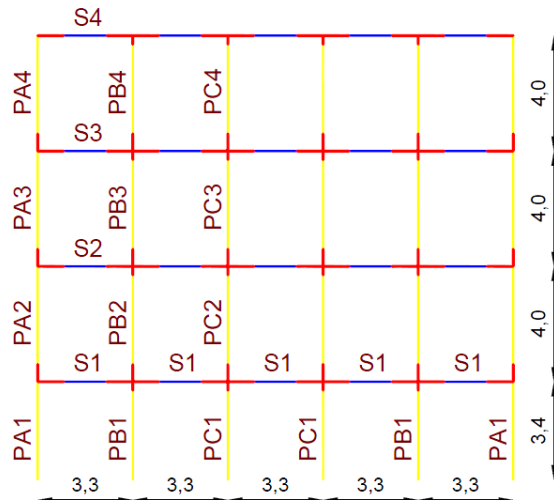


(a) Aberturas alinhadas

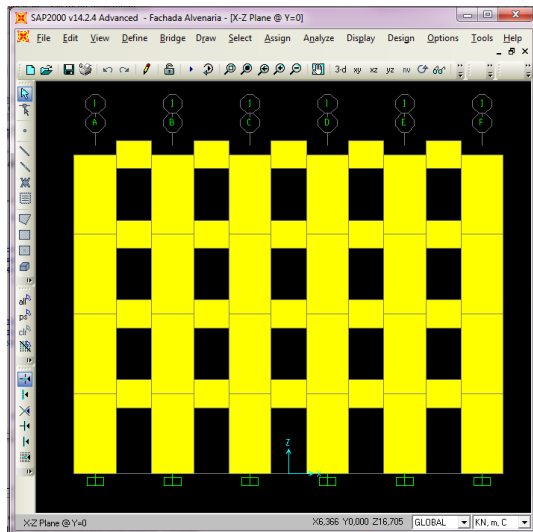
(b) Aberturas desalinhas

L_{eff} – Comprimento Deformável

1. Definição da Geometria



Colunas	D (m)	\bar{H} (m)	h_i (m)	h_j (m)	H_{eff} (m)	t (m)
PA4	1,80	4,00	0,6	0	3,40	0,65
PB4	1,80	4,00	0,6	0,3	3,10	0,65
PA3	1,80	4,00	0,6	0	3,40	0,70
PB3	1,80	4,00	0,6	0,3	3,10	0,70
PA2	1,80	4,00	0,6	0	3,40	0,75
PB2	1,80	4,00	0,6	0,3	3,10	0,75
PA1	1,80	3,40	0	0	3,40	0,80
PB1	1,80	3,40	0	0,3	3,10	0,80



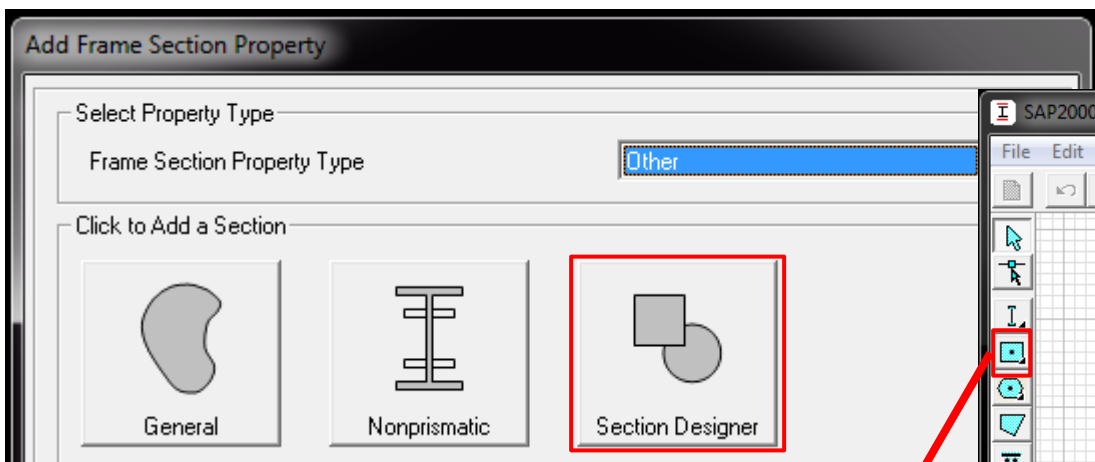
Vigas	D (m)	L (m)	L_i (m)	L_j (m)	L_{eff} (m)	t (m)
S4	1,20	3,30	0,9	0,9	1,50	0,65
S3	1,20	3,30	0,9	0,9	1,50	0,70
S2	1,20	3,30	0,9	0,9	1,50	0,75
S1	1,20	3,30	0,9	0,9	1,50	0,80

- Definir a geometria do pórtico no programa SAP2000
- Colunas e Vigas modeladas com elementos de barra

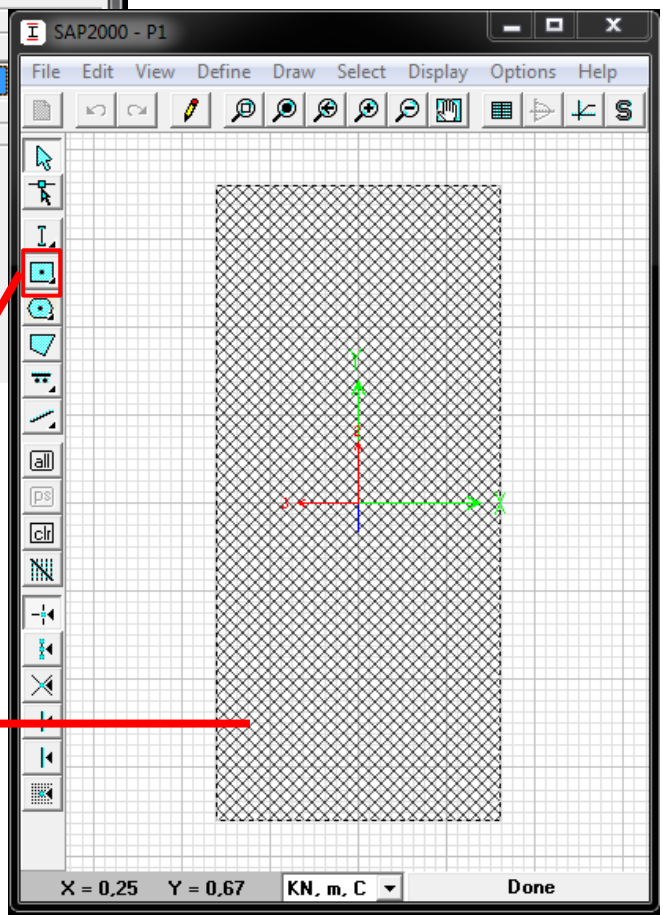
1. Definição da Geometria

Define > Sections Properties > Frame Sections > Add New Property...

Coluna PA1 e PA2



Draw Solid Shape



Shape Properties - Solid

Name	Rectangle1
Material	Alvenaria
Color	
X Center	0,
Y Center	0,
Height	1,8
Width	0,8
Rotation	0,

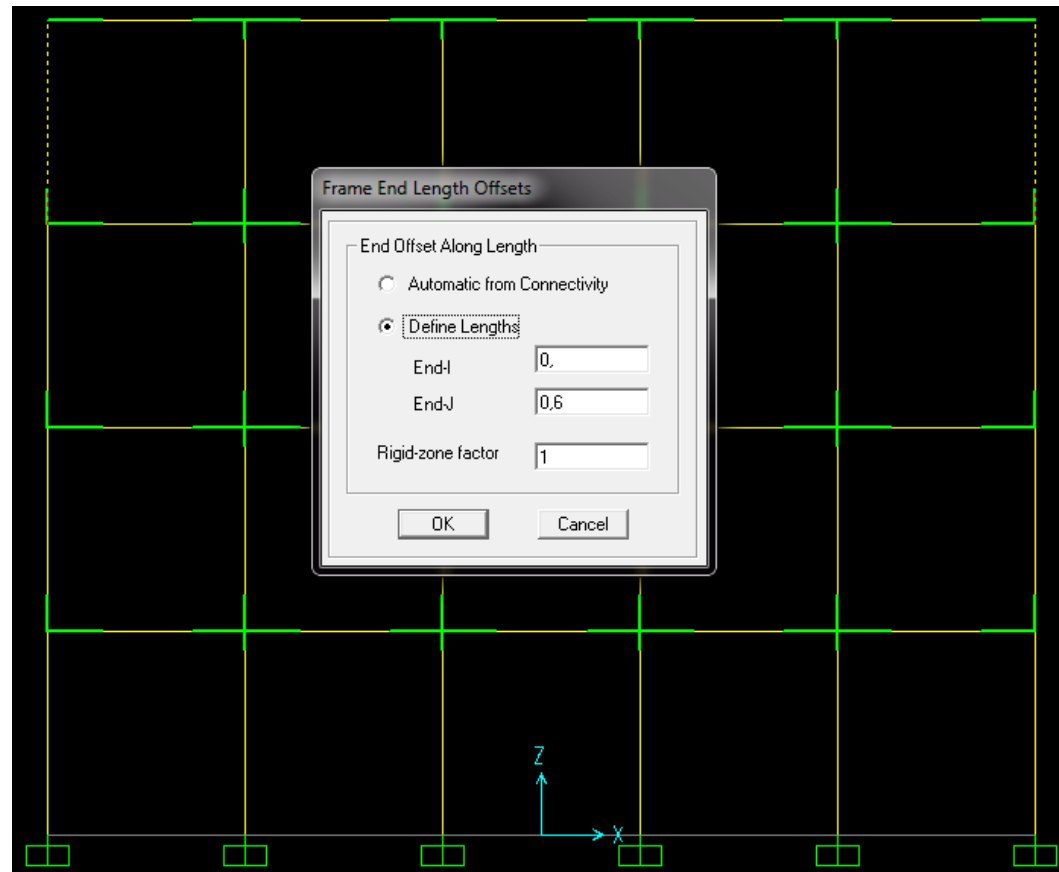
1. Definição da Geometria

— Nós Rígidos (*Rigid Nodes*)

Seleccionar barra > Assign > Frame > End (Length) Offsets...

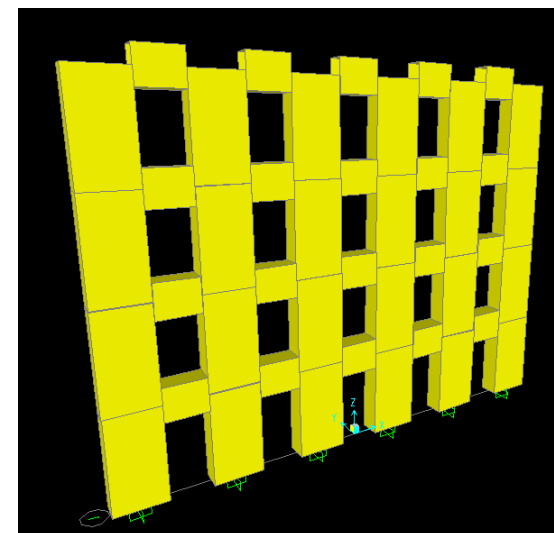
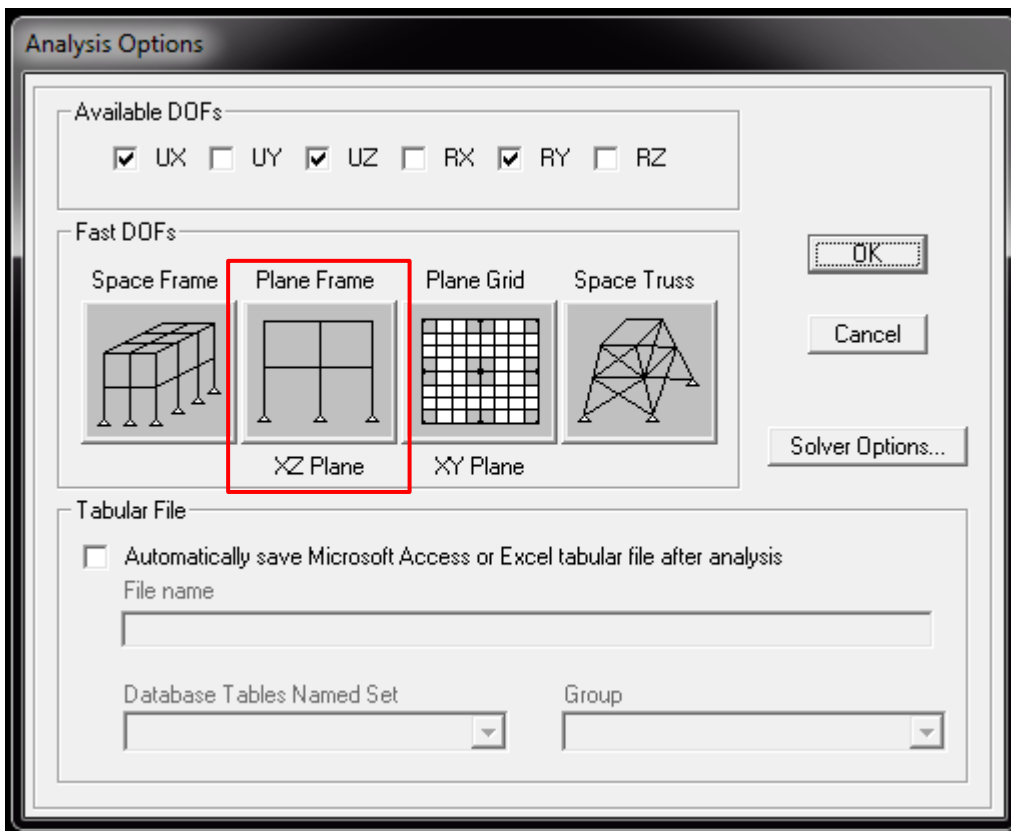
Colunas: h_i e h_j

Vigas: L_i e L_j



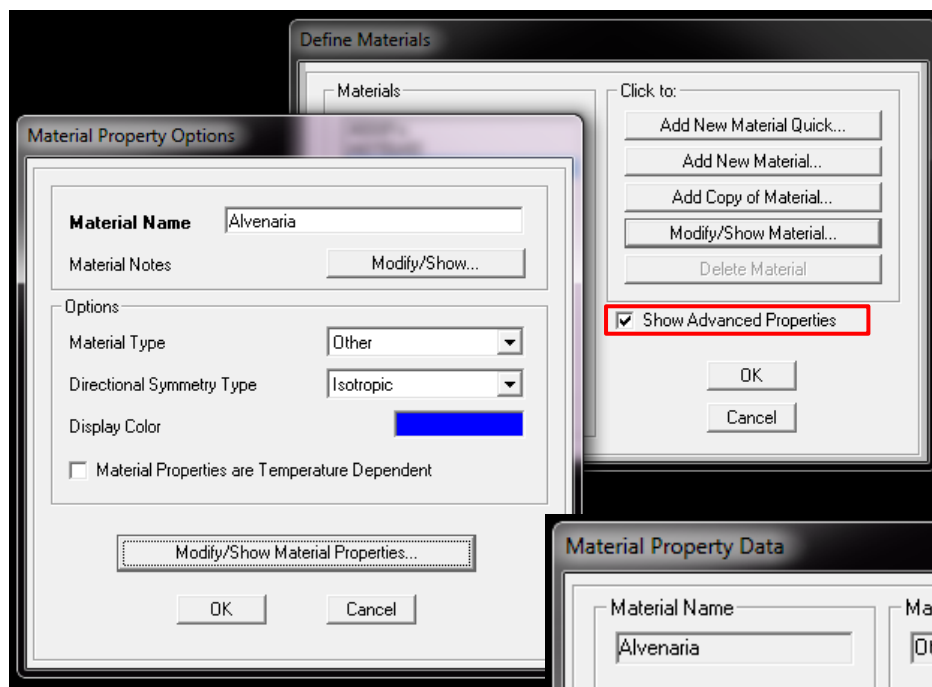
1. Definição da Geometria

Analyse > Set Analysis Options...

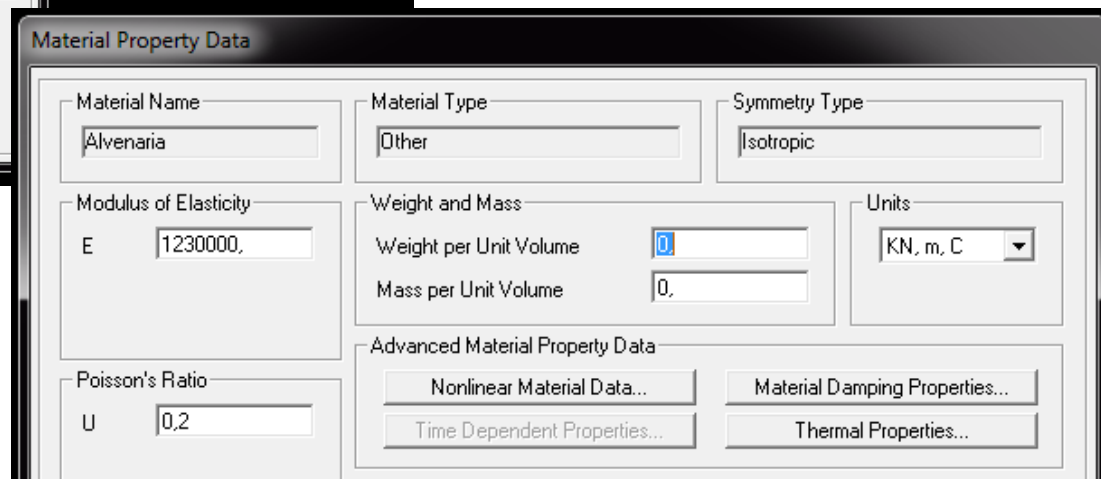


2. Definição do Material

Define > Materials > Add New Material

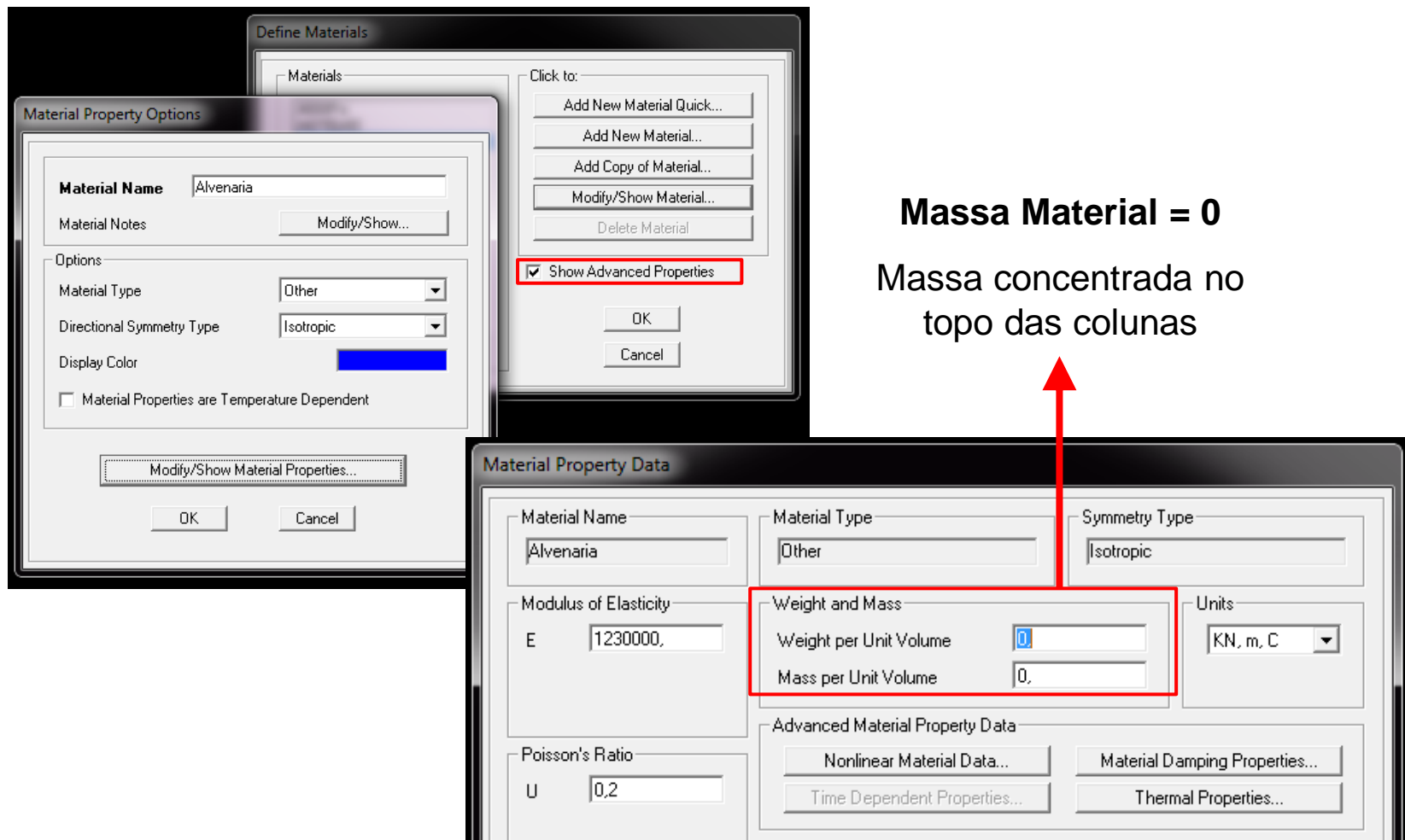


Alvenaria de Pedra Irregular		
Peso Volúmico	γ (kN/m ³)	20
Módulo de Elasticidade	E (kN/m ²)	1230000
Coefficiente de Poisson	ν	0,2
Resistência Compressão	f_c (kN/m ²)	2500
Resistência Corte por Fendilhação Diagonal	τ_o (kN/m ²)	43
Resistência Corte por Deslizamento	c_u (kN/m ²)	82
	μ	0,56



2. Definição do Material

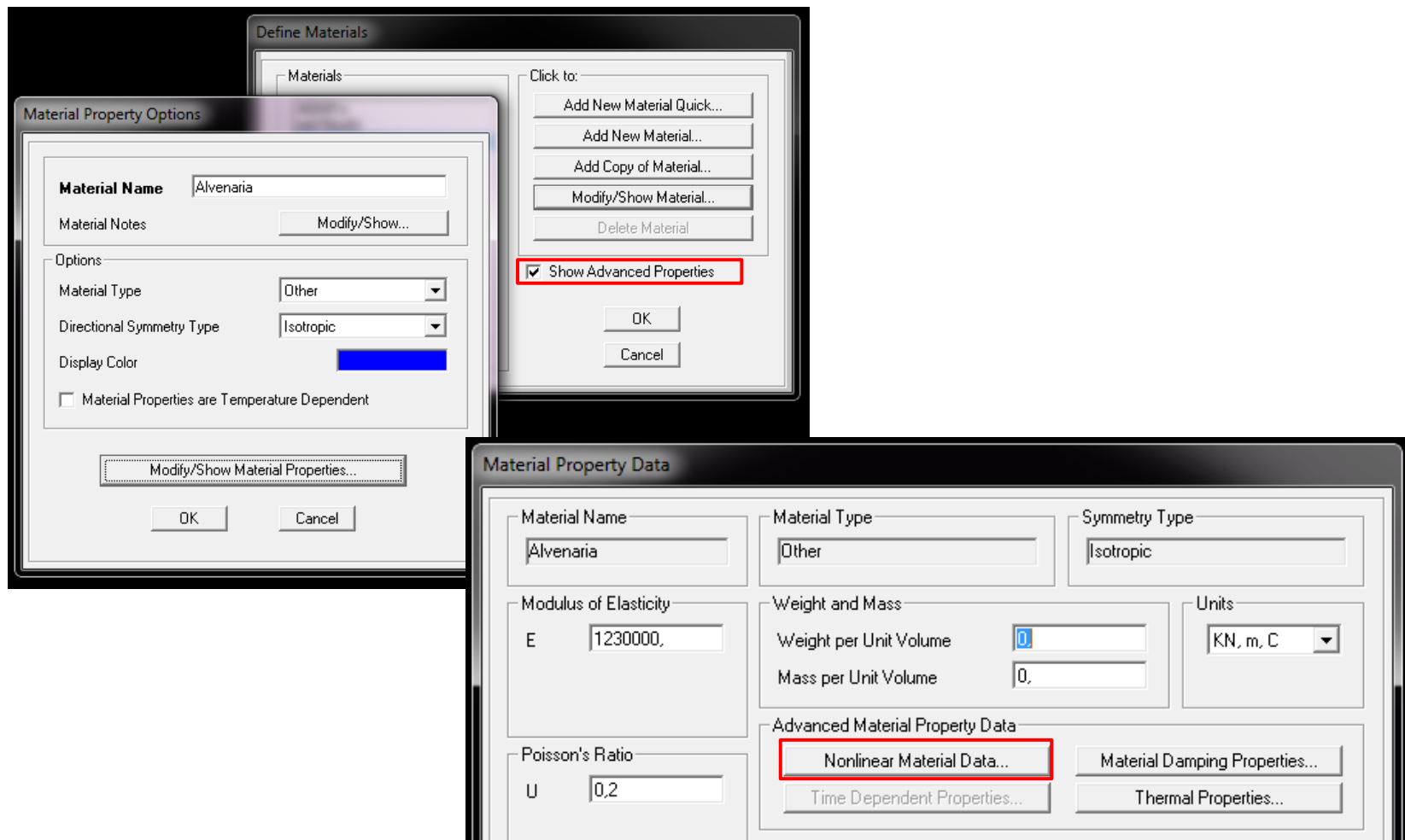
Define > Materials > Add New Material



Massa Material = 0
Massa concentrada no topo das colunas

2. Definição do Material

Define > Materials > Add New Material > Nonlinear Material Data...



2. Definição do Material

Define > Materials > Add New Material > Nonlinear Material Data...

Nonlinear Material Data

Edit

Material Name: Alvenaria Material Type: Other

Hysteresis Type: Takeda

Drucker-Prager Parameters:
 Friction Angle: 0,
 Dilatational Angle: 0,

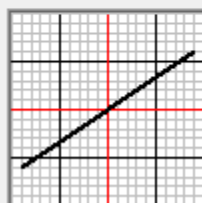
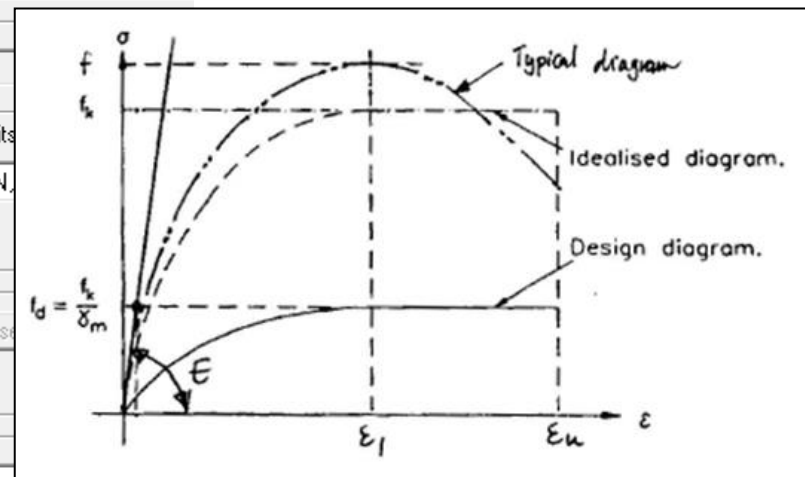
Units: KN

Stress-Strain Curve Definition Options:
 Parametric
 User Defined

User Stress-Strain Curve Data

Number of Points in Stress-Strain Curve: 3

	Strain	Stress	Point ID
1	-2,033E-03	-2500,	
2	0,	0,	A
3	2,033E-03	2500,	

Relação Tensão – Deformação

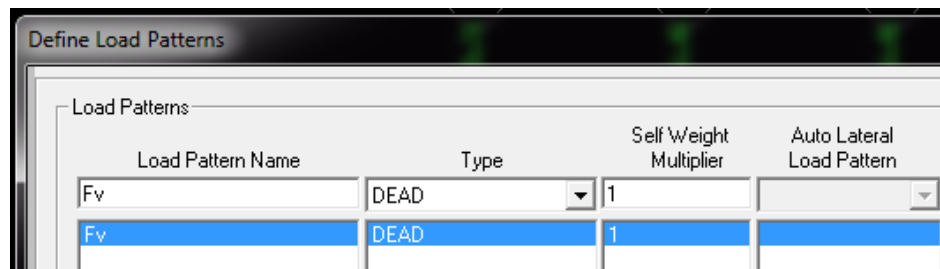
Diagrama parábola – rectângulo (Eurocódigo 6)

$$\epsilon = f_d / E = 2500 / 1230000 = 2,033E-03$$

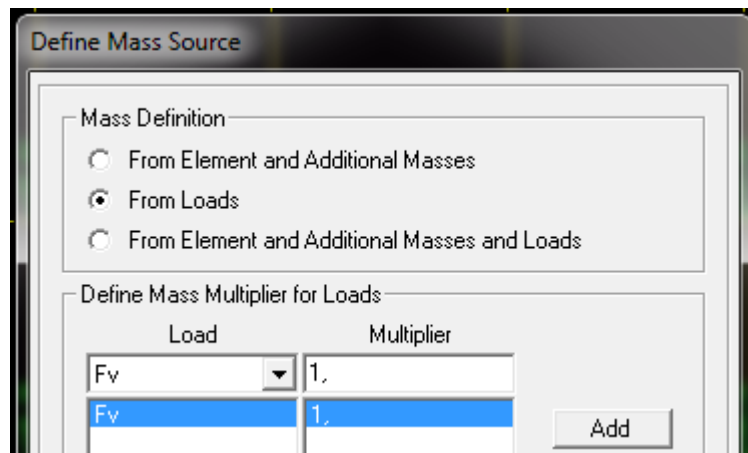
2. Definição do Material

Massa Material = 0 > Massa concentrada no topo das colunas

Define > Load Pattern



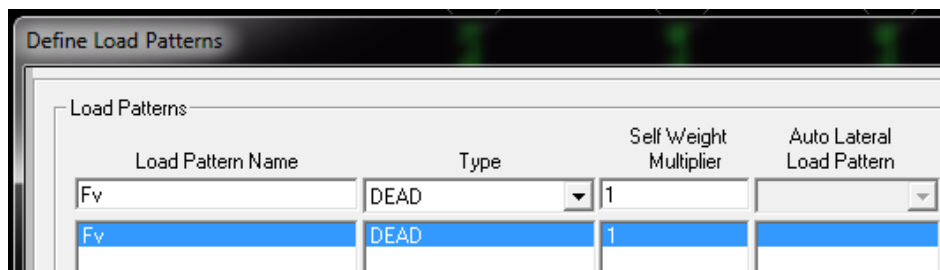
Define > Mass Source



2. Definição do Material

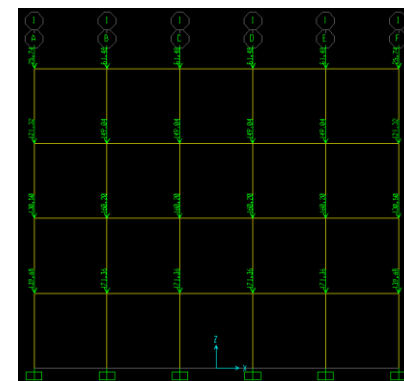
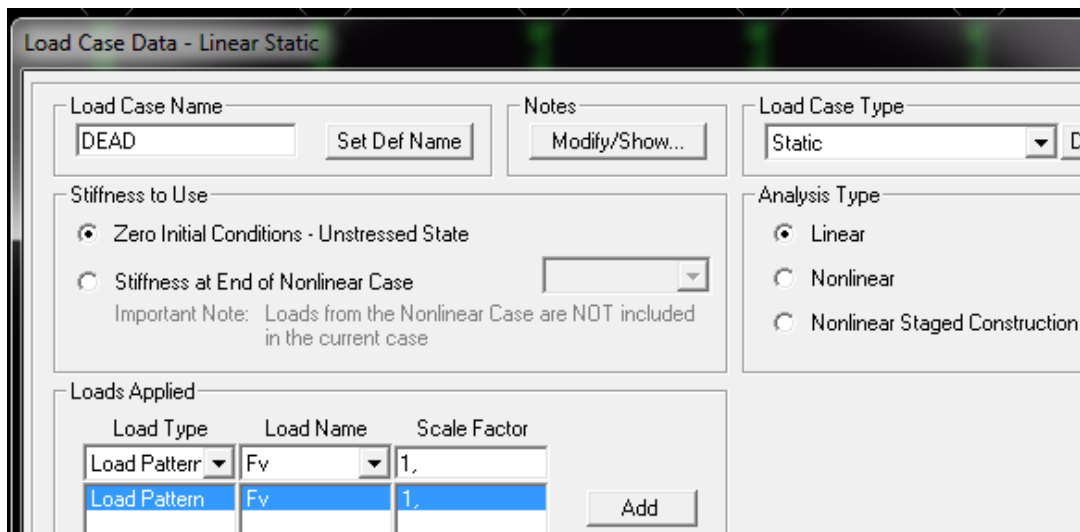
Massa Material = 0 > Massa concentrada no topo das colunas

Define > Load Pattern



Colunas	F _v (kN)
PA4	25,74
PB4	51,48
PA3	121,32
PB3	149,04
PA2	130,50
PB2	160,20
PA1	139,68
PB1	171,36

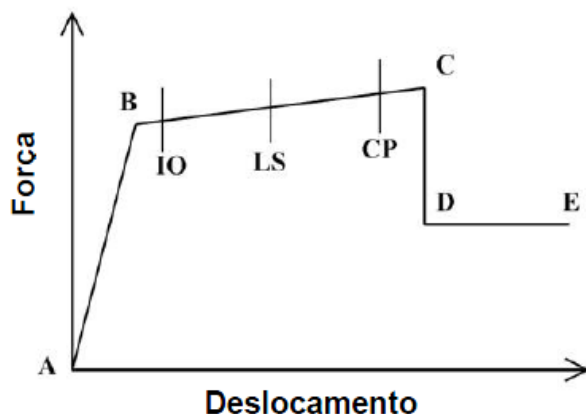
Define > Load Cases



3. Comportamento Não Linear

O programa SAP2000 permite modelar o comportamento não linear que resulta das características geométricas da estrutura ou das propriedades mecânicas dos materiais através de rótulas plásticas (*plastic hinges*).

- Modelação do comportamento de cedência e pós-cedência.
- Definidas em qualquer ponto da barra.
- Possível coexistência de rótulas na mesma posição.

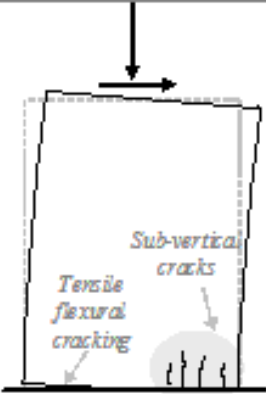
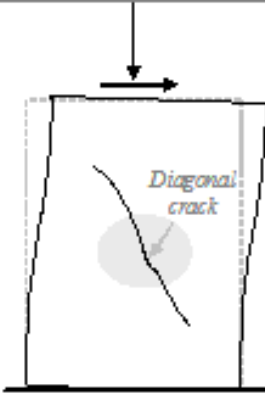
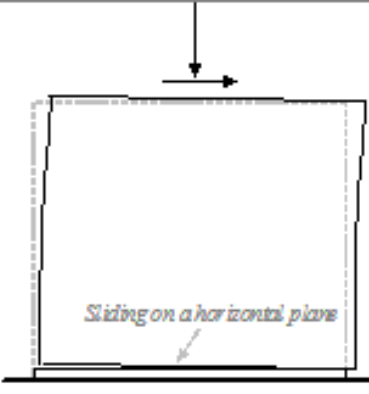


- A – Origem do referencial
- B – Cedência (início das deformações na rótula)
- C – Força Última
- D – Força Residual
- E – Colapso

Deformação (indicativo): IO – Immediate Occupancy; LS – Life Safety; CP – Collapse Prevention

3. Comportamento Não Linear

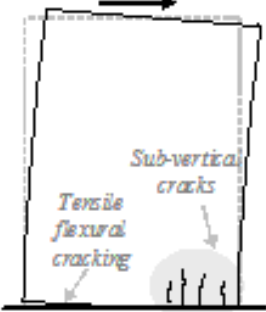
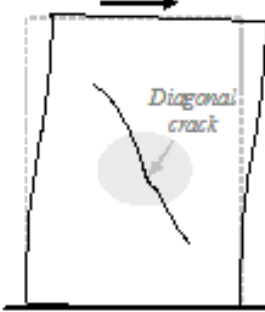

Resistência última das colunas (nembos) de alvenaria a acções no plano

ROTURA POR FLEXÃO	ROTURA POR CORTE	
Derrubamento Esmagamento	Fendilhação Diagonal	Deslizamento
		
$M_u = \frac{\sigma_o D^2 t}{2} \left(1 - \frac{\sigma_o}{k f_d} \right)$	$V_{u,f_diag} = \frac{1.5 \tau_o D t}{b} \sqrt{1 + \frac{\sigma_o}{1.5 \tau_o}}$ <p>Teoria de Turnsek & Cacovic</p>	$V_{u,desliz} = \frac{1.5 c_u + \sigma_o \mu}{1 + \frac{3H'}{\sigma_o D}} D t$ <p>Teoria de Mohr-Coulomb</p>

σ_o – tensão normal de compressão; D – largura da coluna; t – espessura da coluna; f_d – tensão máxima de compressão; k – factor de distribuição da tensão normal equivalente a rectângulo (0,85); τ_o – tensão de corte diagonal máxima (TC); $b = H/D$ ($1 \leq b \leq 1,5$); c_u – coesão; μ – coeficiente de atrito; H' – comprimento secção comprimida.

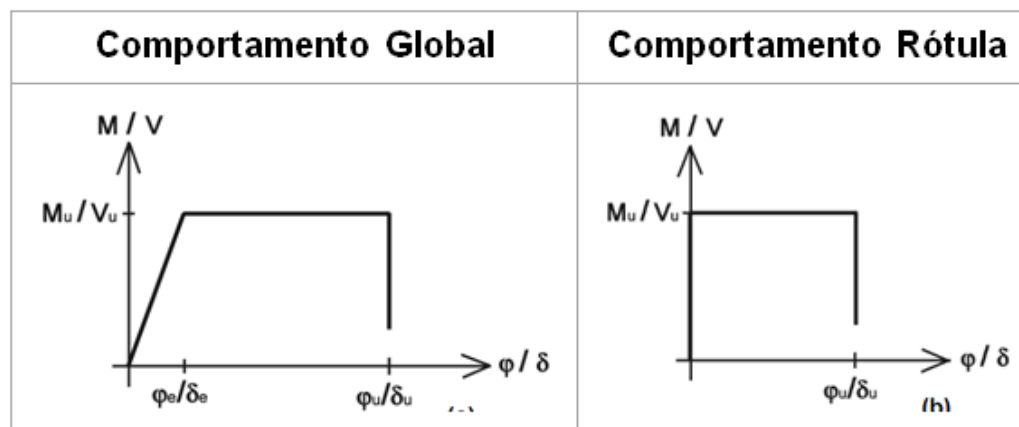
3. Comportamento Não Linear

Resistência última das colunas (nembos) de alvenaria a acções no plano

ROTURA POR FLEXÃO	ROTURA POR CORTE	
Derrubamento Esmagamento	Fendilhação Diagonal	Deslizamento
		
$M_u = \frac{\sigma_o D^2 t}{2} \left(1 - \frac{\sigma_o}{k f_d} \right)$	$V_{u,f_diag} = \frac{1.5 \tau_o D t}{b} \sqrt{1 + \frac{\sigma_o}{1.5 \tau_o}}$	$V_{u,desliz} = \frac{1.5 c_u + \sigma_o \mu}{1 + \frac{3H'}{\sigma_o D}} D t$
<p style="text-align: center;">↓</p>	<p style="text-align: center;">↓</p>	
<p style="text-align: center;">Rótulas de Flexão</p> <p style="text-align: center;">Momento M_u – Rotação φ_u</p>	<p style="text-align: center;">Rótulas de Corte $V_u = \min (V_{u,f_diag} ; V_{u,desliz})$</p> <p style="text-align: center;">Força V_u – Deslocamento δ_u</p>	

3. Comportamento Não Linear

Resistência última das colunas (nembos) de alvenaria a acções no plano



Deformação última, elástica e plástica

- Norma Italiana (NTC 2008) preconiza que a deformação última dos nembos é igual a $0,006 H_{\text{eff}}$ para a flexão e $0,004 H_{\text{eff}}$ para o corte (resultados baseados em ensaios experimentais).
- Rótulas Plásticas modelam o comportamento de cedência e pós-cedência.

$$\delta_{\text{plástico}} = \delta_{\text{último}} - \delta_{\text{elástico}}$$

$$\varphi_{\text{plástico}} = \varphi_{\text{último}} - \varphi_{\text{elástico}}$$

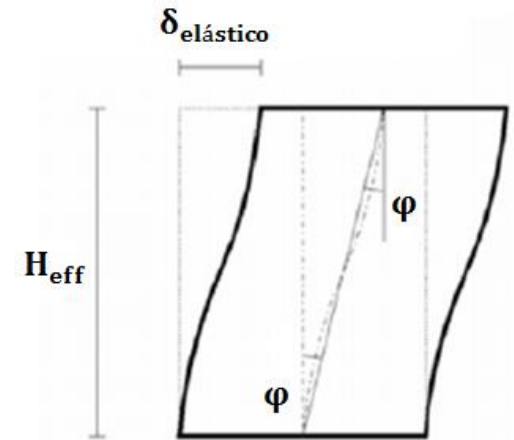
3. Comportamento Não Linear

Deformação elástica (modelo bi-encastado)

$$K = \frac{1}{\frac{H_{eff}^3}{12EI} + \frac{H_{eff}}{AG}}$$

$$F = K \times \delta \rightarrow V_u = K \times \delta_{elástico} \rightarrow \delta_{elástico} = \frac{V_u}{K}$$

$$\varphi_{elástico} = \frac{\delta_{elástico}}{H_{eff}}$$



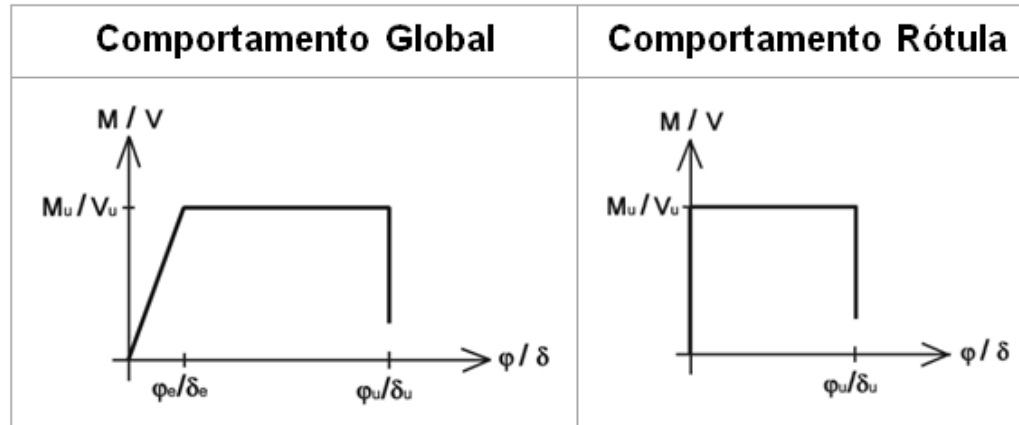
Deformação plástica

$$\delta_{plástico} = \delta_{último} - \delta_{elástico}$$

$$\varphi_{plástico} = \varphi_{último} - \varphi_{elástico}$$

3. Comportamento Não Linear

Resistência última das colunas (nembos) de alvenaria a acções no plano



Posição das Rótulas de Flexão (Momento M_u – Rotação ϕ_u)

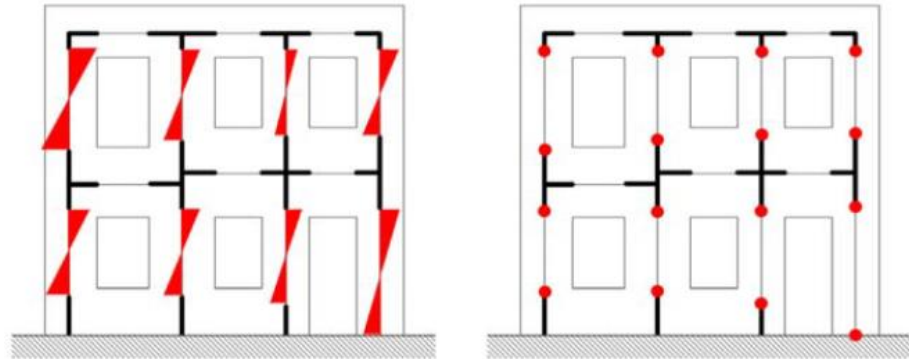
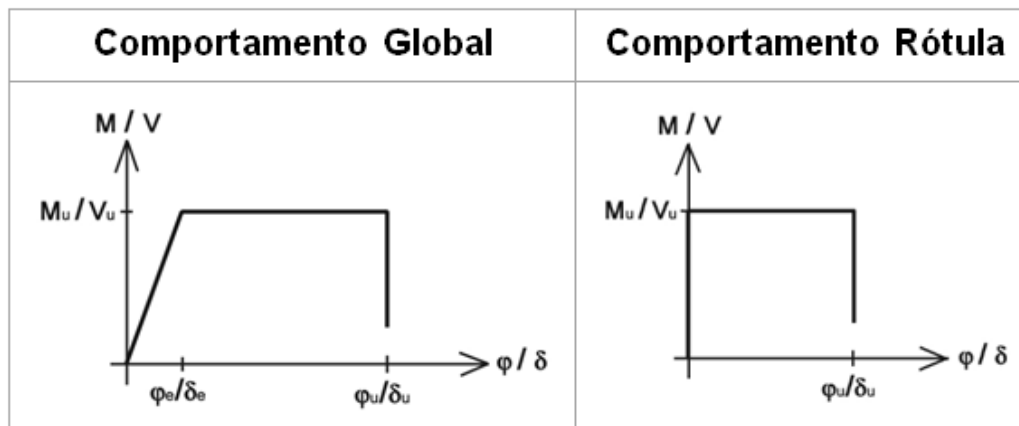


Diagrama de Momento Flector característico.
Rótula Plástica na secção de momento máximo.

3. Comportamento Não Linear

Resistência última das colunas (nembos) de alvenaria a acções no plano



Posição das Rótulas de Corte (Força V_u – Deslocamento δ_u)

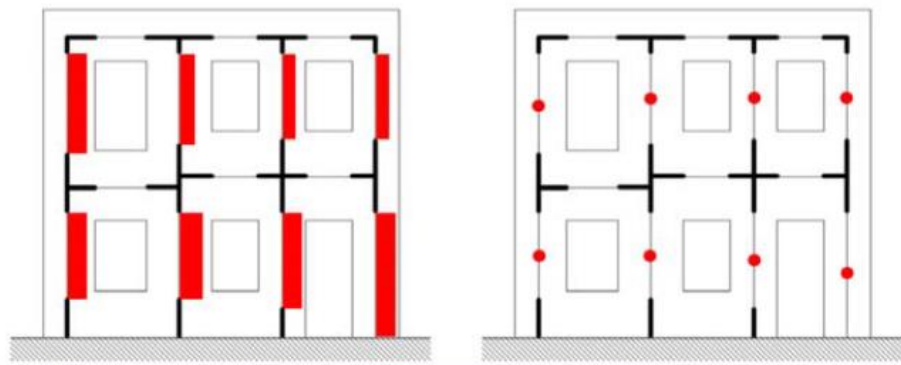
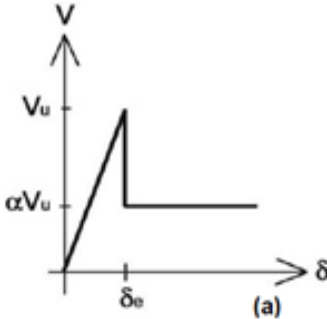
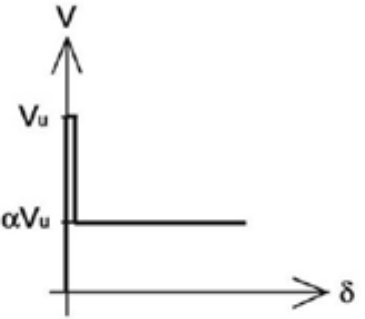


Diagrama de Esforço Transverso característico.
Rótula Plástica a $\frac{1}{2} H_{eff}$.

3. Comportamento Não Linear

Resistência última das vigas (lintéis) de alvenaria a acções no plano

CORTE	Comportamento Global	Comportamento Rótula
$V_u = c_u Dt$ <p>α – Resistência Residual (0,25)</p>	 <p>(a)</p>	

Posição das Rótulas de Corte (Força V_u)

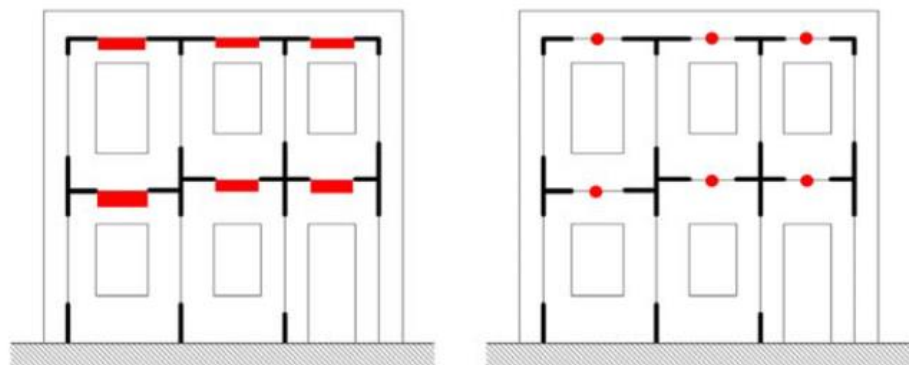
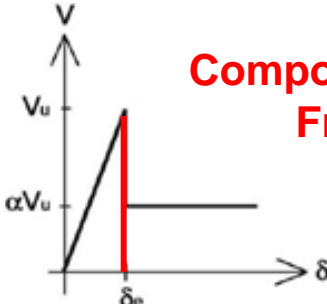
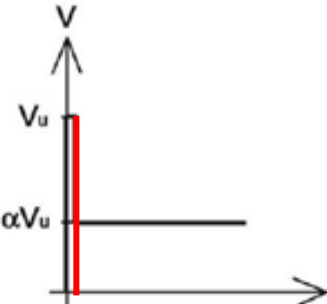


Diagrama de Esforço Transverso característico.
Rótula Plástica a $\frac{1}{2} L_{eff}$.

3. Comportamento Não Linear

Resistência última das vigas (lintéis) de alvenaria a acções no plano

CORTE	Comportamento Global	Comportamento Rótula
$V_u = c_u Dt$ <p>α – Resistência Residual (0,25)</p>	 <p style="color: red; text-align: center;">Comportamento Frágil</p>	

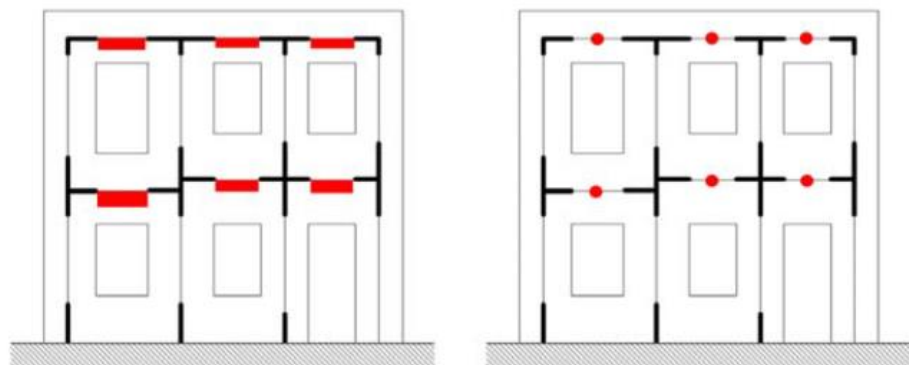


Diagrama de Esforço Transverso característico.
Rótula Plástica a $\frac{1}{2} L_{eff}$.

3. Comportamento Não Linear

Definição das Rótulas Plásticas:

(1) Determinação das tensões normais de compressão (σ_0) nas colunas

Load Case: DEAD

(2) Determinação dos esforços resistentes nas colunas e vigas

Colunas	σ_0 (kN/m ²)	M_u (kN.m)	V_{rd,f_diag} (kN)	$V_{u,desliz}$ (kN)	V_u (kN)
PA4	26,76	27,83	59,84	16,68	16,68
PB4	39,56	40,88	63,90	26,72	26,72
PA3	126,59	135,00	93,26	86,16	86,16
PB3	150,41	158,49	98,90	108,41	98,90
PA2	219,36	239,01	121,78	161,18	121,78
PB2	255,23	272,86	129,25	196,18	129,25
PA1	305,46	338,97	148,30	240,51	148,30
PB1	355,91	384,00	158,08	290,95	158,08

Vigas	V_u (kN)
S4	63,96
S3	68,88
S2	73,80
S1	78,72

3. Comportamento Não Linear

Definição das Rótulas Plásticas:

(3) Determinação das deformações elásticas

Colunas	V_u (kN)	K (kN/m)	δ_{elast} (m)	δ_{plast} (m)	φ_{elast} (rad)	φ_{plast} (rad)
PA4	16,68	14222,15	0,0012	0,0124	0,0002	0,0058
PB4	26,72	18461,54	0,0014	0,0110	0,0002	0,0058
PA3	86,16	17537,18	0,0049	0,0087	0,0007	0,0053
PB3	98,90	22711,70	0,0044	0,0080	0,0007	0,0053
PA2	121,78	21279,25	0,0057	0,0079	0,0010	0,0050
PB2	129,25	27490,91	0,0047	0,0077	0,0010	0,0050
PA1	148,30	25458,33	0,0058	0,0078	0,0012	0,0048
PB1	158,08	32807,02	0,0048	0,0076	0,0012	0,0048

$$\delta_{plástico} = \delta_{último} - \delta_{elástico}$$

$$\varphi_{plástico} = \varphi_{último} - \varphi_{elástico}$$

3. Comportamento Não Linear

Definição das Rótulas Plásticas:

(4) Define > Section Properties > Hinge Properties... > Add New Property...

Frame Hinge Property Data

Hinge Property Name
PA4 - M3

Hinge Type
 Force Controlled (Brittle)
 Deformation Controlled (Ductile)
 Moment M3

Modify/Show Hinge Property...

OK Cancel

Colunas: Rótulas Momento - Rotação

Frame Hinge Property Data for PA4 - M3 - Moment M3

Edit

Point	Moment/SF	Rotation/SF
E-	-27,83	-0,0058
D-	-27,83	-0,0058
C-	-27,83	-0,0058
B-	-27,83	0
A	0	0
B	27,83	0
C	27,83	5,800E-03
D	27,83	5,800E-03
E	27,83	5,800E-03

Displacement Control Parameters
 Symmetric

Type
 Moment - Rotation
 Moment - Curvature
 Hinge Length
 Relative Length

Hysteresis Type And Parameters
 Hysteresis Type Isotropic
 No Parameters Are Required For This Hysteresis Type

Load Carrying Capacity Beyond Point E
 Drops To Zero
 Is Extrapolated

Scaling for Moment and Rotation

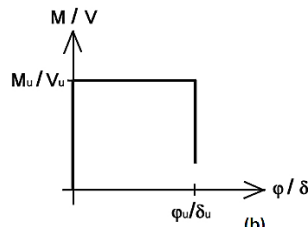
	Positive	Negative
<input type="checkbox"/> Use Yield Moment	Moment SF 1.	
<input type="checkbox"/> Use Yield Rotation (Steel Objects Only)	Rotation SF 1.	

Acceptance Criteria (Plastic Rotation/SF)

	Positive	Negative
<input checked="" type="checkbox"/> Immediate Occupancy	1,000E-04	
<input checked="" type="checkbox"/> Life Safety	4,400E-03	
<input checked="" type="checkbox"/> Collapse Prevention	5,800E-03	

Show Acceptance Criteria on Plot

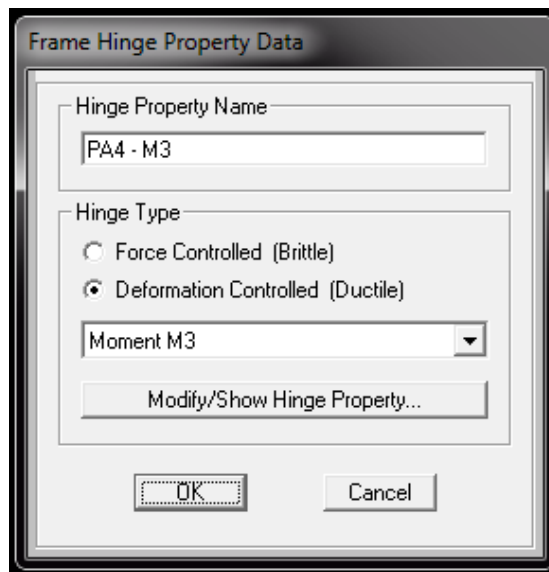
OK Cancel



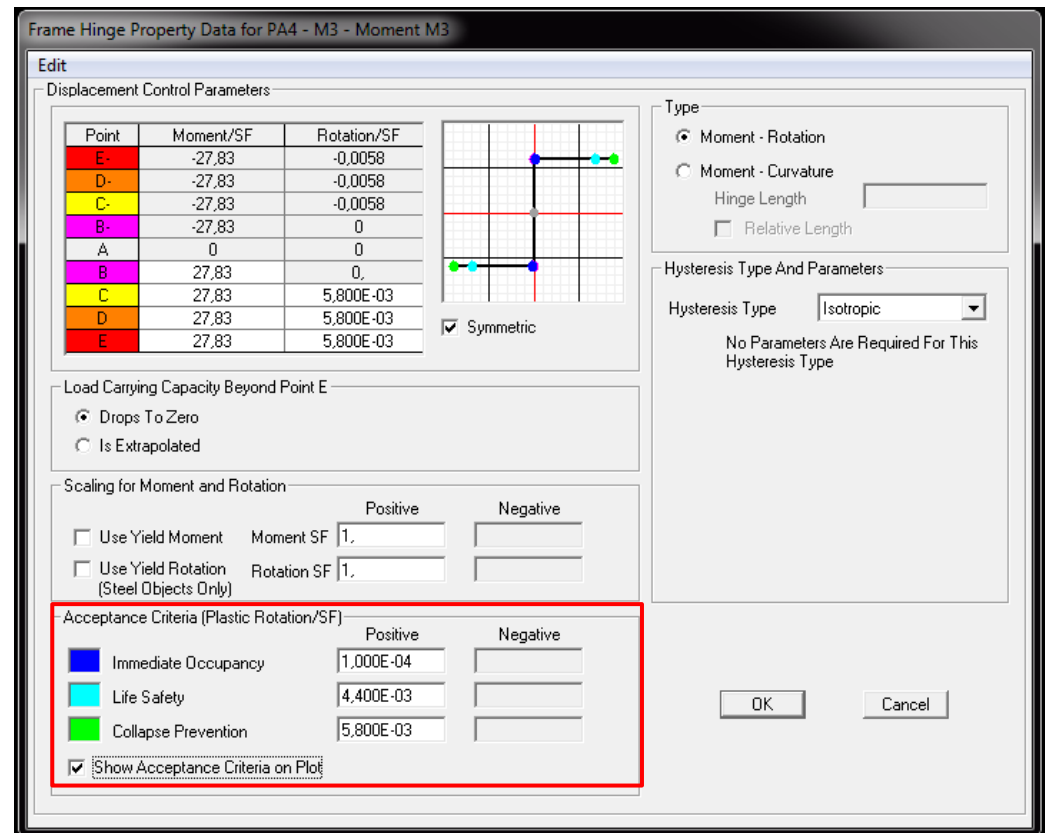
3. Comportamento Não Linear

Definição das Rótulas Plásticas:

(4) Define > Section Properties > Hinge Properties... > Add New Property...



Colunas: Rótulas Momento - Rotação



Point	Moment/SF	Rotation/SF
E-	-27,83	-0,0058
D-	-27,83	-0,0058
C-	-27,83	-0,0058
B-	-27,83	0
A	0	0
B	27,83	0,
C	27,83	5,800E-03
D	27,83	5,800E-03
E	27,83	5,800E-03

Acceptance Criteria (Plastic Rotation/SF)

	Positive	Negative
Immediate Occupancy	1,000E-04	
Life Safety	4,400E-03	
Collapse Prevention	5,800E-03	

IO – Deformação de cedência

LS – Valor não superior a 3/4 da deformação última

CP – Deformação última

3. Comportamento Não Linear

Definição das Rótulas Plásticas:

(4) Define > Section Properties > Hinge Properties... > Add New Property...

Frame Hinge Property Data

Hinge Property Name
PA4 - V2

Hinge Type
 Force Controlled (Brittle)
 Deformation Controlled (Ductile)

Shear V2

Modify/Show Hinge Property...

OK Cancel

Colunas: Rótulas Força - Deslocamento

Frame Hinge Property Data for PA4 - V2 - Shear V2

Edit

Point	Force/SF	Disp/SF
E-	-16,68	-0,0124
D-	-16,68	-0,0124
C-	-16,68	-0,0124
B-	-16,68	0
A	0	0
B	16,68	0
C	16,68	0,0124
D	16,68	0,0124
E	16,68	0,0124

Displacement Control Parameters

Type
 Force - Displacement
 Stress - Strain
 Hinge Length
 Relative Length

Hysteresis Type And Parameters
 Hysteresis Type Isotropic
 No Parameters Are Required For This Hysteresis Type

Load Carrying Capacity Beyond Point E
 Drops To Zero
 Is Extrapolated

Scaling for Force and Disp

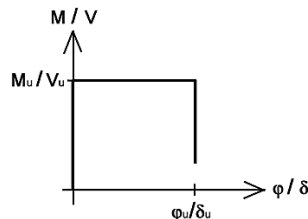
	Positive	Negative
<input type="checkbox"/> Use Yield Force Force SF	1.	
<input type="checkbox"/> Use Yield Disp (Steel Objects Only) Disp SF	1.	

Acceptance Criteria (Plastic Disp/SF)

	Positive	Negative
<input checked="" type="checkbox"/> Immediate Occupancy	1,000E-03	
<input checked="" type="checkbox"/> Life Safety	9,300E-03	
<input checked="" type="checkbox"/> Collapse Prevention	0,0124	

Show Acceptance Criteria on Plot

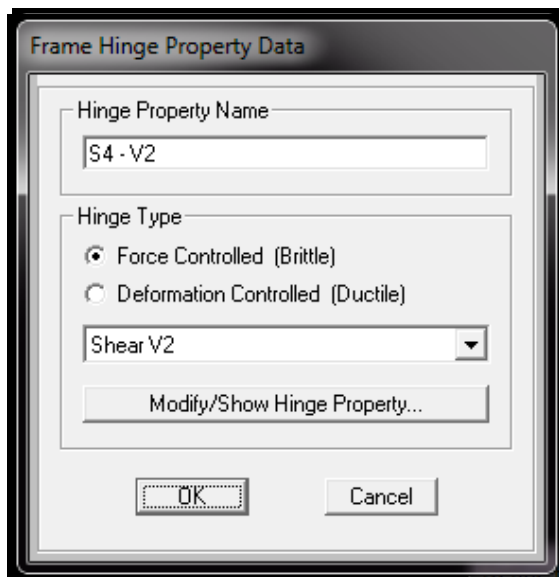
OK Cancel



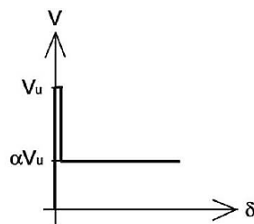
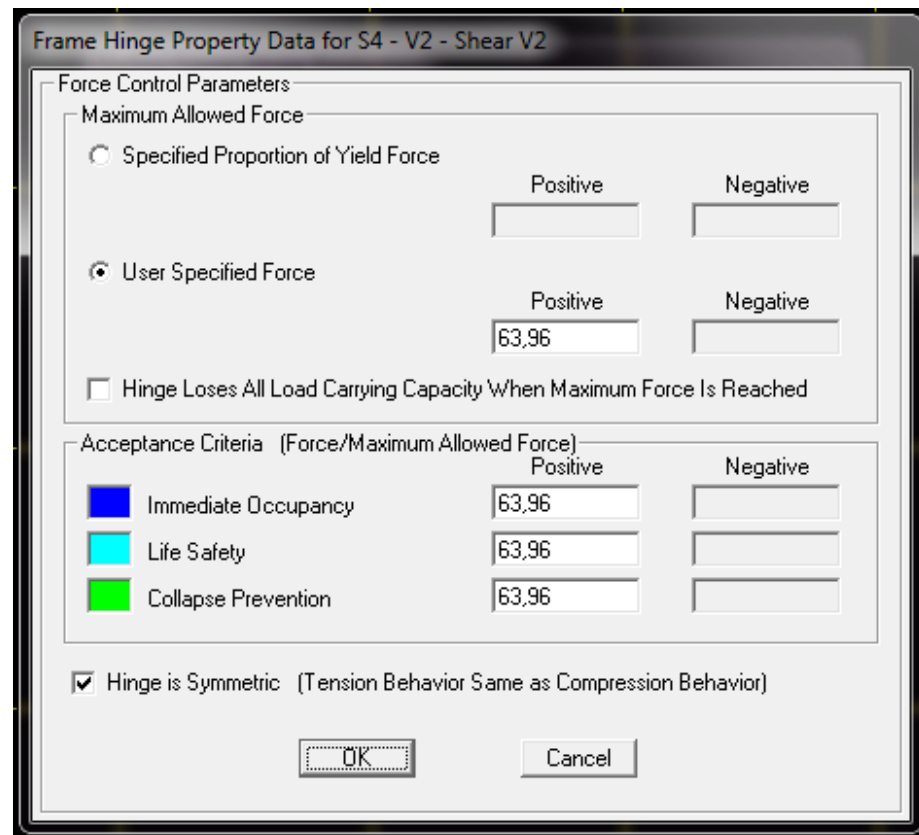
3. Comportamento Não Linear

Definição das Rótulas Plásticas:

(4) Define > Section Properties > Hinge Properties... > Add New Property...



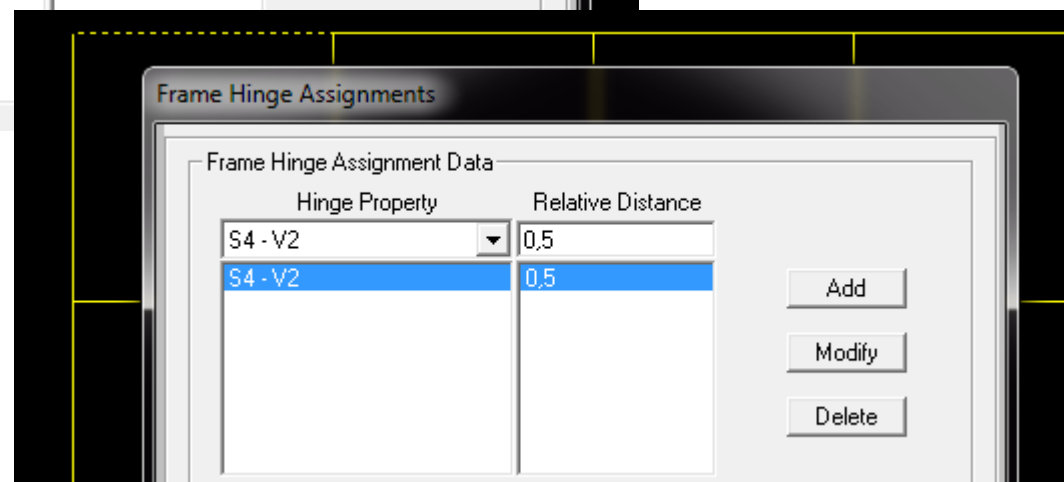
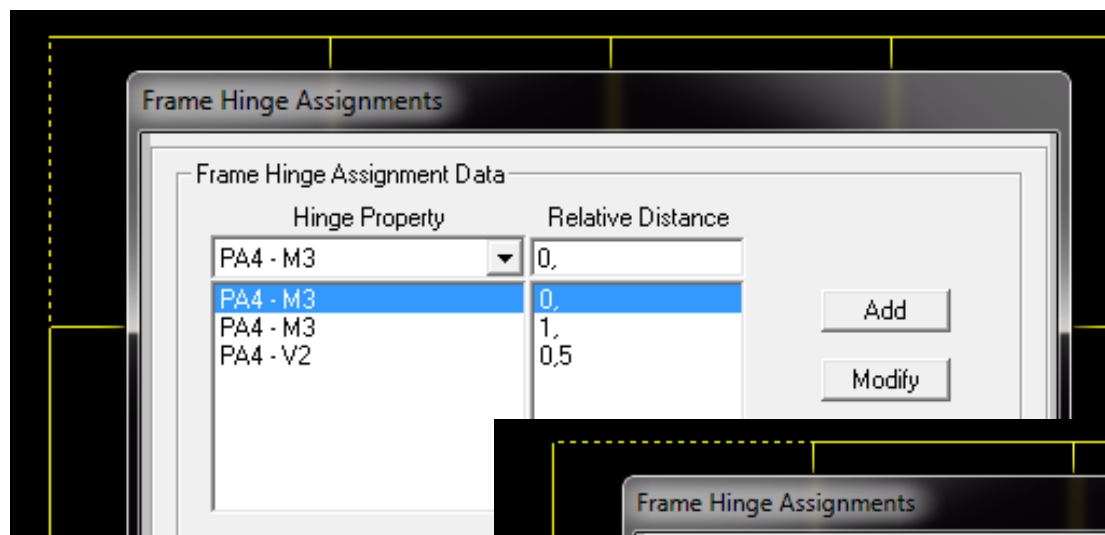
Vigas: Rótulas Força



3. Comportamento Não Linear

Definição das Rótulas Plásticas:

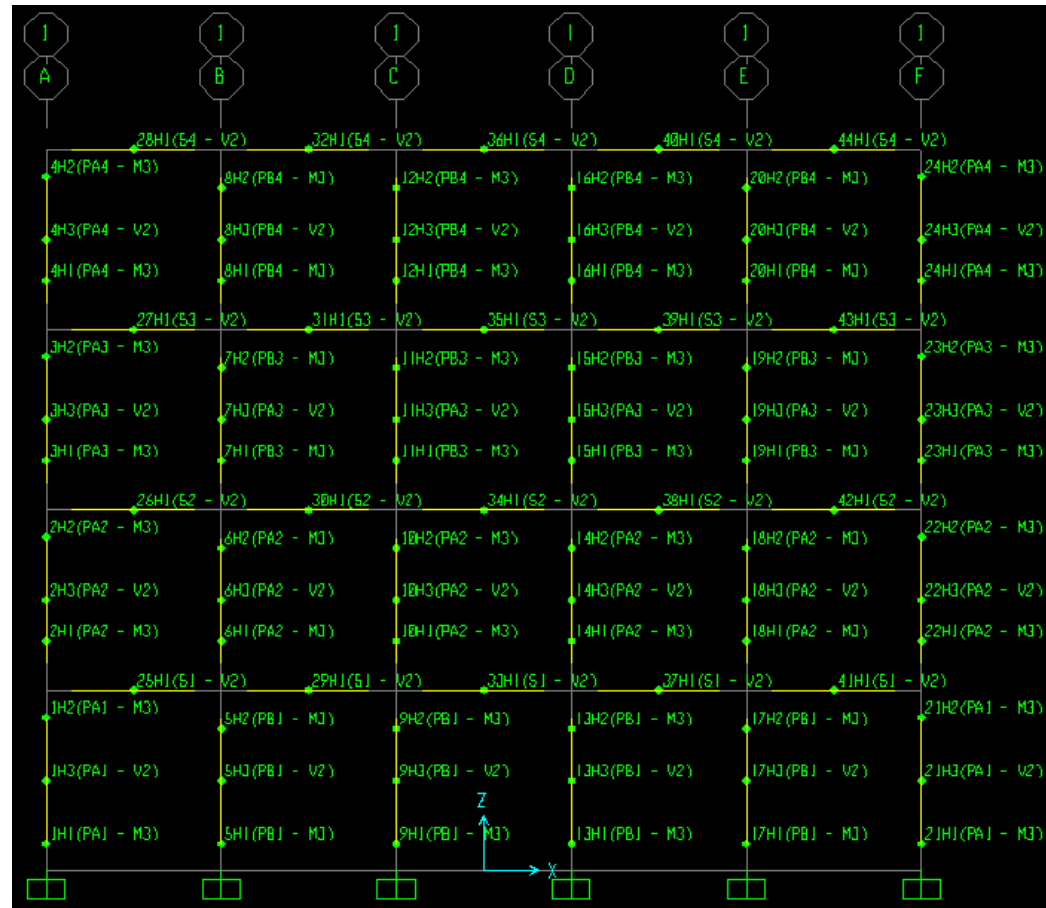
(5) Selecionar barra > Assign > Frame > Hinges...



3. Comportamento Não Linear

Definição das Rótulas Plásticas:

(5) Display > Show Misc Assigns > Frame/Cable/Tendon... > Hinges



4. Análise Estática Não Linear (*Pushover*)

A análise estática não linear (*pushover*) consiste na aplicação de incrementos monotónicos de uma solicitação horizontal sobre uma estrutura, com o intuito de avaliar a sua capacidade resistente a acções sísmicas (horizontais).

A resposta de estrutura é traduzida através de curvas de capacidade, que relacionam a força de corte basal com o deslocamento horizontal observado num determinado ponto de controlo (usualmente coincidente com o CM do último nível).

Carregamentos Laterais (EC8)

- Distribuição Uniforme: proporcional à massa independentemente da altura (resposta de aceleração uniforme).
- Distribuição Modal: proporcional à massa e ao deslocamento modal normalizado.

SAP2000

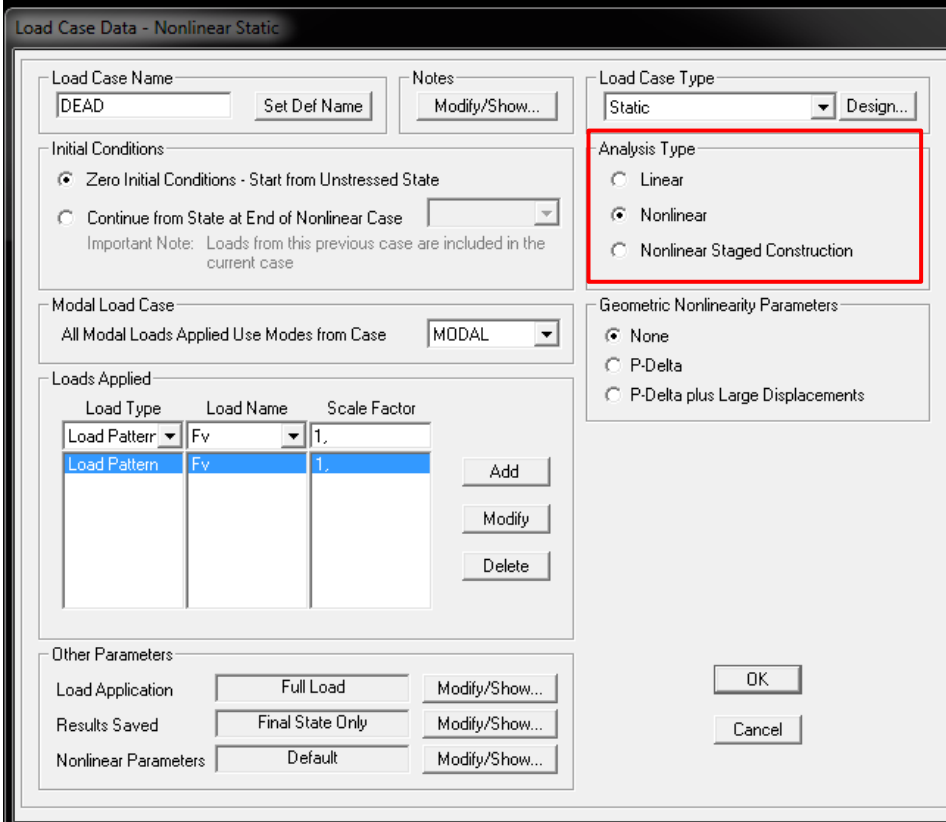
(a) Introdução manual das forças estáticas equivalentes (distribuição por piso proporcional à massa do nó).

(b) Definição automática, opção particularmente vantajosa no caso da distribuição modal por considerar o deslocamento em cada nó.

4. Análise Estática Não Linear (*Pushover*)

Definir a Load Case DEAD para Análises Não Lineares

Define > Load Cases > DEAD > Nonlinear



Load Case Data - Nonlinear Static

Load Case Name: DEAD [Set Def Name] [Modify/Show...]

Notes: [Modify/Show...]

Load Case Type: Static [Design...]

Initial Conditions:

- Zero Initial Conditions - Start from Unstressed State
- Continue from State at End of Nonlinear Case []

Important Note: Loads from this previous case are included in the current case

Modal Load Case: All Modal Loads Applied Use Modes from Case [MODAL]

Loads Applied:

Load Type	Load Name	Scale Factor
Load Pattern	Fv	1.
Load Pattern	Fv	1.

[Add] [Modify] [Delete]

Analysis Type:

- Linear
- Nonlinear
- Nonlinear Staged Construction

Geometric Nonlinearity Parameters:

- None
- P-Delta
- P-Delta plus Large Displacements

Other Parameters:

Load Application: Full Load [Modify/Show...]

Results Saved: Final State Only [Modify/Show...]

Nonlinear Parameters: Default [Modify/Show...]

[OK] [Cancel]

4. Análise Estática Não Linear (*Pushover*)

Análise *Pushover*: Define > Load Cases

Distribuição Modal

Distribuição Uniforme

Load Case Data - Nonlinear Static

Load Case Name:

Notes:

Load Case Type:

Initial Conditions

Zero Initial Conditions - Start from Unstressed State

Continue from State at End of Nonlinear Case

Important Note: Loads from this previous case are included in the current case

Modal Load Case

All Modal Loads Applied Use Modes from Case

Loads Applied

Load Type	Load Name	Scale Factor
Mode	1	-1.
Mode	1	-1.

Other Parameters

Load Application:

Results Saved:

Nonlinear Parameters:

Load Case Data - Nonlinear Static

Load Case Name:

Notes:

Load Case Type:

Initial Conditions

Zero Initial Conditions - Start from Unstressed State

Continue from State at End of Nonlinear Case

Important Note: Loads from this previous case are included in the current case

Modal Load Case

All Modal Loads Applied Use Modes from Case

Loads Applied

Load Type	Load Name	Scale Factor
Accel	UX	-1.
Accel	UX	-1.

Analysis Type

Linear

Nonlinear

Nonlinear Staged Construction

Geometric Nonlinearity Parameters

None

P-Delta

P-Delta plus Large Displacements

Other Parameters

Load Application:

Results Saved:

Nonlinear Parameters:

4. Análise Estática Não Linear (*Pushover*)

Análise *Pushover*: Define > Load Cases

Distribuição Modal

Load Case Data - Nonlinear Static

Load Case Name: Push_Modal [Set Def Name] [Modify/S...]

Notes: [Modify/S...]

Initial Conditions:

Zero Initial Conditions - Start from Unstressed State

Continue from State at End of Nonlinear Case [DEAD]

Important Note: Loads from this previous case are included in the current case

Modal Load Case:

All Modal Loads Applied Use Modes from Case [MODAL]

Loads Applied

Load Type	Load Name	Scale Factor
Mode	1	-1.
Mode	1	-1.

Other Parameters:

Load Application: [Displ Control] [Modify/S...]

Results Saved: [Multiple States] [Modify/S...]

Nonlinear Parameters: [User Defined] [Modify/S...]

Distribuição Uniforme

Load Case Data - Nonlinear Static

Load Case Name: Push_Uniforme [Set Def Name] [Modify/Show...]

Notes: [Modify/Show...]

Load Case Type: [Static] [Design...]

Initial Conditions:

Zero Initial Conditions - Start from Unstressed State

Continue from State at End of Nonlinear Case [DEAD]

Important Note: Loads from this previous case are included in the current case

Analysis Type:

Linear

Nonlinear

Nonlinear Staged Construction

Geometric Nonlinearity Parameters:

None

P-Delta

P-Delta plus Large Displacements

Modal Load Case:

All Modal Loads Applied Use Modes from Case [MODAL]

Loads Applied

Load Type	Load Name	Scale Factor
Accel	UX	-1.
Accel	UX	-1.

[Add] [Modify] [Delete]

Other Parameters:

Load Application: [Displ Control] [Modify/Show...]

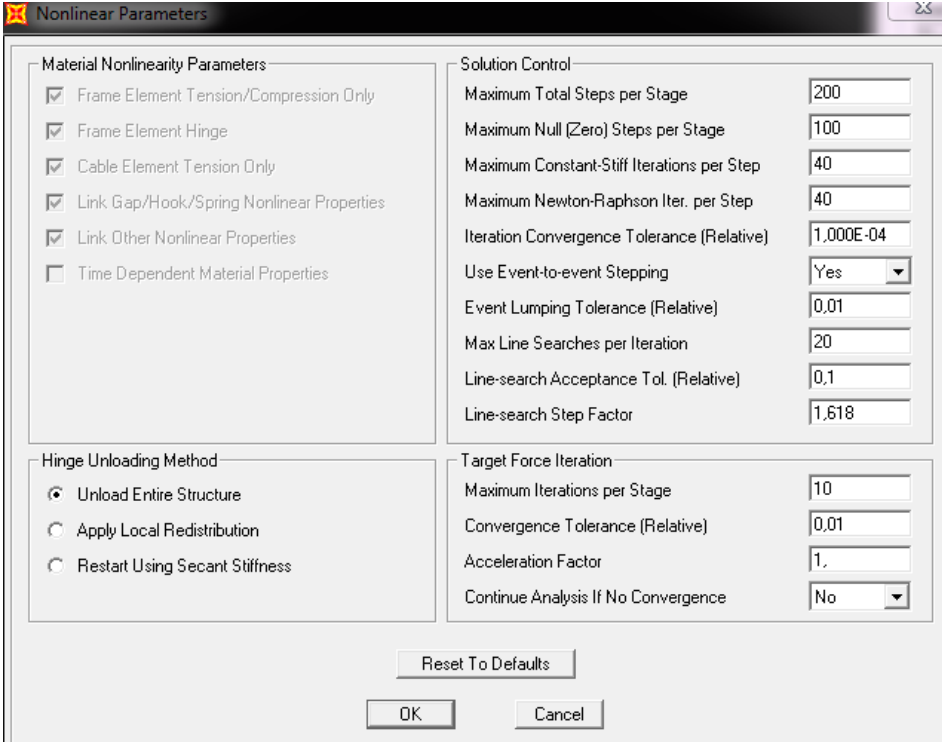
Results Saved: [Multiple States] [Modify/Show...]

Nonlinear Parameters: [User Defined] [Modify/Show...]

[OK] [Cancel]

4. Análise Estática Não Linear (*Pushover*)

Análise *Pushover*: Define > Load Cases



Nonlinear Parameters

Material Nonlinearity Parameters

- Frame Element Tension/Compression Only
- Frame Element Hinge
- Cable Element Tension Only
- Link Gap/Hook/Spring Nonlinear Properties
- Link Other Nonlinear Properties
- Time Dependent Material Properties

Solution Control

- Maximum Total Steps per Stage: 200
- Maximum Null (Zero) Steps per Stage: 100
- Maximum Constant-Stiff Iterations per Step: 40
- Maximum Newton-Raphson Iter. per Step: 40
- Iteration Convergence Tolerance (Relative): 1,000E-04
- Use Event-to-event Stepping: Yes
- Event Lumping Tolerance (Relative): 0,01
- Max Line Searches per Iteration: 20
- Line-search Acceptance Tol. (Relative): 0,1
- Line-search Step Factor: 1,618

Hinge Unloading Method

- Unload Entire Structure
- Apply Local Redistribution
- Restart Using Secant Stiffness

Target Force Iteration

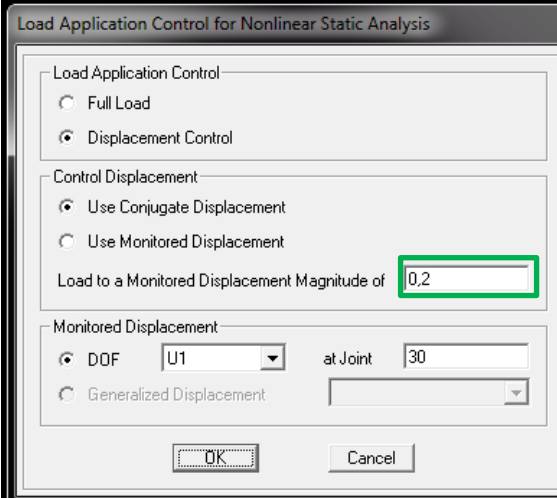
- Maximum Iterations per Stage: 10
- Convergence Tolerance (Relative): 0,01
- Acceleration Factor: 1,
- Continue Analysis If No Convergence: No

Reset To Defaults

OK Cancel

Valores definidos pelo utilizador com o objectivo de otimizar a análise (ex: aumento do número de passos caso ocorram problemas de convergência)

Quanto maiores os valores indicados, mais refinada será a curva de capacidade e maior será o número de *outputs* da análise



Load Application Control for Nonlinear Static Analysis

Load Application Control

- Full Load
- Displacement Control

Control Displacement

- Use Conjugate Displacement
- Use Monitored Displacement

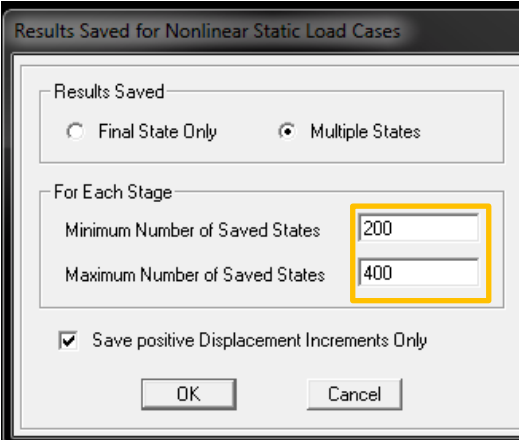
Load to a Monitored Displacement Magnitude of: 0,2

Monitored Displacement

- DOF: U1 at Joint: 30
- Generalized Displacement

OK Cancel

Análise termina quando o nó de controlo atingir o deslocamento definido.



Results Saved for Nonlinear Static Load Cases

Results Saved

- Final State Only
- Multiple States

For Each Stage

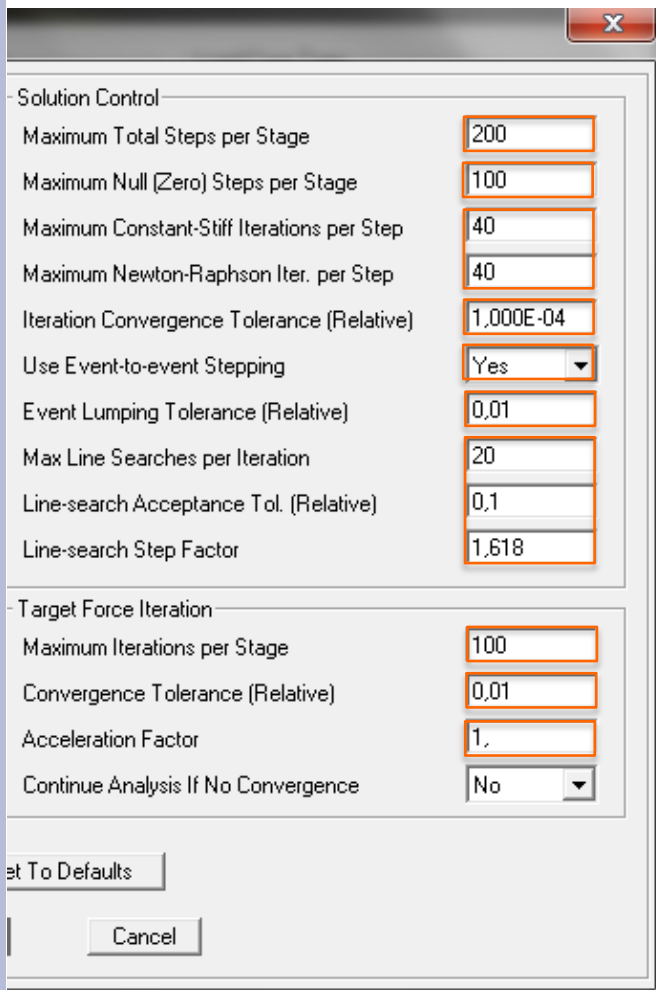
- Minimum Number of Saved States: 200
- Maximum Number of Saved States: 400

Save positive Displacement Increments Only

OK Cancel

4. Análise Estática Não Linear (*Pushover*)

Análise *Pushover*. Define > Load Cases



Parameter	Value
Maximum Total Steps per Stage	200
Maximum Null (Zero) Steps per Stage	100
Maximum Constant-Stiff Iterations per Step	40
Maximum Newton-Raphson Iter. per Step	40
Iteration Convergence Tolerance (Relative)	1,000E-04
Use Event-to-event Stepping	Yes
Event Lumping Tolerance (Relative)	0,01
Max Line Searches per Iteration	20
Line-search Acceptance Tol. (Relative)	0,1
Line-search Step Factor	1,618
Maximum Iterations per Stage	100
Convergence Tolerance (Relative)	0,01
Acceleration Factor	1,
Continue Analysis If No Convergence	No

- Controla o tempo de análise.
- Número excessivo pode indicar que análise parou devido a problemas numéricos.
- Para cada etapa de análise inicia iterações do tipo “*constant-stiffness*”. Se não convergir, adopta iterações do tipo “*Newton-Raphson (tangent-stiffness)*”.
- Tolerância de erro relativamente à intensidade da força aplicada na estrutura.
- É muito eficaz e tende a reduzir o número de iterações necessária.
- Margem de erro usada para determinar os estados de uma rótula plástica.

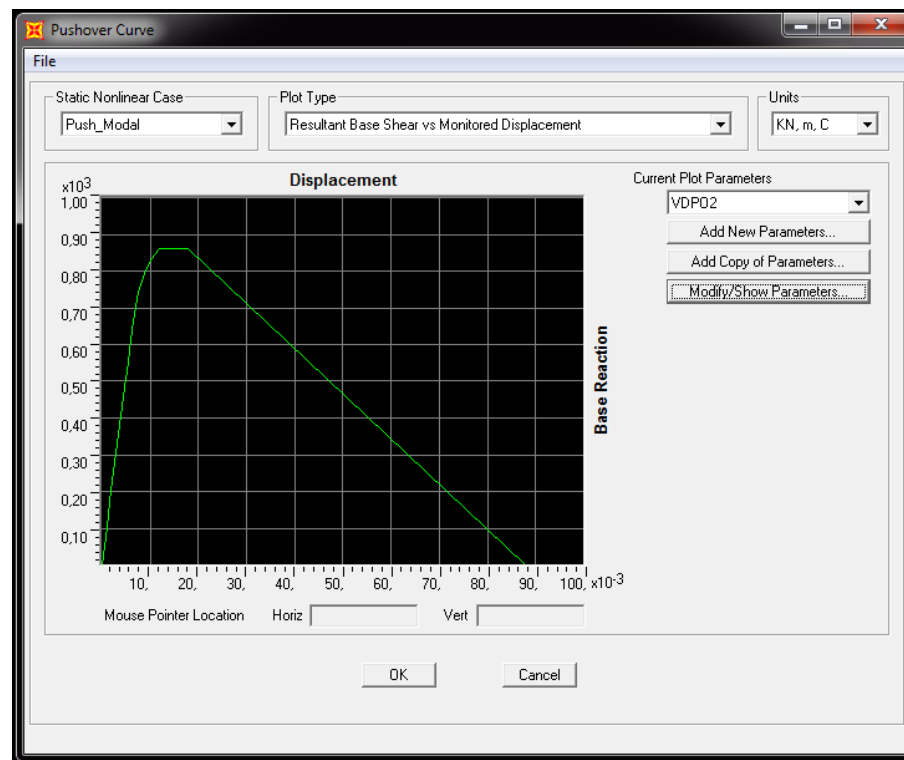
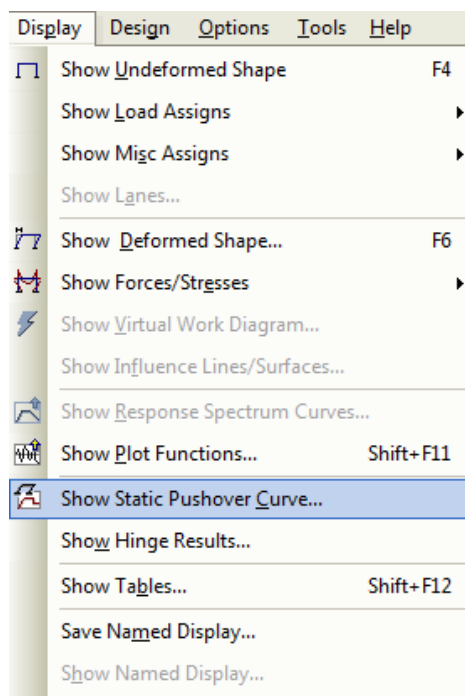
- Não é usado em análises estáticas lineares.

- Deformação é imposta de forma iterativa até corresponder à força pretendida.
- Margem de erro em relação à força pretendida.
- Factor que condiciona a deformação imposta resultante da diferença entre a força pretendida e a força real aplicada na estrutura.

4. Análise Estática Não Linear (*Pushover*)

Análise *Pushover*. Analyse > Run Analysis...

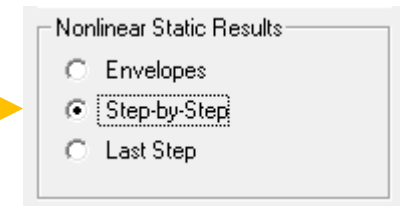
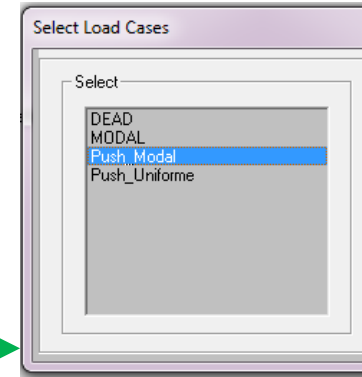
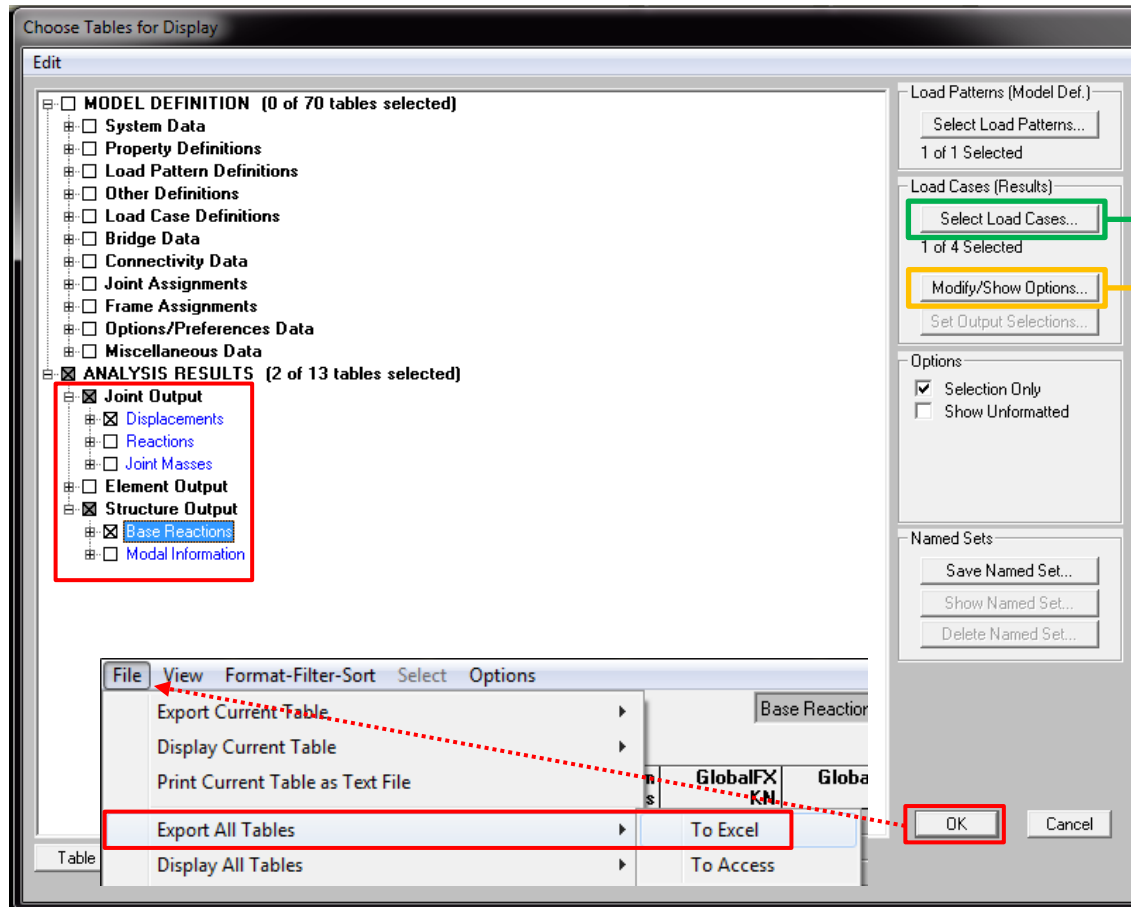
Display > Show Static Pushover Curve...



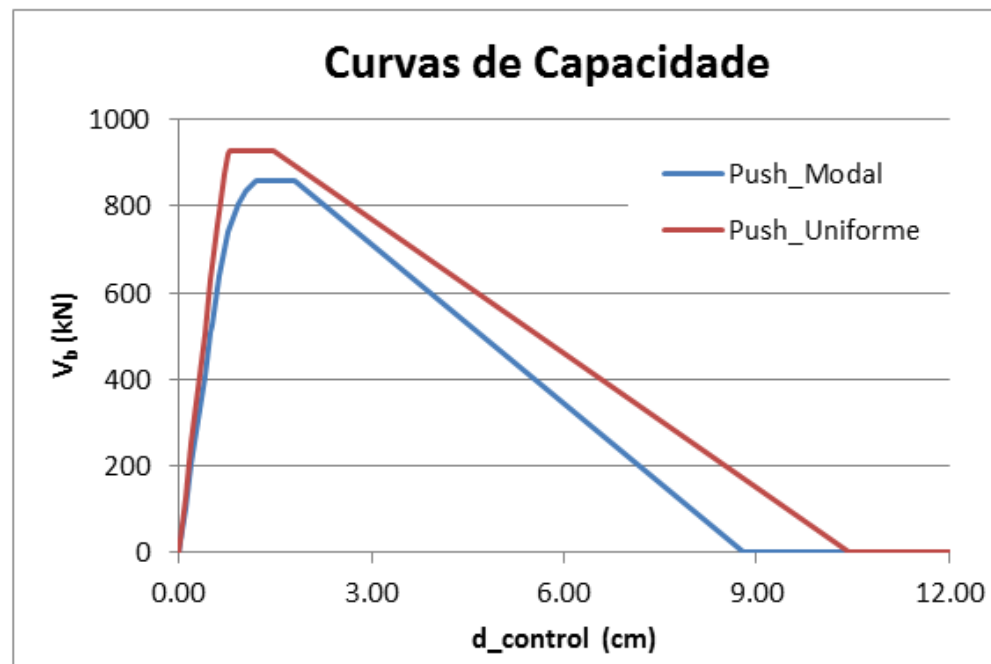
4. Análise Estática Não Linear (*Pushover*)

Análise *Pushover*. Analyse > Run Analysis...

Seleccionar Nó de Controlo > Display > Show Tables...



4. Análise Estática Não Linear (*Pushover*)



Distribuição Modal		
StepNum	U1	GlobalFX
Unitless	m	KN
...
15	0,02	859,76
16	0,02	859,76
17	0,02	859,76
18	0,02	859,76
19	0,09	1,18
20	0,09	1,18

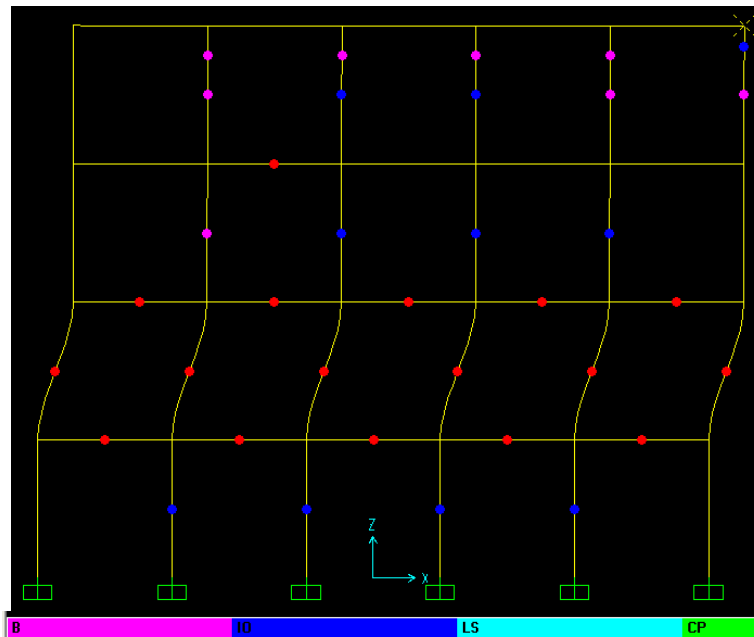
Distribuição Uniforme		
StepNum	U1	GlobalFX
Unitless	m	KN
...
15	0,01	927,94
16	0,01	927,94
17	0,01	927,94
18	0,01	927,94
19	0,10	2,27
20	0,11	2,27



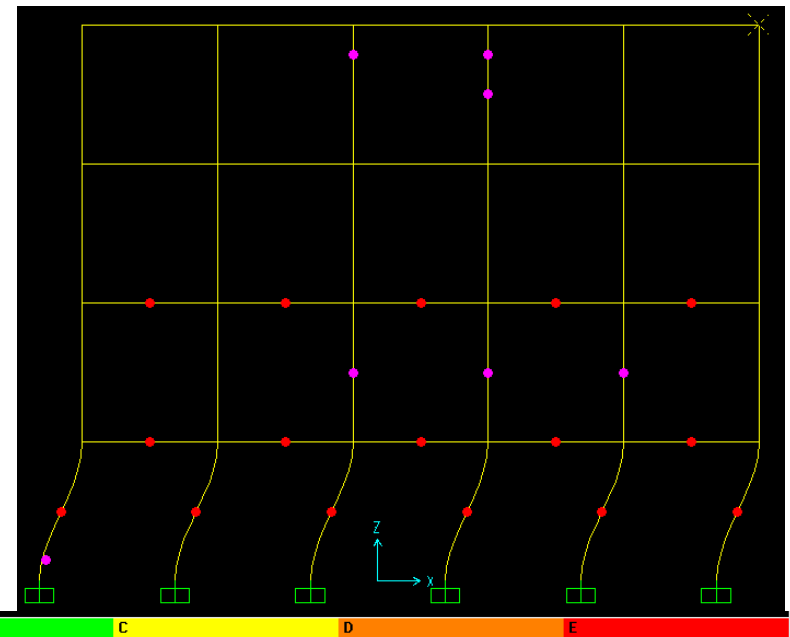
4. Análise Estática Não Linear (*Pushover*)

Análise *Pushover*. Analyse > Run Analysis...

Display > Deformed Shape... > **Step 19**



Distribuição Modal



Distribuição Uniforme

5. Referências

Kappos, A., Penelis, G.; Drakopoulos, C. (2002) *Evaluation of Simplified Models for Lateral Load Analysis of Unreinforced Masonry Buildings*. Journal of Earthquake Engineering, Vol. 128, No. 7.

Monteiro, J. (2012) *Análise Sísmica de Edifícios “Gaioleiros”*. Dissertação Mestrado, IST, UTL, Lisboa.

Pasticier, L.; Amadio, C.; Fragiocomo, M. (2007) *Non-linear Seismic Analysis and Vulnerability Evaluation of a Masonry Building by Means of the SAP2000® v.10 Code*. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, No. 37, pp. 467-485.

Pereira, D. (2009) *Estudo Sísmico de Edifícios Antigos. Reforço e análise não linear*. Dissertação Mestrado, IST, UTL, Lisboa.

Simões, A.; Bento, R.; Gago, A.; Lopes, M. (2012) *Seismic Vulnerability of old masonry ‘Gaioleiro’ Buildings in Lisbon*. 15^o Conferência Mundial de Engenharia Sísmica (15WCEE), Lisboa.