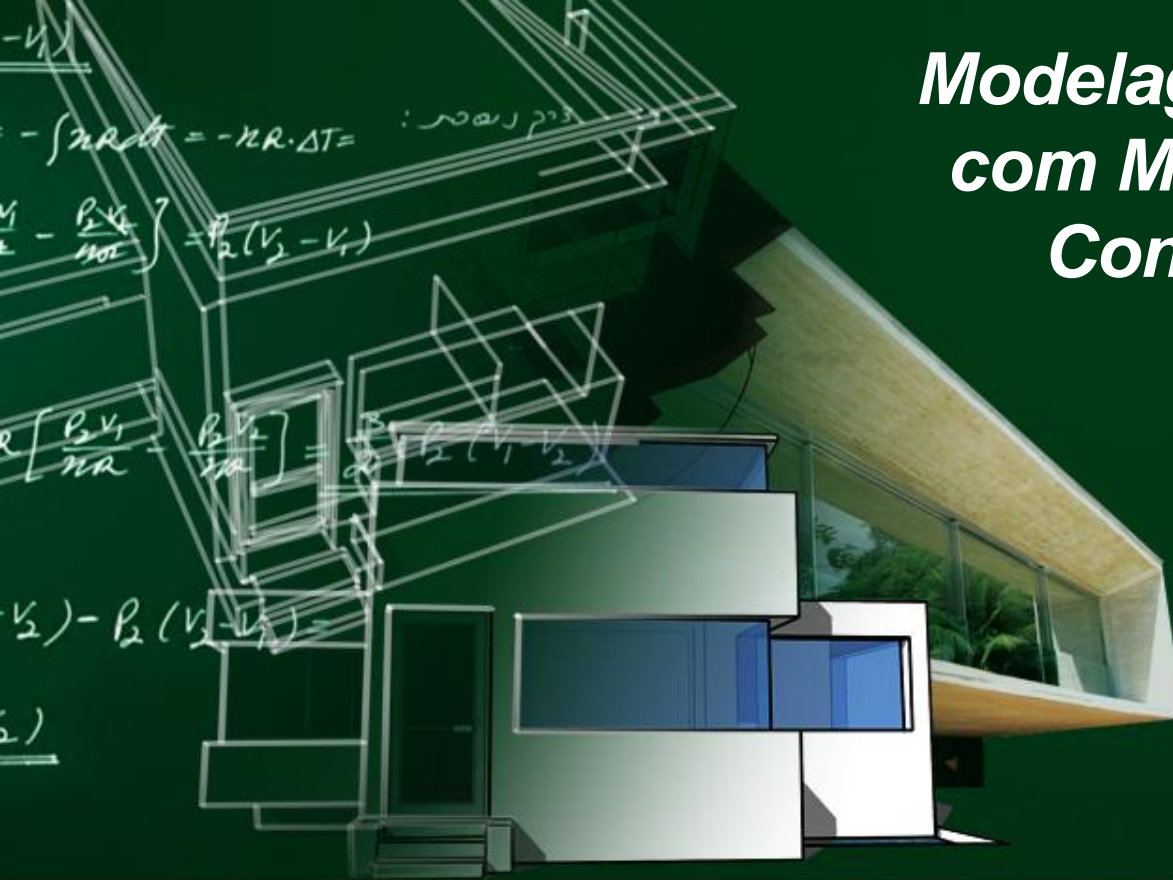


# Modelagem de Edificações com Multi-Pavimentos em Concreto Pré-Moldado.

Joaquim E Mota



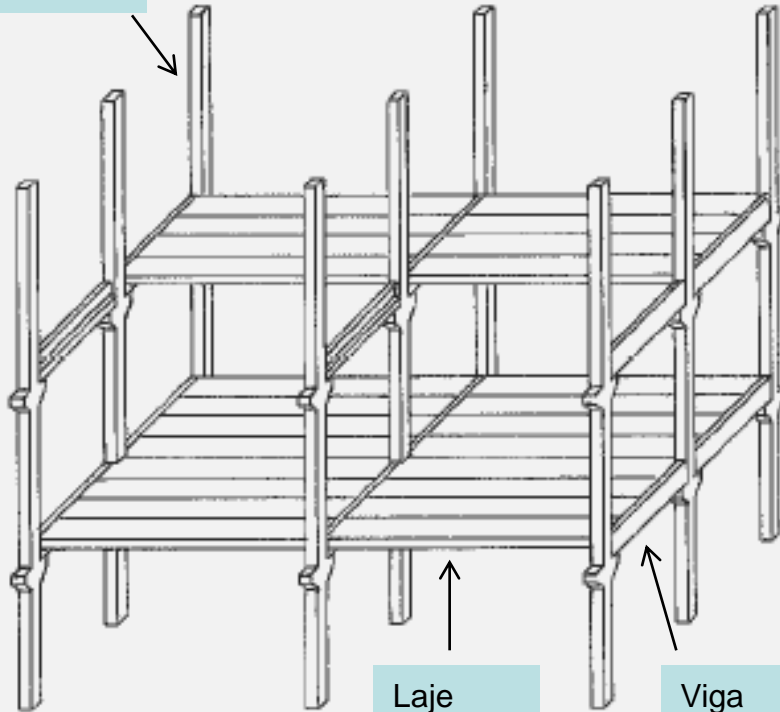
**14° ENENECE 2011**  
Encontro Nacional de Engenharia e Consultoria Estrutural

As Normas Valorizando a Engenharia Estrutural

## A CRESCENTE UTILIZAÇÃO DE ESTRUTURAS DO TIPO MULTI-PISO DE CONCRETO PRÉ-MOLDADO

ESTRUTURA TIPO ESQUELETO OU RETICULADA  
SISTEMA MAIS UTILIZADO NO BRASIL

Pilar

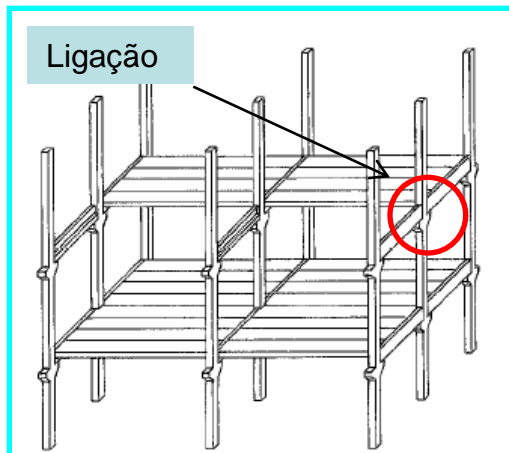


Laje

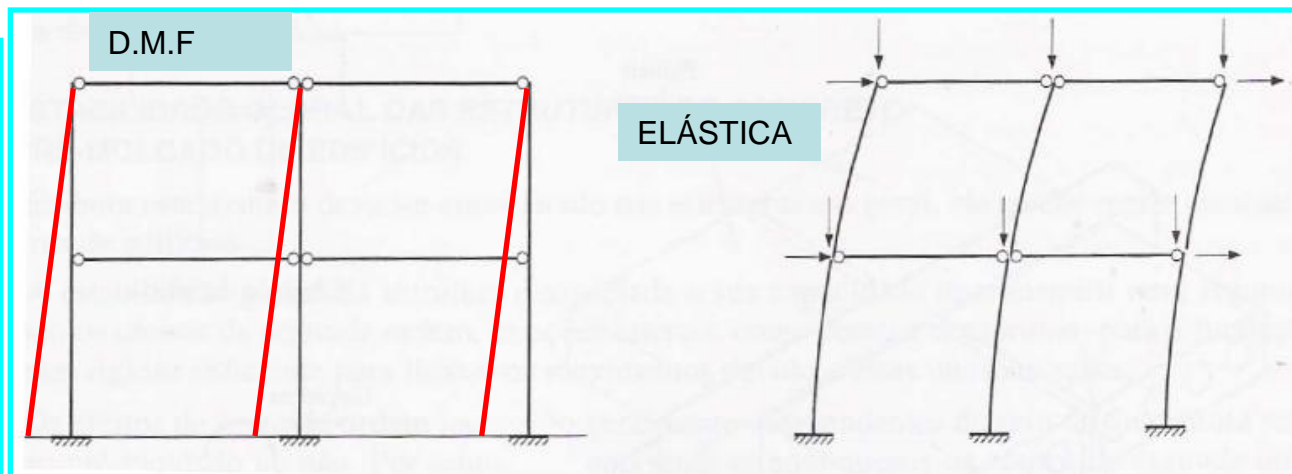
Viga



# MOTIVAÇÃO



ESTRUTURA TIPO ESQUELETO

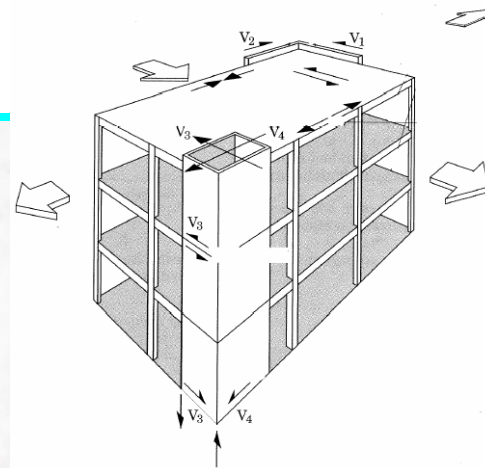
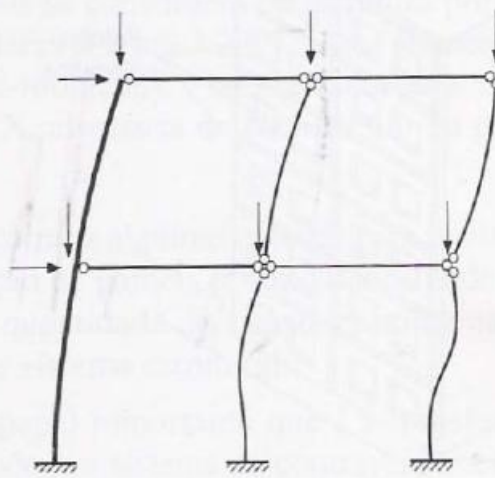
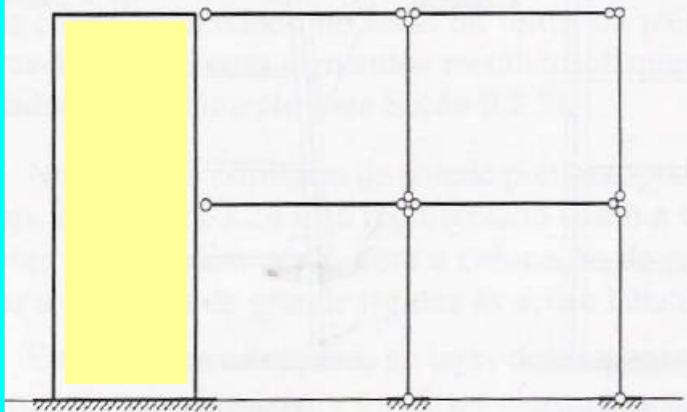


COMPORTAMENTO DA ESTRUTURAL – LIGAÇÃO ARTICULADA

- \* **A LIGAÇÃO VIGA-PILAR DO TIPO ARTICULADA É PREFERIDA PELA SUA SIMPLICIDADE PORÉM IMPÕE À ESTRUTURA UMA ESBELTEZ ELEVADA**
- \* **OS PILARES TRABALHAM, PARA AÇÕES HORIZONTAIS, COMO PEÇAS EM BALANÇO E A PARTIR DE 12M DE ALTURA AS SUAS SEÇÕES TRANSVERSAIS PRECISAM TER DIMENSÕES BEM MAIORES QUE AS UTILIZADAS EM ESTRUTURAS SIMILARES MOLDADAS NO LUGAR, DEVIDO AOS ELEVADOS MOMENTOS NA BASE.**
- \* **A ANÁLISE DA ESTABILIDADE DESTE TIPO DE ESTRUTURA EXIGE FREQUENTEMENTE DO PROJETISTA A CONSIDERAÇÃO DA NÃO-LINEARIDADE FÍSICA E GEOMÉTRICA.**

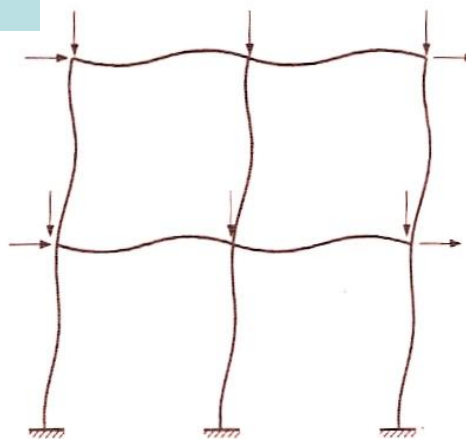
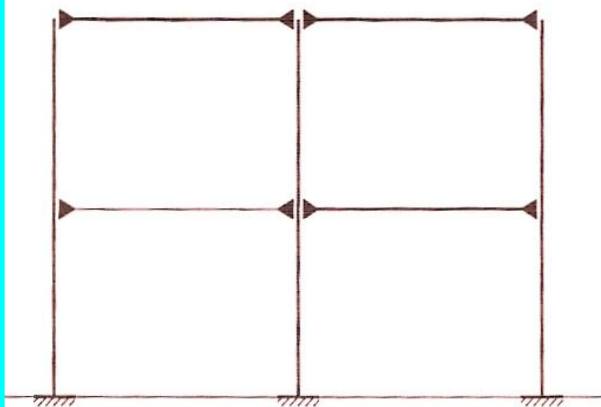
## ALTERNATIVAS DE ENRIJECIMENTO

LIGAÇÃO COM NÚCLEOS RÍGIDOS



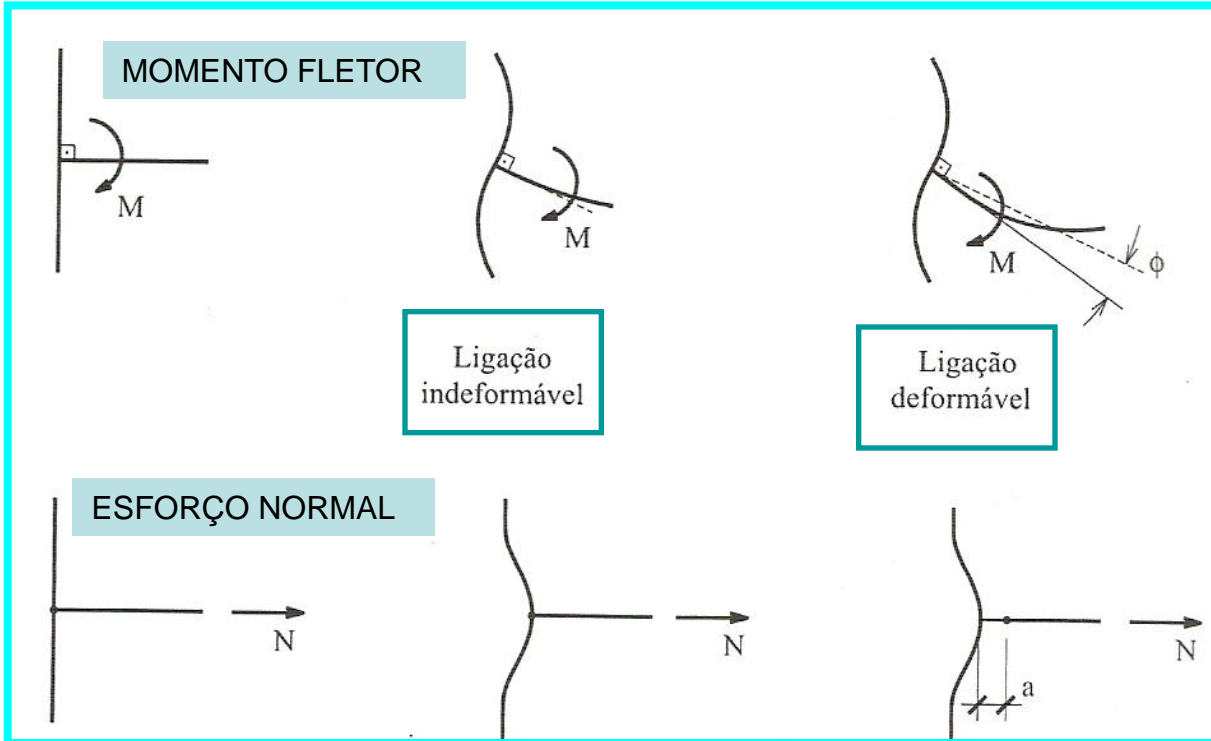
**DOCTORADO-EESC**  
**Prof Mounir El Debs**

LIGAÇÃO VIGA-PILAR RÍGIDA OU SEMI-RÍGIDA

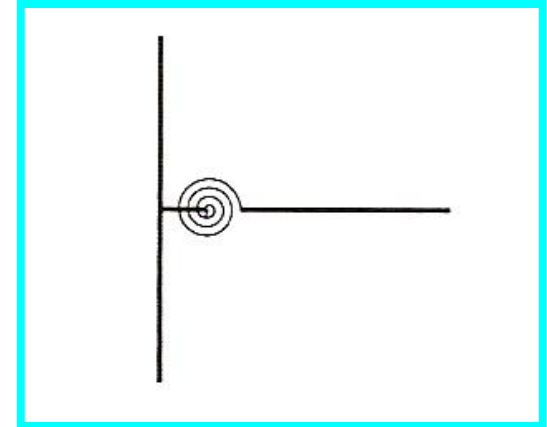


**ENFOQUE**  
**DA**  
**PESQUISA**

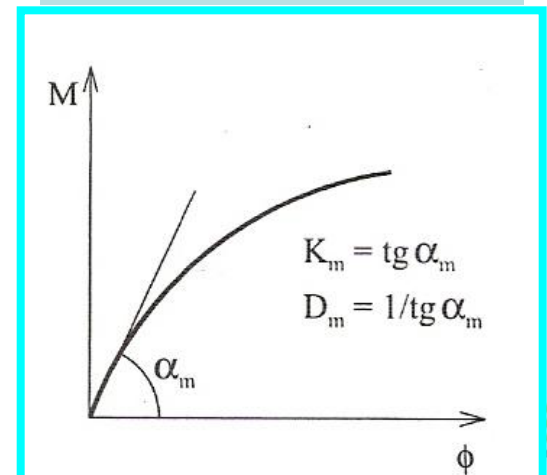
## CONCEITUAÇÃO – LIGAÇÃO SEMI-RÍGIDA



REPRESENTAÇÃO DA LIGAÇÃO NO MODELO DE BARRA



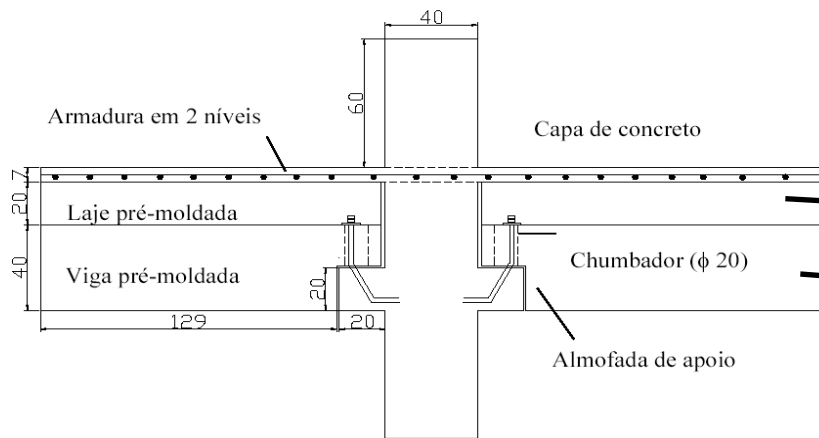
CURVA FORÇA x DESLOCAMENTO



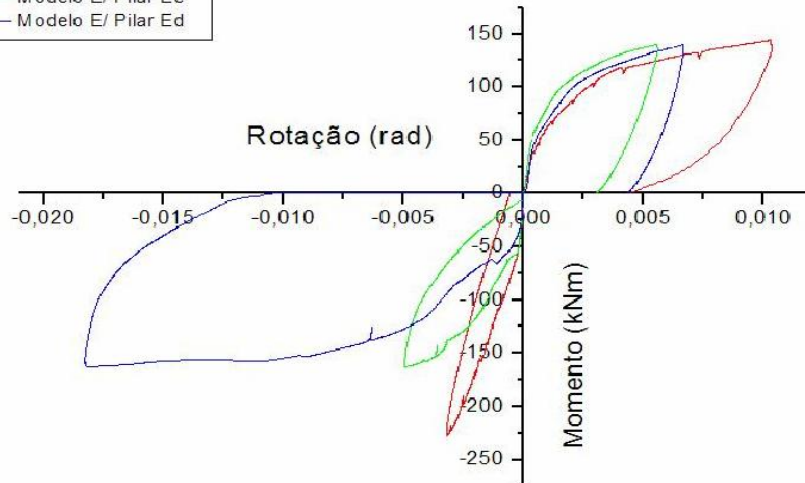
**NA LIGAÇÃO SEMI-RÍGIDA HAVERÁ UM DESLOCAMENTO RELATIVO ENTRE OS ELEMENTOS VINCULADOS**

# MOTIVAÇÃO

## DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DA RIGIDEZ DA LIGAÇÃO

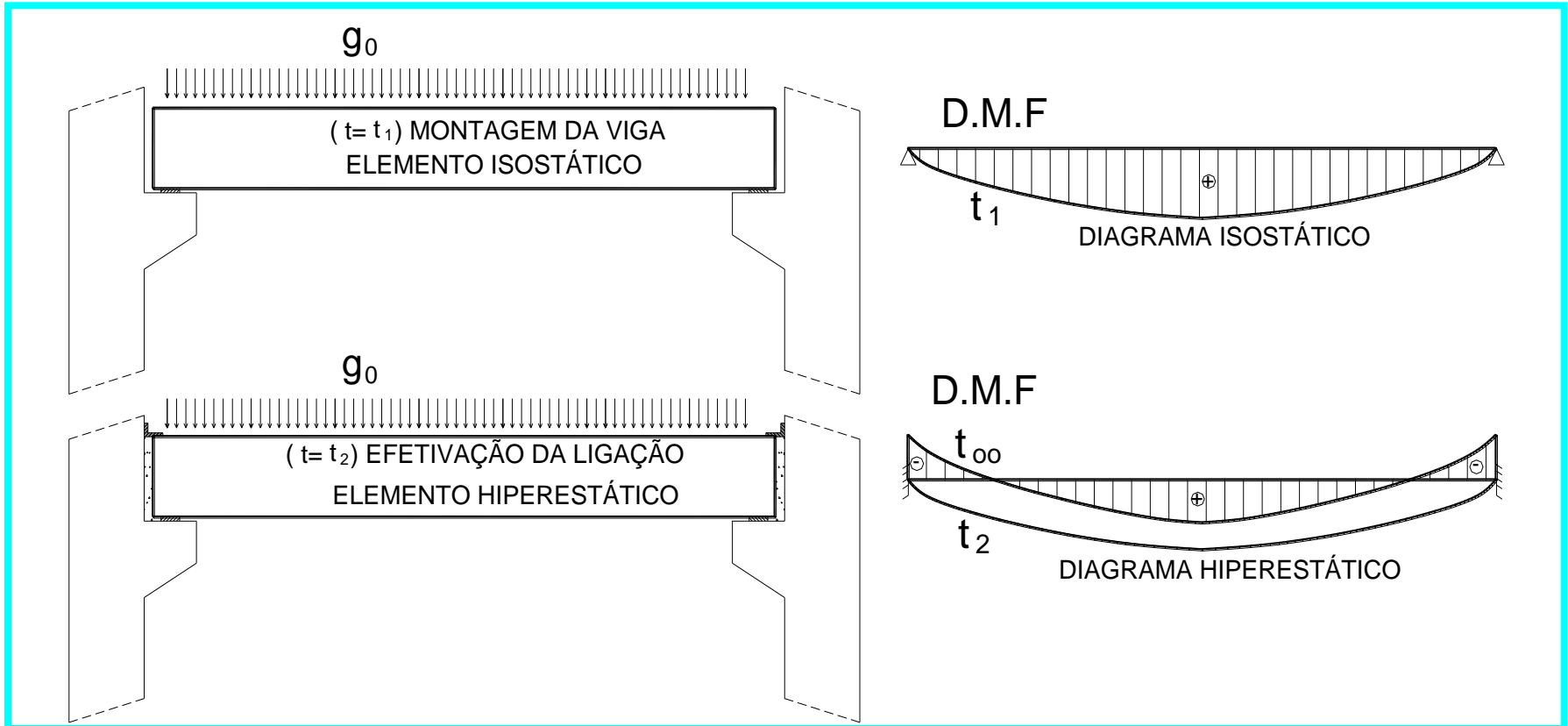


- Modelo I
- Modelo E/ Pilar Ee
- Modelo E/ Pilar Ed



## OUTRAS PARTICULARIDADES DA ANÁLISE ESTRUTURAL DE ESTRUTURAS PRÉ-MOLDADAS

→ O EFEITO DO TEMPO NOS DIAGRAMAS DE ESFORÇOS INTERNOS DA ESTRUTURA



→ A VERIFICAÇÃO DA ESTABILIDADE DA ESTRUTURA NAS DIVERSAS FASES TRANSITÓRIAS DE MONTAGEM.

# MOTIVAÇÃO

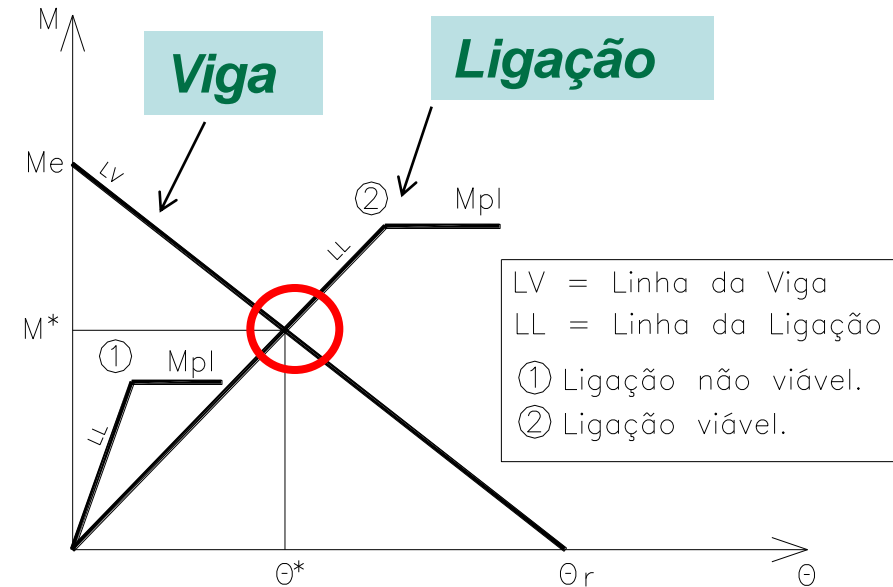
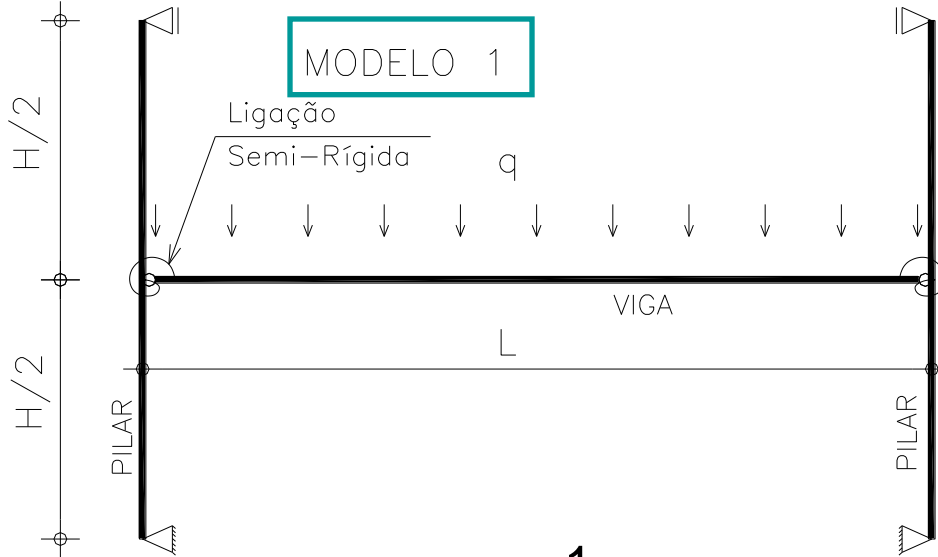
**VERIFICA-SE ASSIM UM CONSIDERÁVEL GRAU DE DIFICULDADE VIVENCIADO PELO PROJETISTA NA TAREFA DE GARANTIR SEGURANÇA, BOM DESEMPENHO E CUSTO COMPETITIVO PARA AS ESTRUTURAS MULTI-PISO DE CONCRETO PRÉ-MOLDADO.**



**PODE-SE DIZER QUE, ATUALMENTE, O PROJETISTA DESTA TIPO DE ESTRUTURA SE SENTE, DE CERTA FORMA, DESAMPARADO TANTO EM TERMOS DE CRITÉRIOS DE PROJETO COMO TAMBÉM DE FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS.**

# LIGAÇÃO SEMI-RÍGIDA, VALE A PENA ?

- Melhoria no desempenho da viga: redução de flecha e de momento fletor positivo.



$$K_{\text{ pilar+lig}} = \frac{1}{\frac{1}{K_{\text{ lig}}} + \frac{1}{K_{\text{ pilar}}}}$$

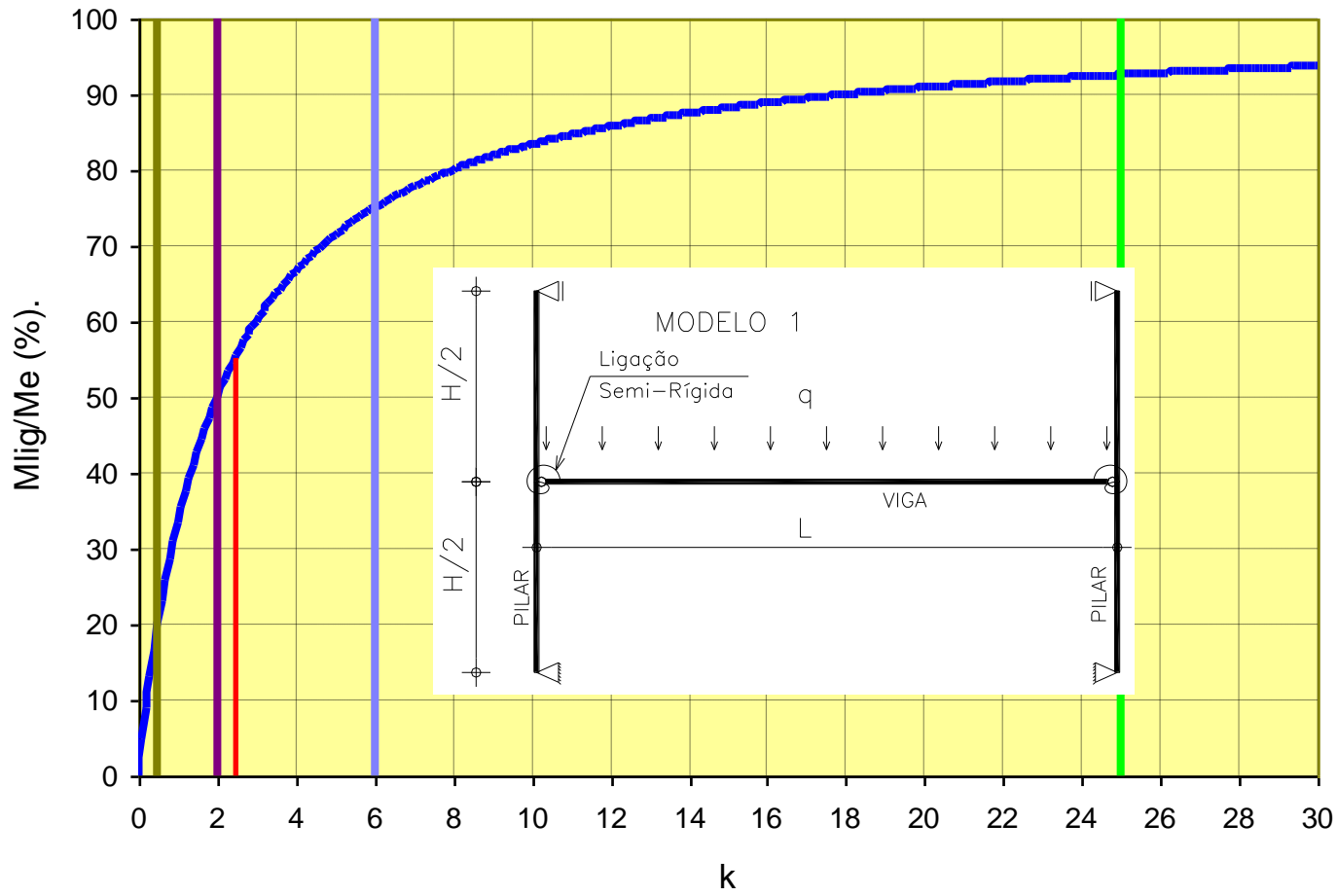
$$K_{\text{ pilar}} = \frac{12E_c I_{\text{ pilar}}}{H}$$

$$M_e = \frac{qL^2}{12} \quad \theta_r = \frac{qL^3}{24E_c I_{\text{ viga}}}$$

**VIABILIDADE**

# LIGAÇÃO SEMI-RÍGIDA, VALE A PENA ?

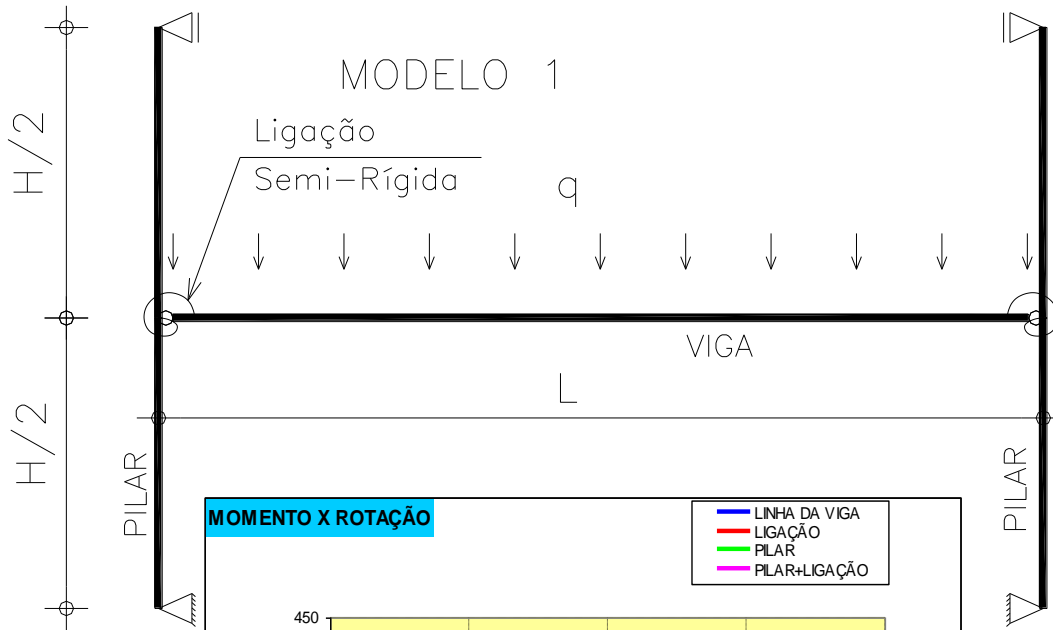
## GRAU DE ENGASTAMENTO X RIGIDEZ DA LIGAÇÃO



$$k = \frac{K_{lig}}{E_c I_{viga} L}$$

$$G = \frac{M^*}{M_e} = \frac{3k}{3k + 6}$$

# LIGAÇÃO SEMI-RÍGIDA, VALE A PENA ?



$$H = 4,0\text{m}$$

$$I_{\text{pilar}} = 5,21 \times 10^{-3} \text{m}^4 \text{ (seção: } 50\text{cm} \times 50\text{cm)}$$

$$L = 8,0\text{m}$$

$$I_{\text{viga}} = 2,60 \times 10^{-3} \text{m}^4$$

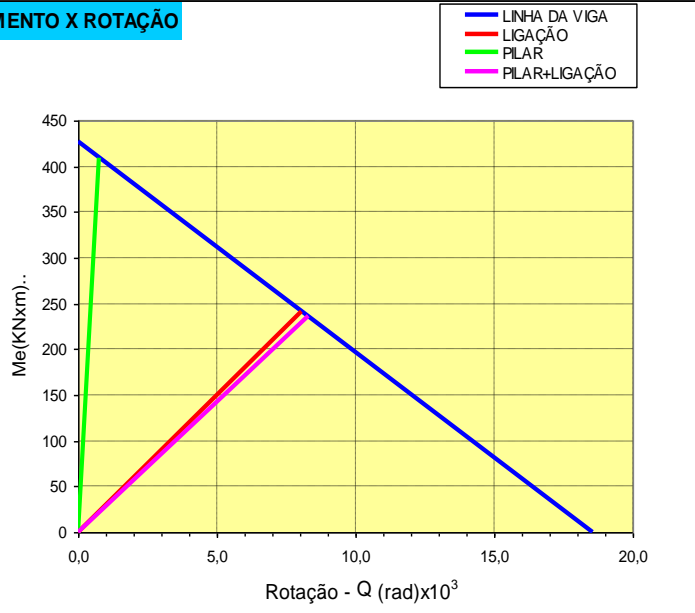
$$q = 80\text{kN/m}$$

$$E_c = 3,54 \times 10^7 \text{kN/m}^2$$

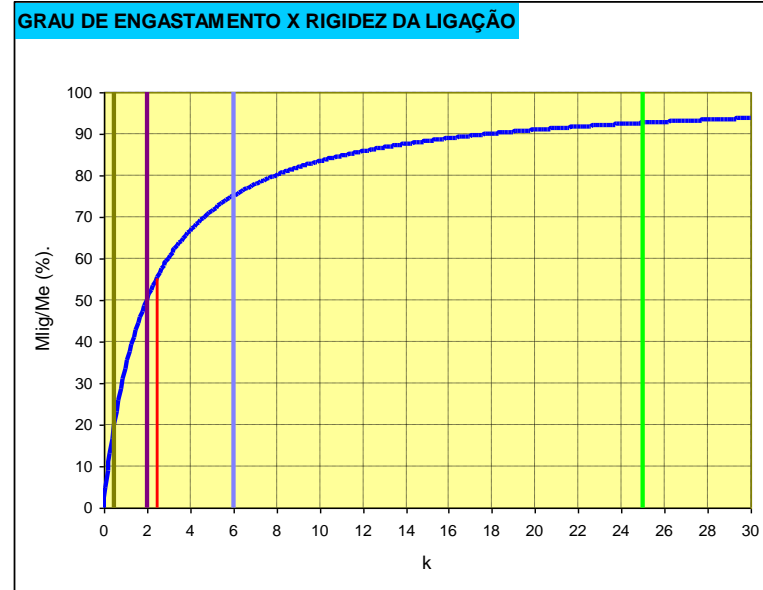
$$M_{\text{pl}} = 350\text{kNxm}$$

$$K_{\text{lig}} = 30\text{MNxm / rad}$$

MOMENTO X ROTAÇÃO

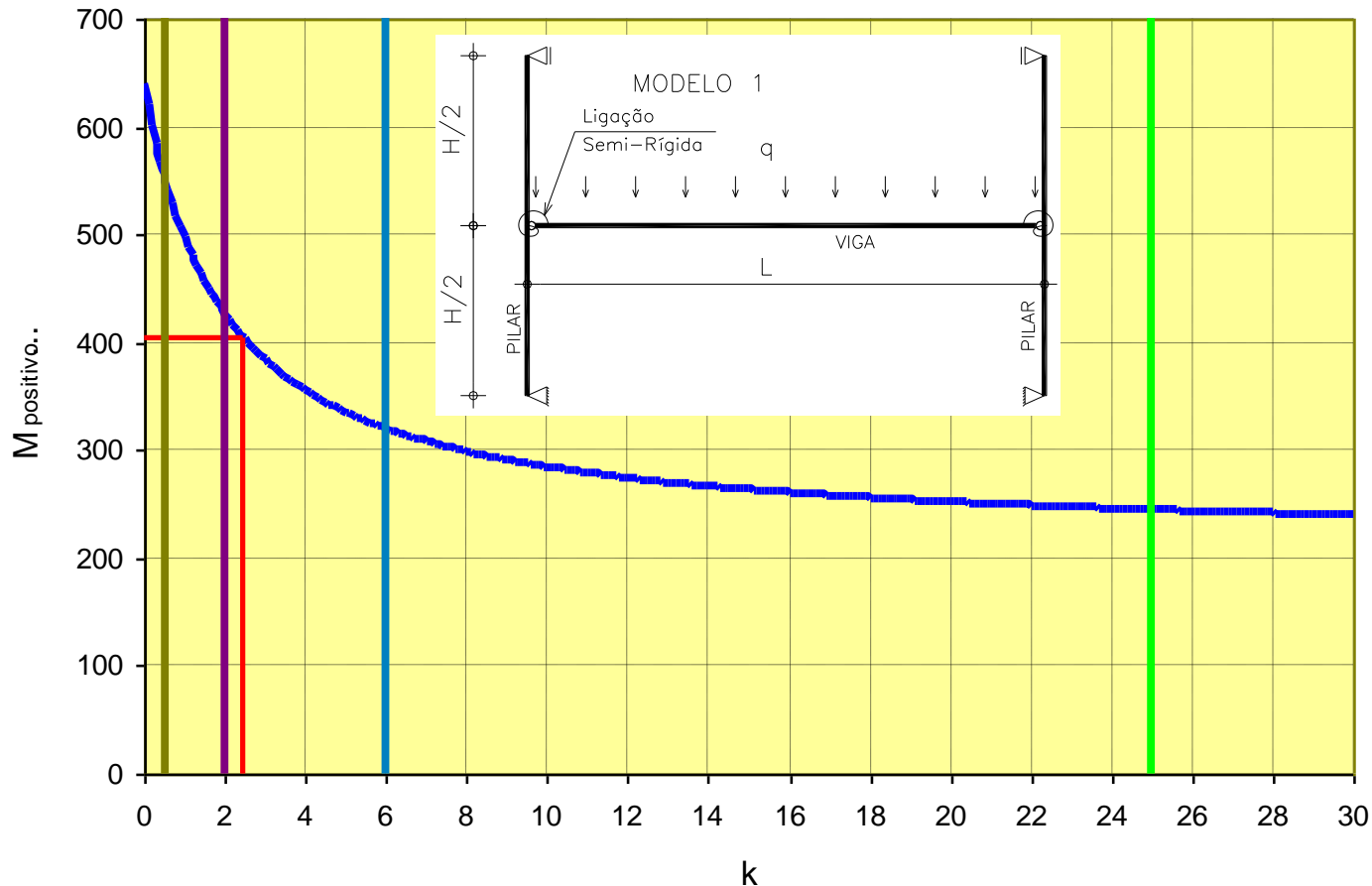


GRAU DE ENGASTAMENTO X RIGIDEZ DA LIGAÇÃO



# LIGAÇÃO SEMI-RÍGIDA, VALE A PENA ?

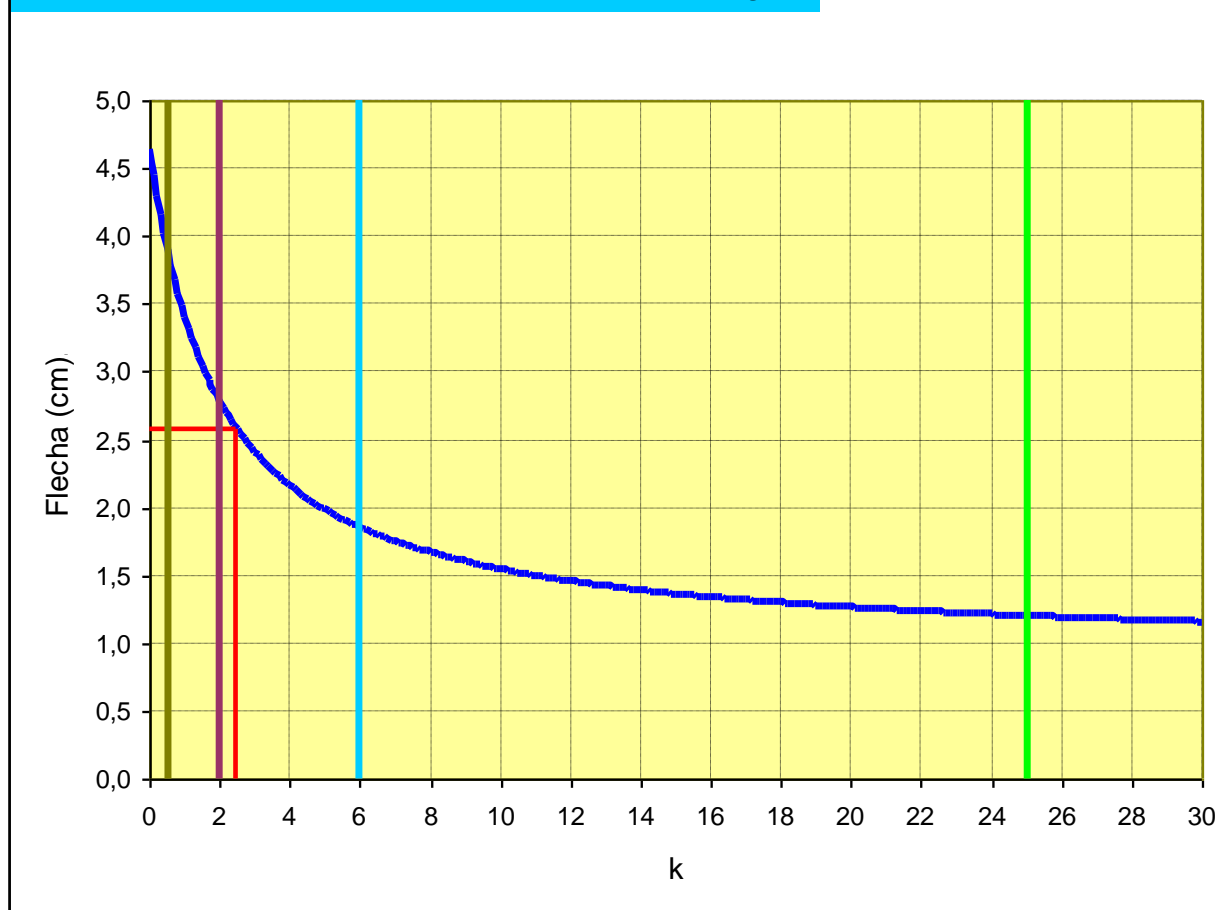
## MOMENTO POSITIVO X RIGIDEZ DA LIGAÇÃO



$$M_{pos} = \frac{qL^2}{8} - M^*$$

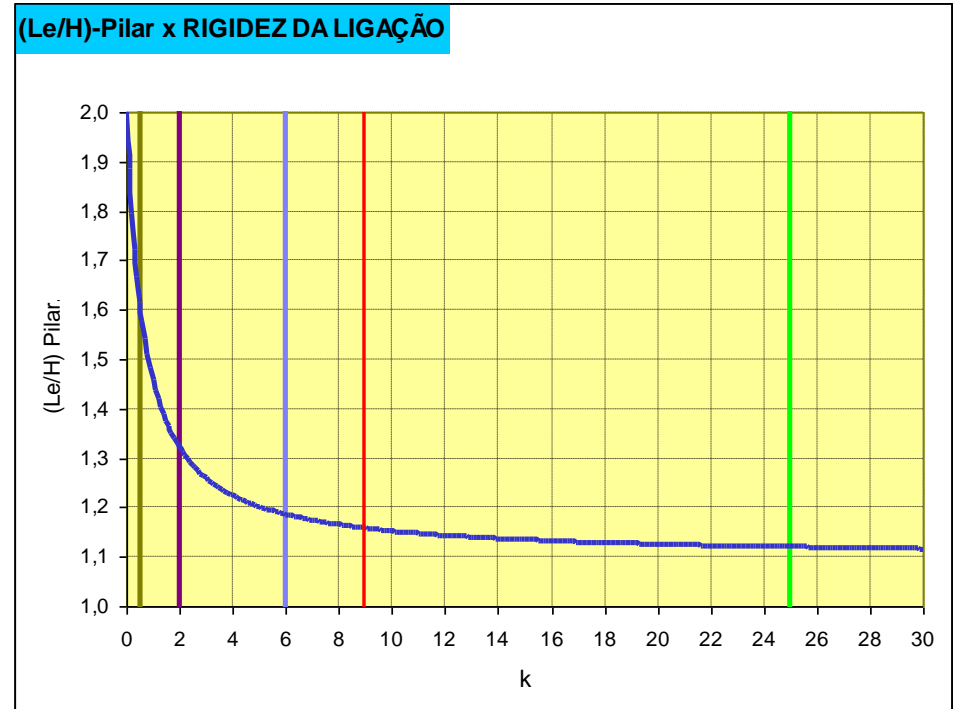
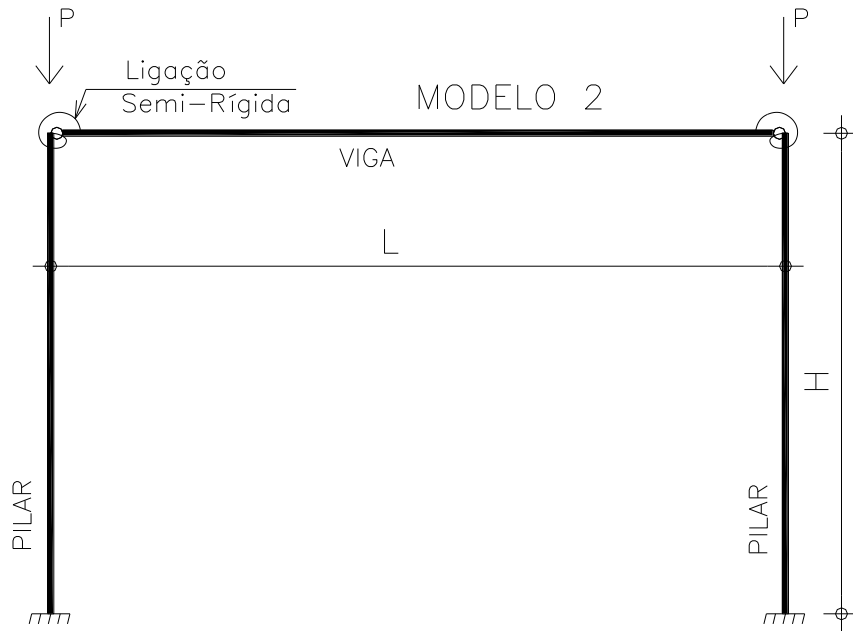
# LIGAÇÃO SEMI-RÍGIDA, VALE A PENA ?

FLECHA NO MEIO DO VÃO X RIGIDEZ DA LIGAÇÃO



$$f = \frac{5qL^4}{384E_c I_{viga}} - \frac{M^* L^2}{8E_c I_{viga}}$$

# LIGAÇÃO SEMI-RÍGIDA, VALE A PENA ?



$H = 4,0m$ ; (altura do pilar)

$I_{pilar} = 3,26 \times 10^{-4} m^4$  (seção do pilar: 25cmx25cm)

$L = 8,0m$ ; (comprimento da viga)

$I_{viga} = 1,07 \times 10^{-3} m^4$  (seção da viga protendida: 20cmx40cm)

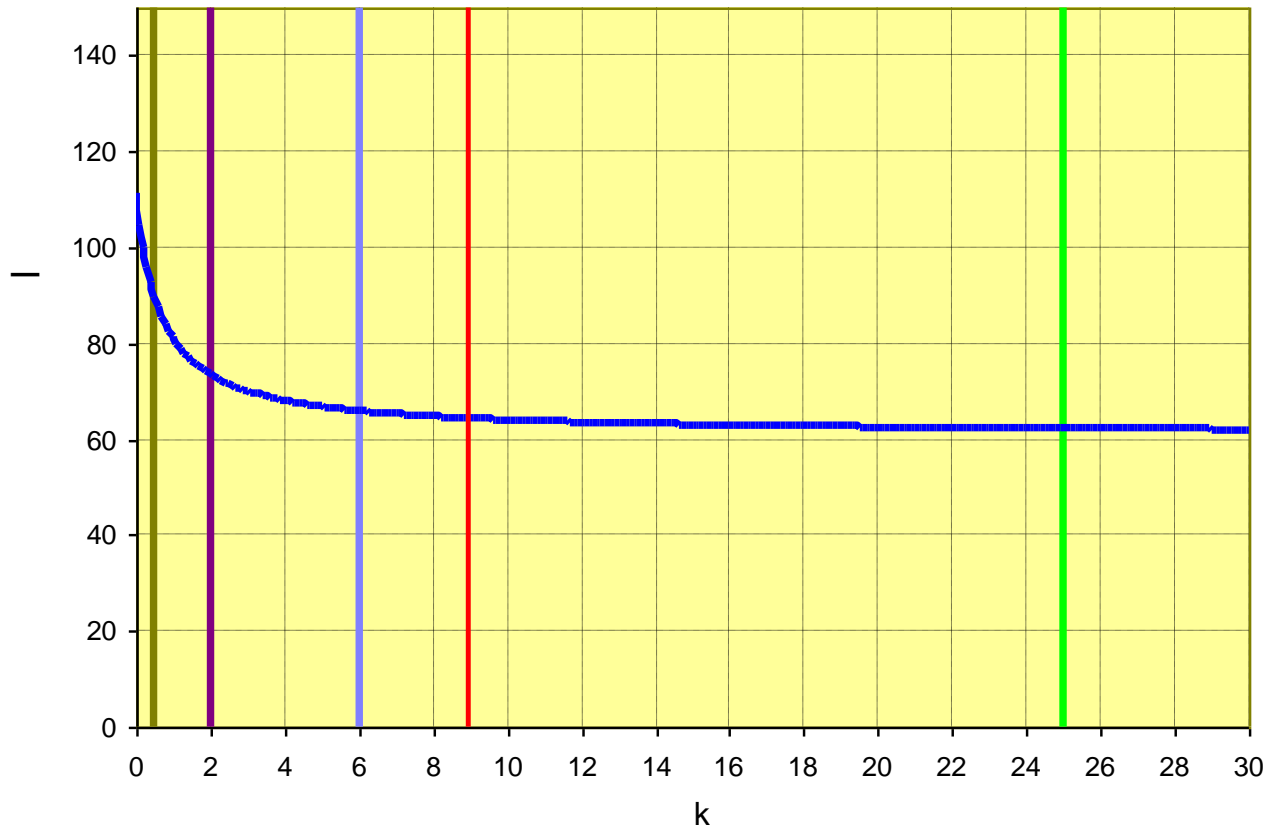
$E_c = 2,5 \times 10^7 kN/m^2$

$K_{lig} = 30 MNxm / rad$

$$L_e = \pi \sqrt{\frac{E_c I_{pilar}}{P_{crit}}} \quad \beta = \frac{L_e}{H}$$

# LIGAÇÃO SEMI-RÍGIDA, VALE A PENA ?

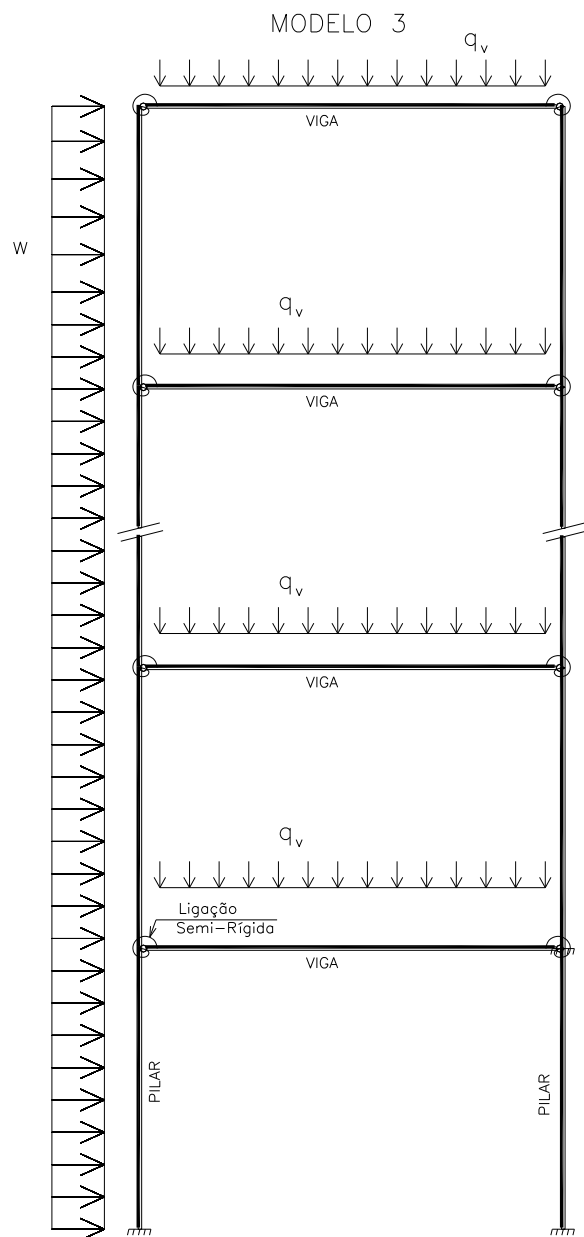
## ESBELTEZ DO PILAR X RIGIDEZ DA LIGAÇÃO



$$\lambda = \frac{L_e}{i} = \frac{L_e}{\sqrt{\frac{I_{pilar}}{A_{pilar}}}}$$

$$k = 8,97 \Rightarrow \lambda \cong 64,37$$

# LIGAÇÃO SEMI-RÍGIDA, VALE A PENA ?



$H = 4,0\text{m};$ (altura do pilar)

$I_{\text{pilar}} = 2,13 \times 10^{-3} \text{ m}^4$  (seção do pilar: 40cmx40cm)

$L = 8,0\text{m};$ (comprimento da viga)

$I_{\text{viga}} = 2,60 \times 10^{-3} \text{ m}^4$  (seção da viga protendida: 25cmx50cm)

$E_c = 3,54 \times 10^7 \text{ kN/m}^2$  ( $f_{ck} = 40\text{MPa}$ )

Caso1:  $K_{\text{lig}} = 30\text{MNxm / rad}$  ;  $e = 0,50\text{m}$  excentricidade da ligação

Caso2:  $K_{\text{lig}} = 5\text{MNxm / rad}$  ;  $e = 0,50\text{m}$  excentricidade da ligação

$q_v = 90\text{kN/m};$  (carga vertical nas vigas)

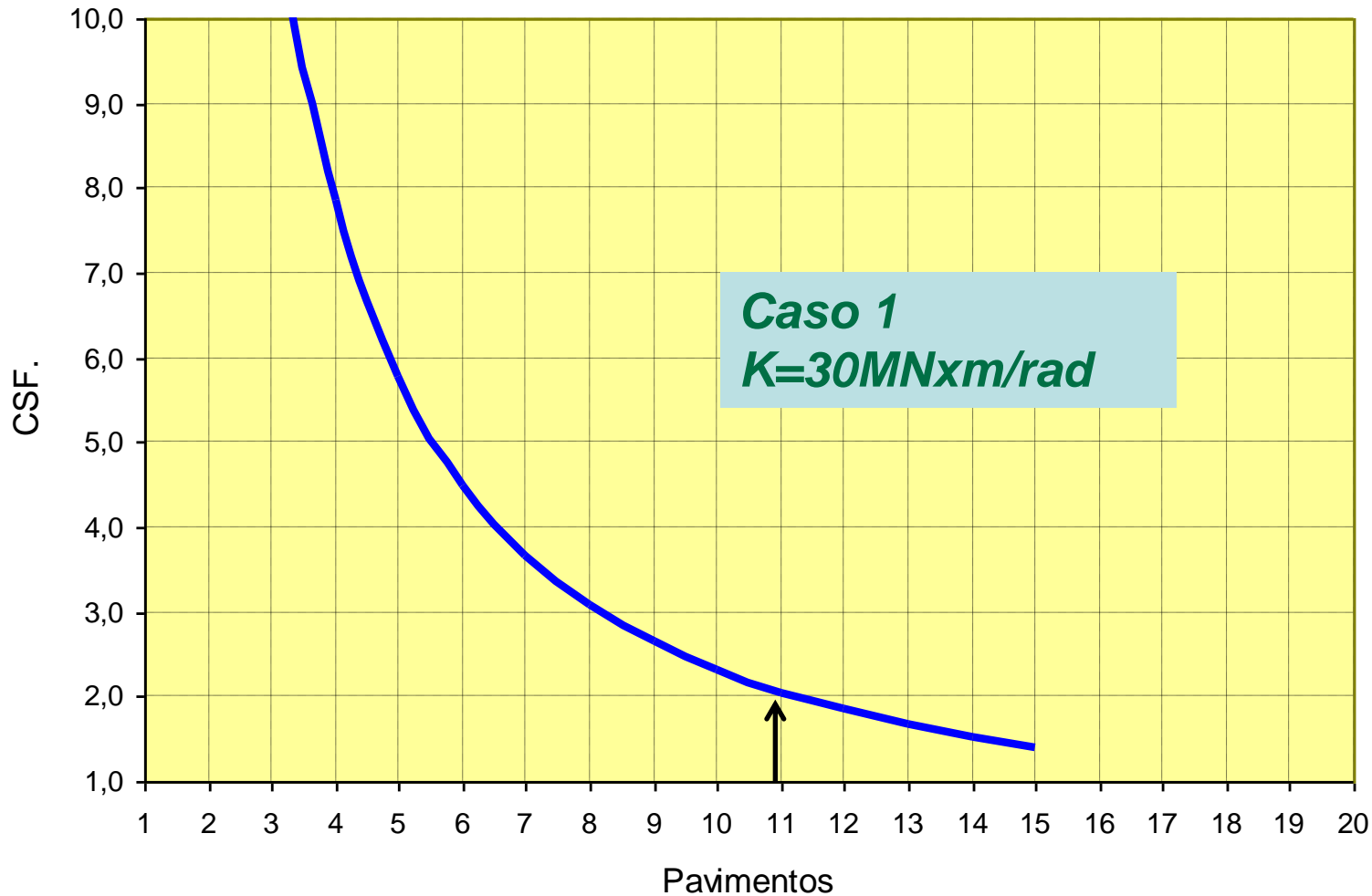
$w = 4\text{kN/m};$ (força horizontal – vento)

Tabela 1 – Grau de não-linearidade

CSF	Situação da Análise
$CSF < 2$	Estrutura muito esbelta. Inaceitável.
$2 < CSF < 4$	Grau de Não -Linearidade Elevado
$4 < CSF < 10$	Grau de Não- Linearidade Moderado
$CSF > 10$	Análise Não-Linear dispensada.

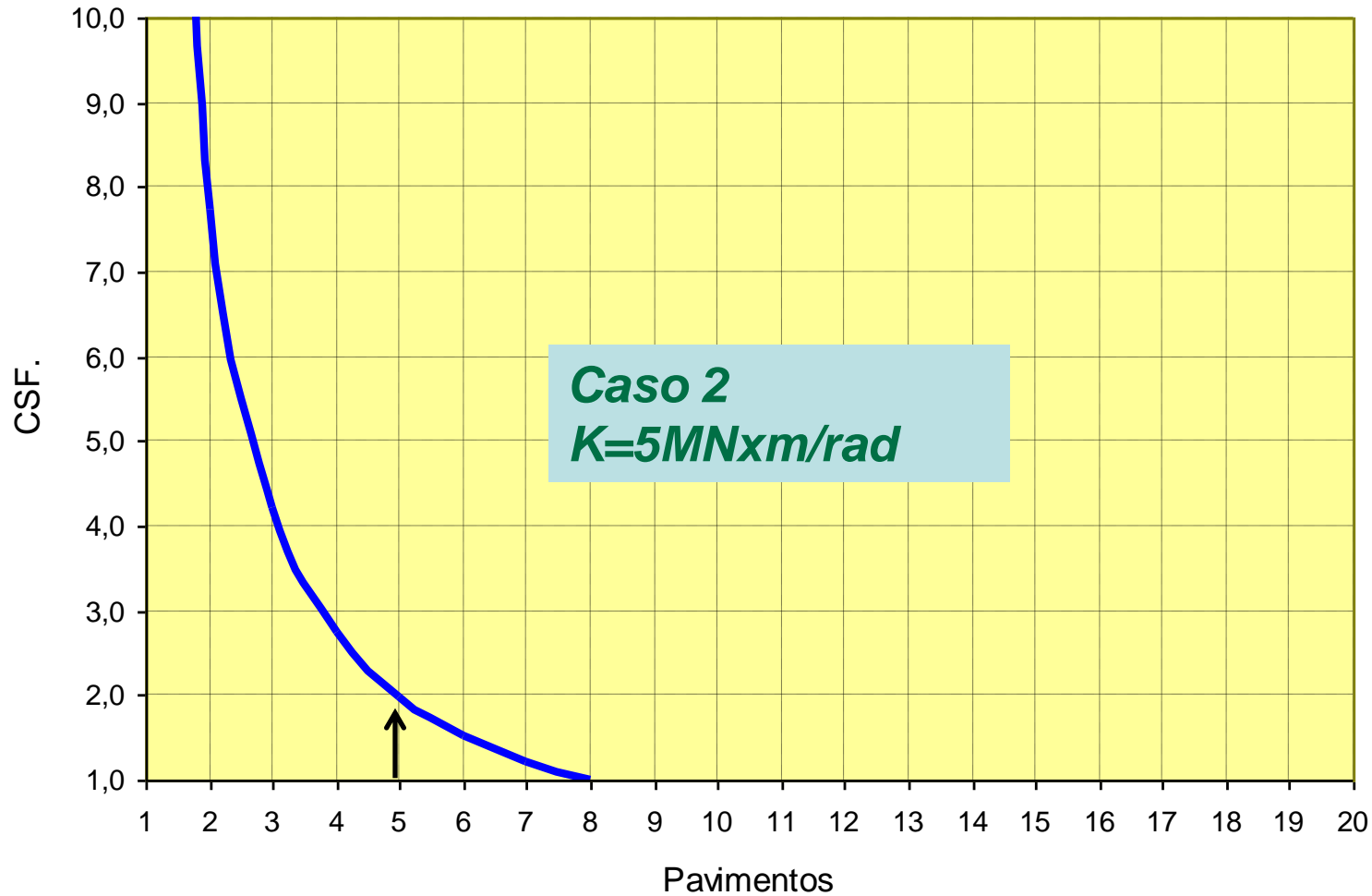
# LIGAÇÃO SEMI-RÍGIDA, VALE A PENA ?

## Segurança à Flambagem x Número de Pavimentos



# LIGAÇÃO SEMI-RÍGIDA, VALE A PENA ?

## Segurança à Flambagem x Número de Pavimentos

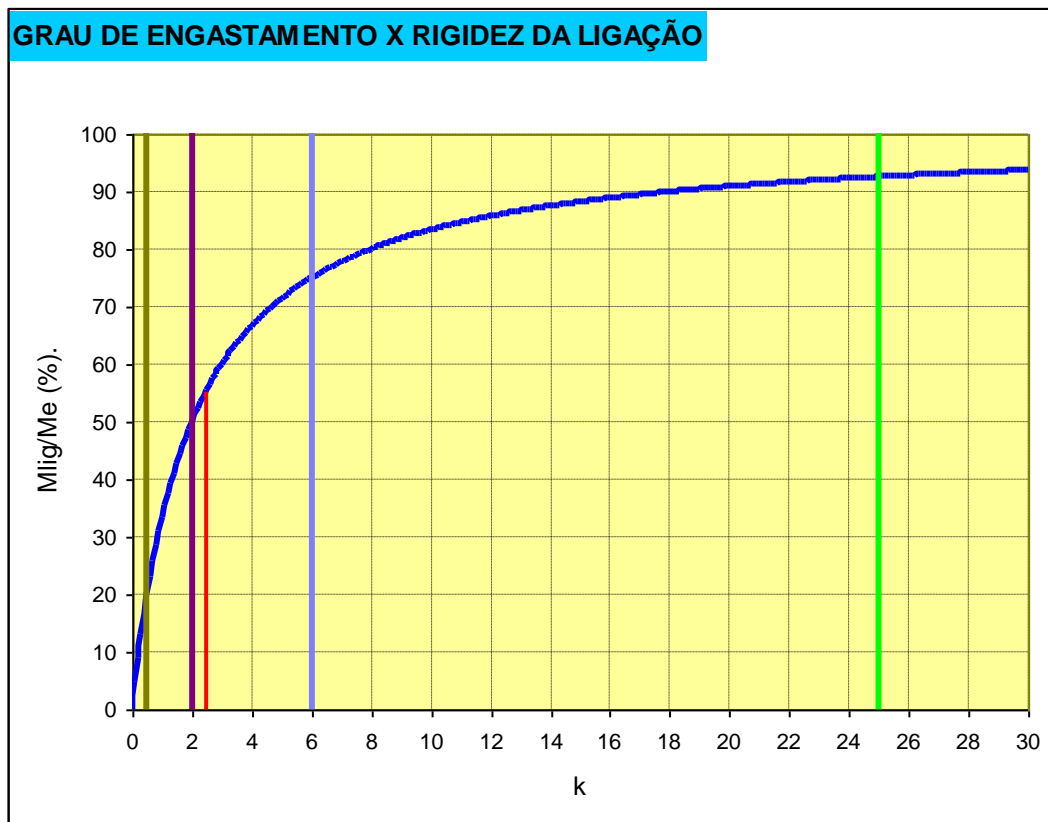




# LIGAÇÃO SEMI-RÍGIDA, CONCLUSÕES

→ O grau de engastamento da ligação é um parâmetro que pode ser utilizado pelo projetista como referência para comparação de eficiência entre ligações.

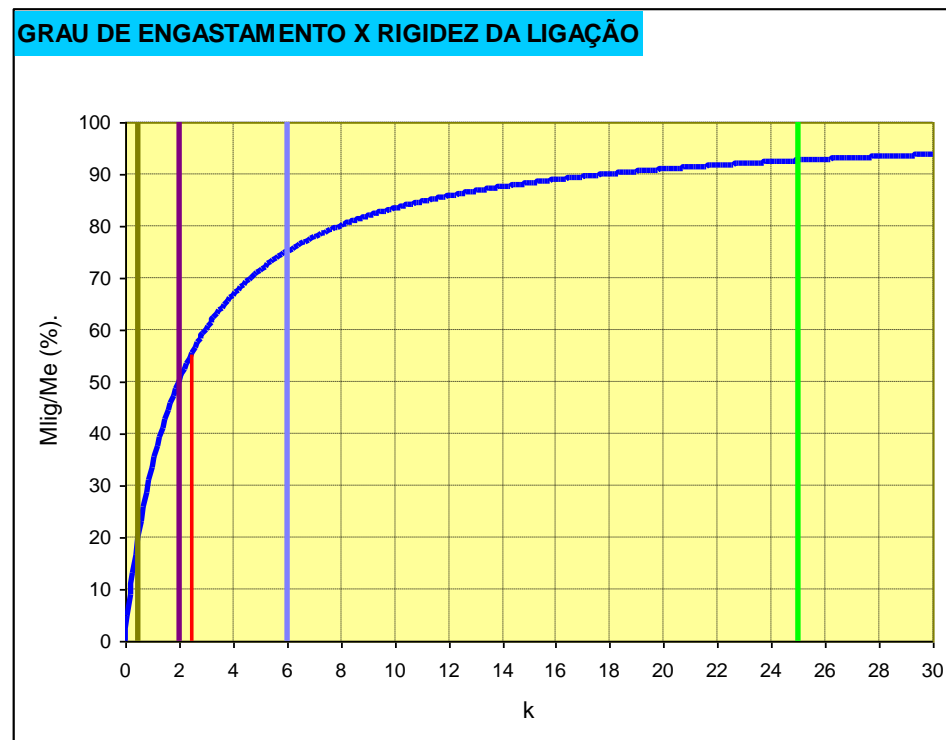
→ A contribuição da ligação semi-rígida na melhoria das condições de estabilidade cresce naturalmente com o aumento do grau de engastamento, mas cresce com taxas variáveis.



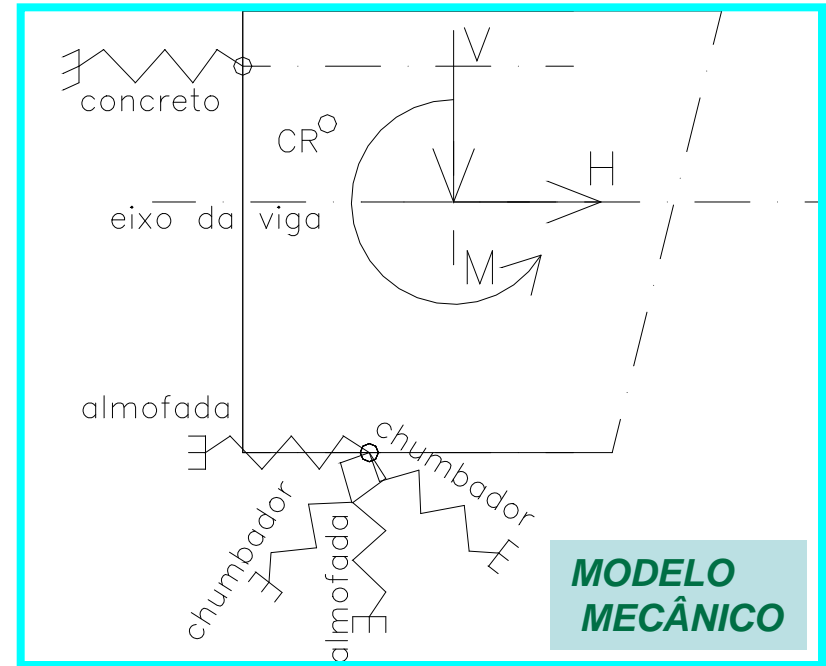
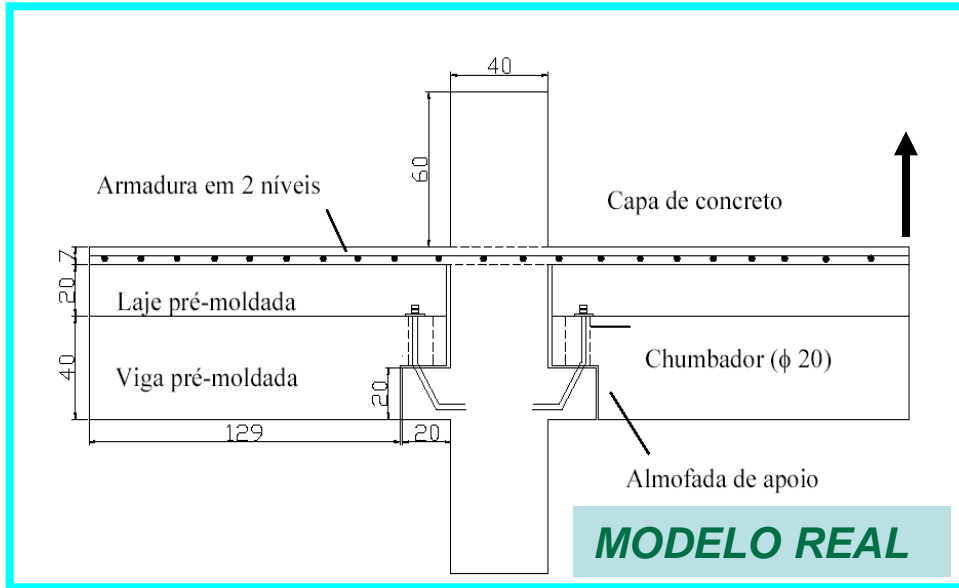
# LIGAÇÃO SEMI-RÍGIDA, CONCLUSÕES

→ Contribuições significativas para a estabilidade global da estrutura acontecem mesmo para um grau de engastamento da ordem de 20%.

→ As taxas de crescimento são bem elevadas até o nível de 50% de grau de engastamento. De 50% a 75% de grau de engastamento o crescimento da contribuição é moderado, de 75% a 90% o crescimento é baixo e a partir de 90% a ligação pode ser considerada como rígida.



# QUAL É A RIGIDEZ DA LIGAÇÃO ?



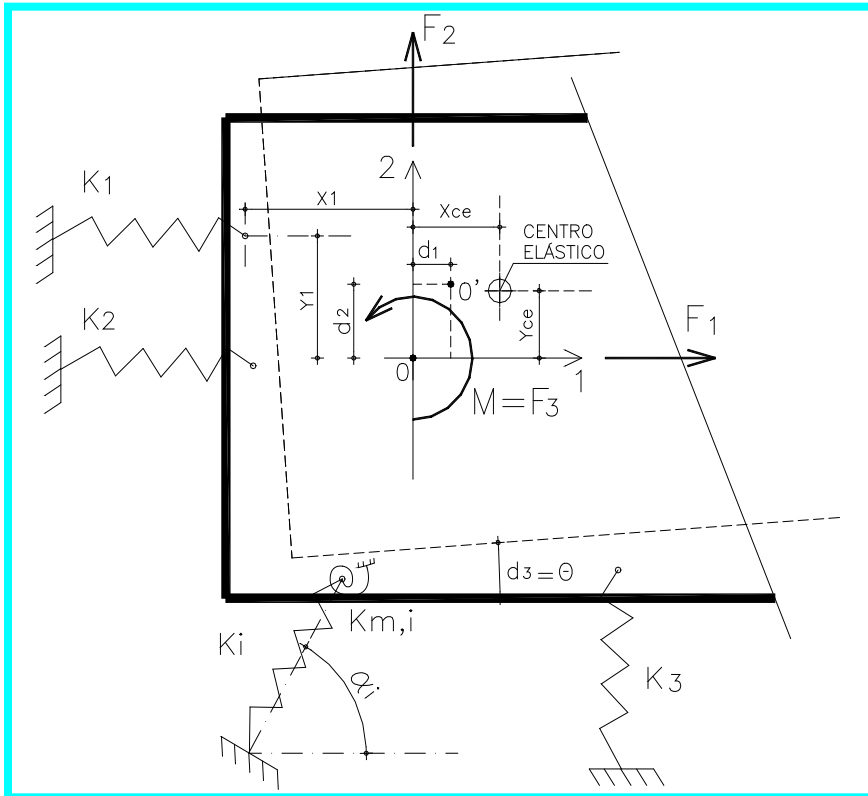
## MODELAÇÃO - COMPONENTES DE TRANSFERÊNCIA DE FORÇA

- \* Definir a geometria da ligação – posição e direção dos componentes.
- \* Calcular a rigidez, (constante de mola de cada componente), formulações teóricas ajustadas por resultados experimentais
- \* Montar equação de equilíbrio do sistema.

## ESTA TÉCNICA PERMITE O CÁLCULO ANALÍTICO DA RIGIDEZ DA LIGAÇÃO

FIB (2007). Guide to good practice: Structural Connection for Precast Concrete Buildings. **FIB Commission C6: Prefabrication TG 6.2 Connections.**

# QUAL É A RIGIDEZ DA LIGAÇÃO ?



**DISPOSIÇÃO DOS COMPONENTES DE TRANSFERÊNCIA DE CARGA**

$$\begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{Bmatrix}$$

$$[S]\{d\} = \{F\}$$

$[S]$  = matriz de rigidez

$\{d\}$  = vetor de deslocamentos

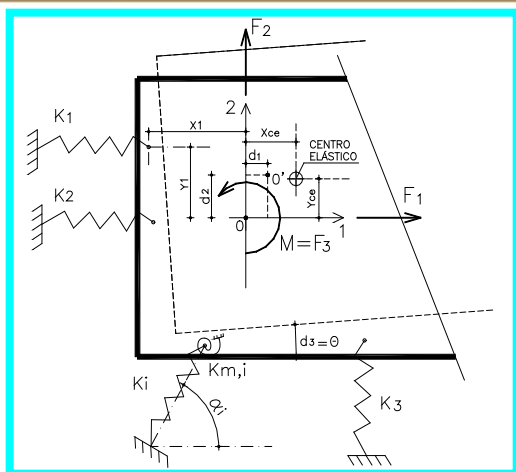
$\{F\}$  = vetor de cargas externas

$$\begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ M \end{Bmatrix} \Rightarrow K_\phi = \frac{M}{d_3}$$

$$x_{ce} = \frac{S_{11}S_{32} - S_{12}S_{31}}{S_{11}S_{22} - S_{12}S_{21}}$$

$$y_{ce} = \frac{S_{32}S_{21} - S_{31}S_{22}}{S_{11}S_{22} - S_{12}S_{21}}$$

# QUAL É A RIGIDEZ DA LIGAÇÃO ?



O modelo mecânico apresenta uma formulação simples podendo ser implementada em ambiente confortável de planilha onde o projetista pode estudar a variação da rigidez da ligação com a alteração na posição, na direção e na rigidez dos componentes. Pode ir assim ajustando os componentes até conseguir a rigidez adequada para que a ligação possa desempenhar com eficiência na estrutura.

## MATRIZ DE RIGIDEZ

1,000E+10	3,125E+05	-2,200E+09
3,125E+05	3,831E+05	6,249E+04
-2,200E+09	6,249E+04	4,840E+08

## MATRIZ DE FLEXIBILIDADE

2,140E-06	-3,333E-06	9,729E-06
-3,333E-06	7,801E-06	-1,515E-05
9,729E-06	-1,515E-05	4,422E-05

## AÇÕES

0,00
0,00
84,00

## RIGIDEZ À ROTAÇÃO

$K_{\phi} =$	22,61
--------------	-------

## DESLOCAMENTOS

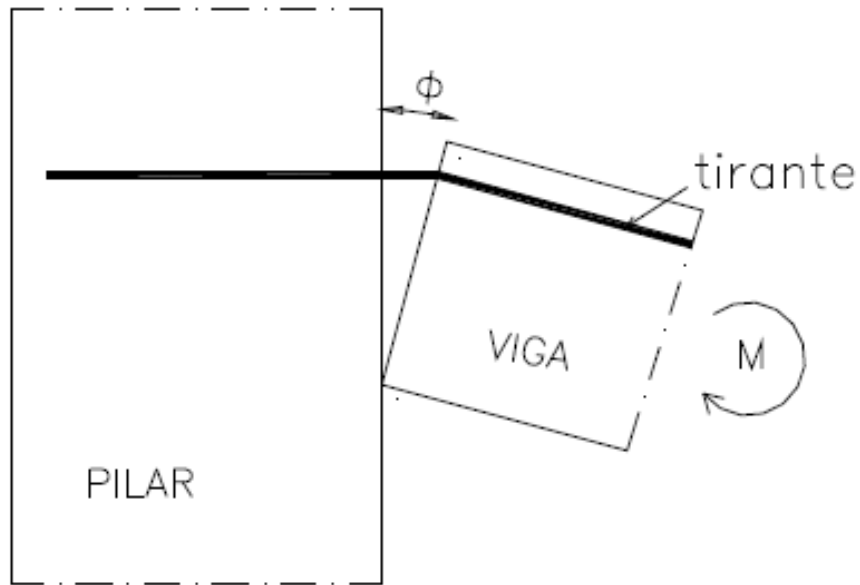
8,172E-04
-1,273E-03
3,715E-03

## CARACTERÍSTICA DO MODELO MECÂNICO

Componentes que têm sua linha de ação passante pelo (CE) não contribuem com a rigidez da ligação.

# QUAL É A RIGIDEZ DA LIGAÇÃO ?

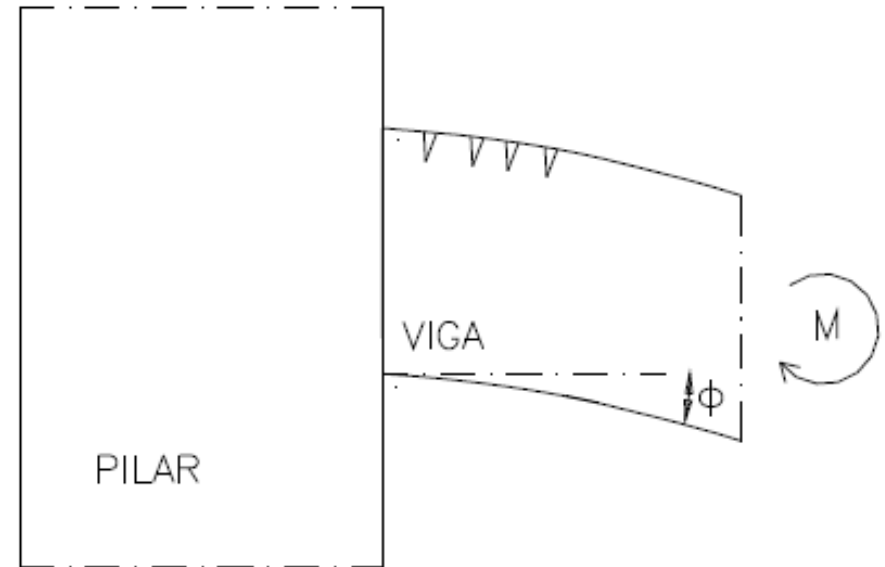
CASO 1 – RIGIDEZ FRACA



$\phi$  = rotação de corpo rígido

**MÉTODO DOS COMPONENTES**

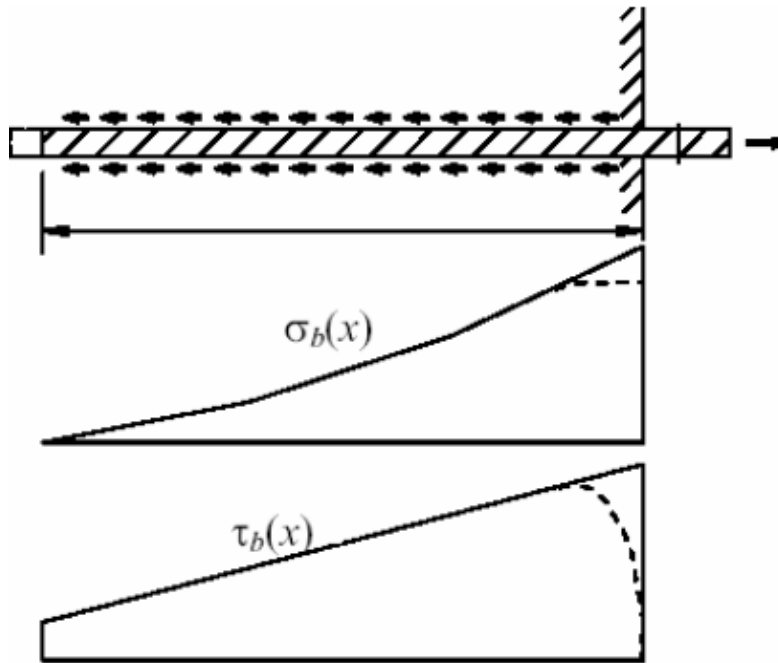
CASO 2 – RIGIDEZ FORTE



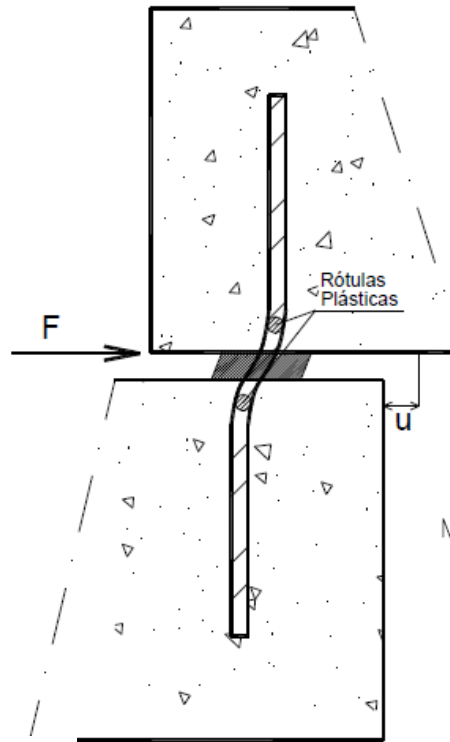
**LIGAÇÃO RÍGIDA**

# MÉTODO DOS COMPONENTES

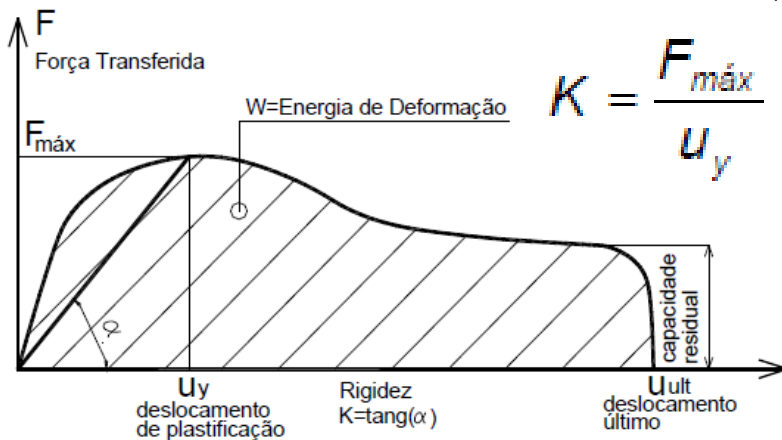
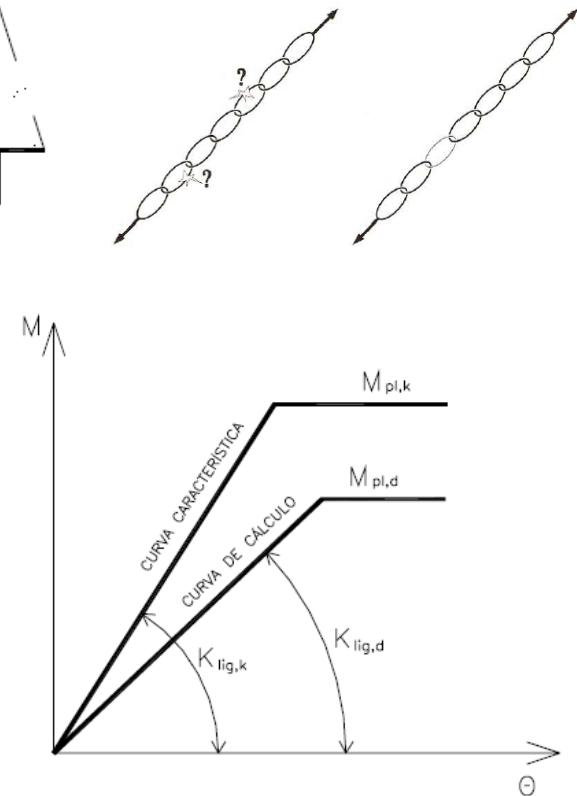
## BARRA INSERIDA



## EFEITO DE PINO DO CHUMBADOR



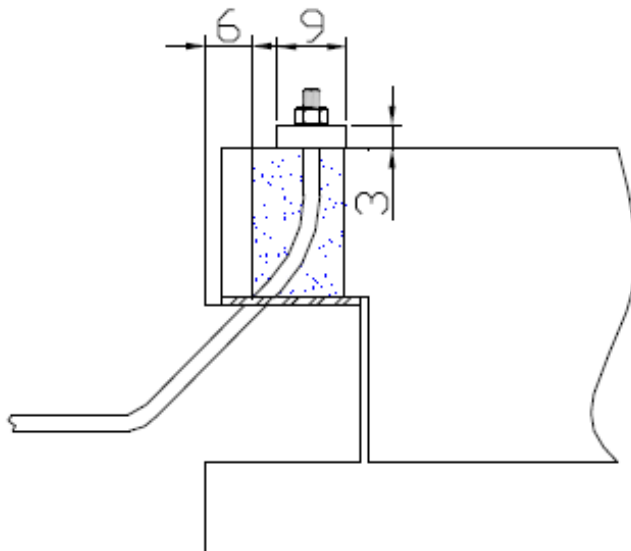
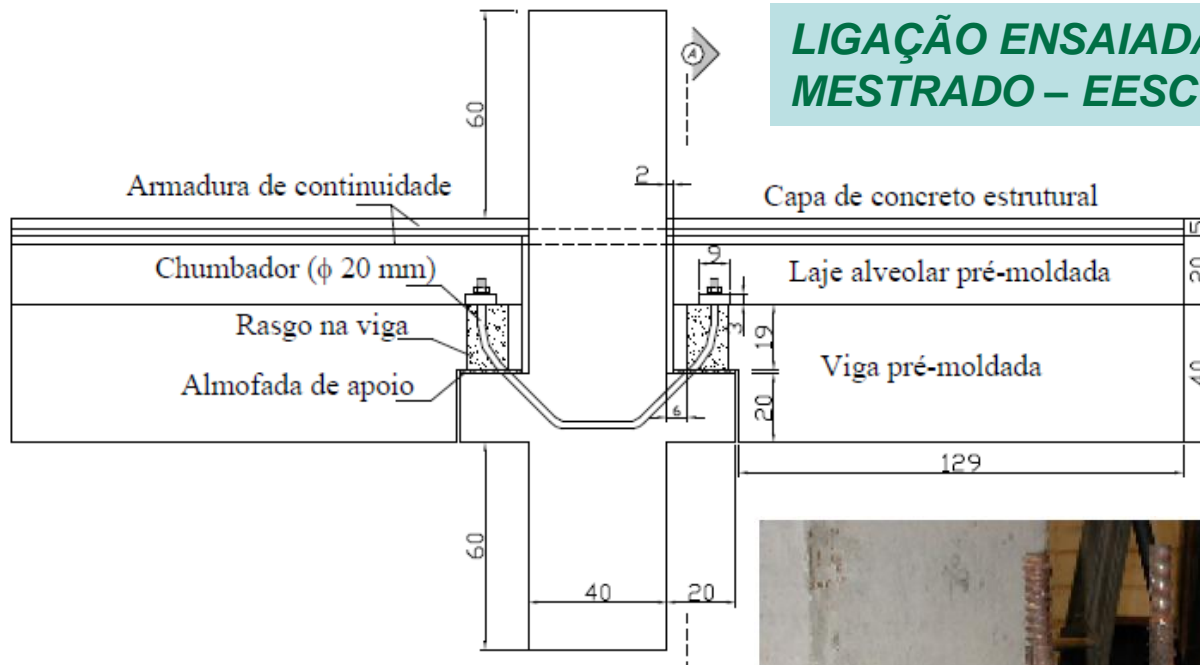
## LIGAÇÃO



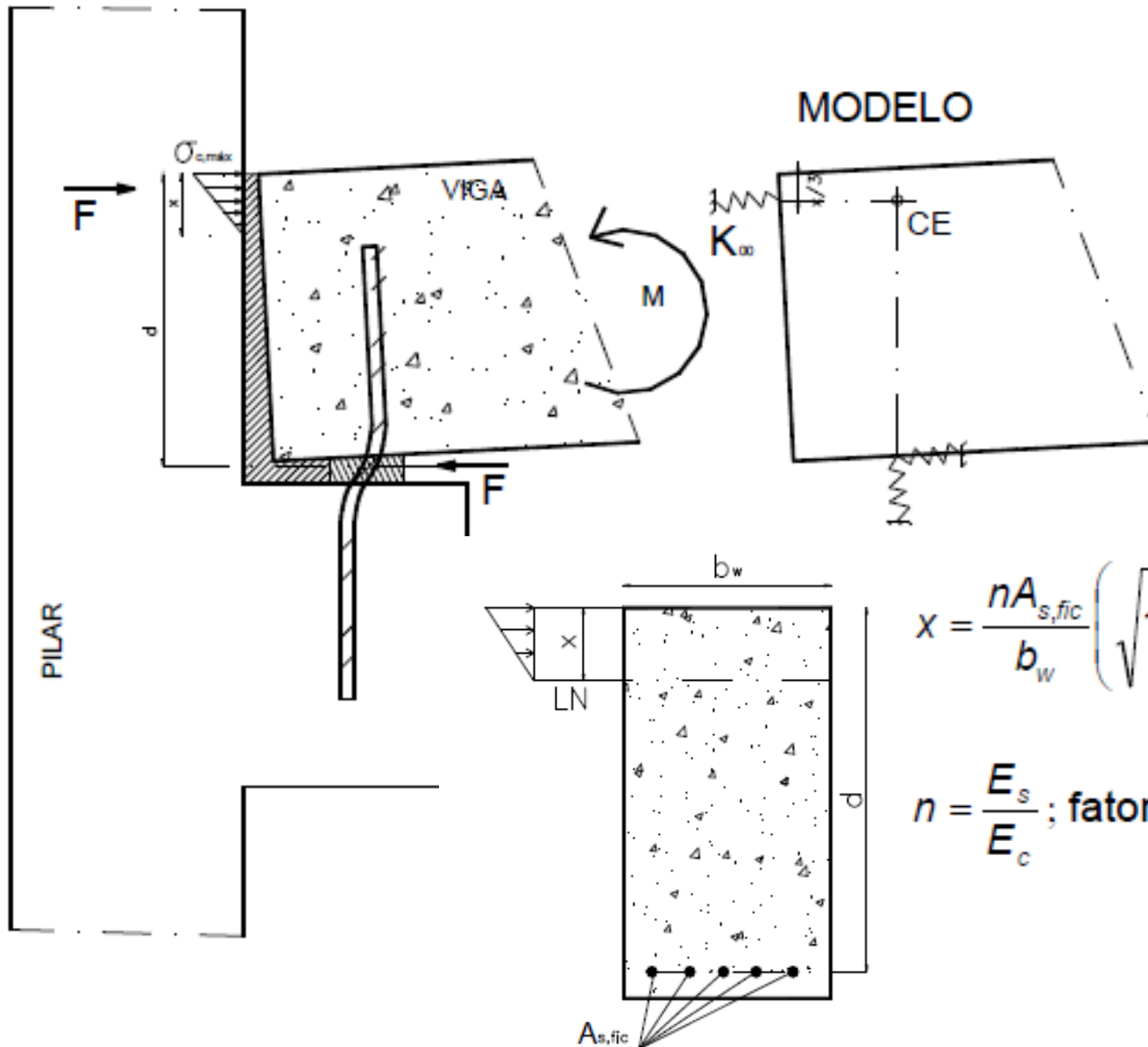
$$\xi^w = \frac{W}{F_{m\acute{a}x} u_{ult}}$$

# EXEMPLO

## LIGAÇÃO ENSAIADA MESTRADO – EESC



# EXEMPLO

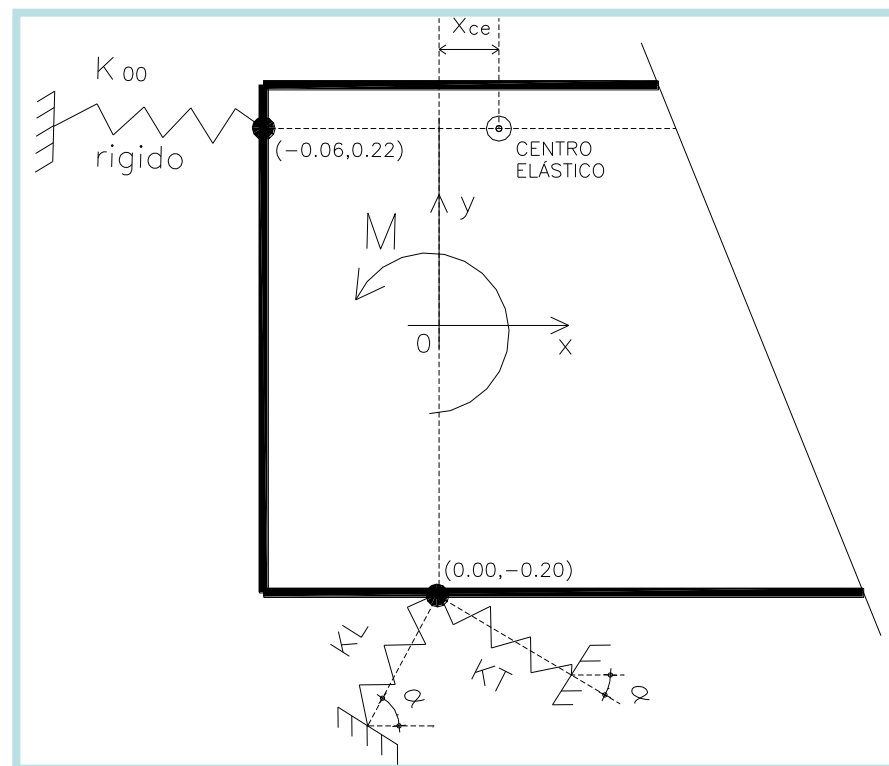
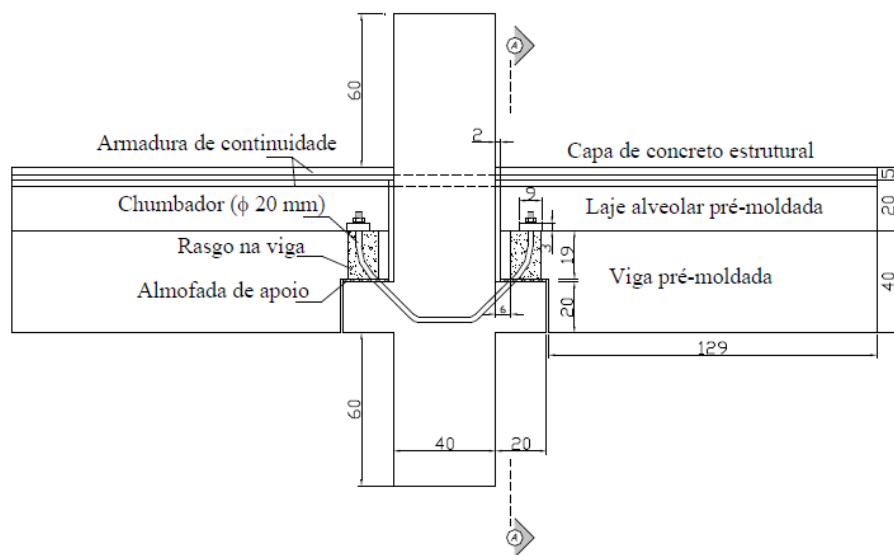


$$A_{s, fic} = \frac{F_{pl}}{f_{yk}}$$

$$x = \frac{nA_{s, fic}}{b_w} \left( \sqrt{1 + \frac{2b_w d}{nA_{s, fic}}} - 1 \right) (cm)$$

$$n = \frac{E_s}{E_c}; \text{ fator de homogeneiza\c{c}\~{a}o.}$$

# ANALÍTICO X EXPERIMENTAL



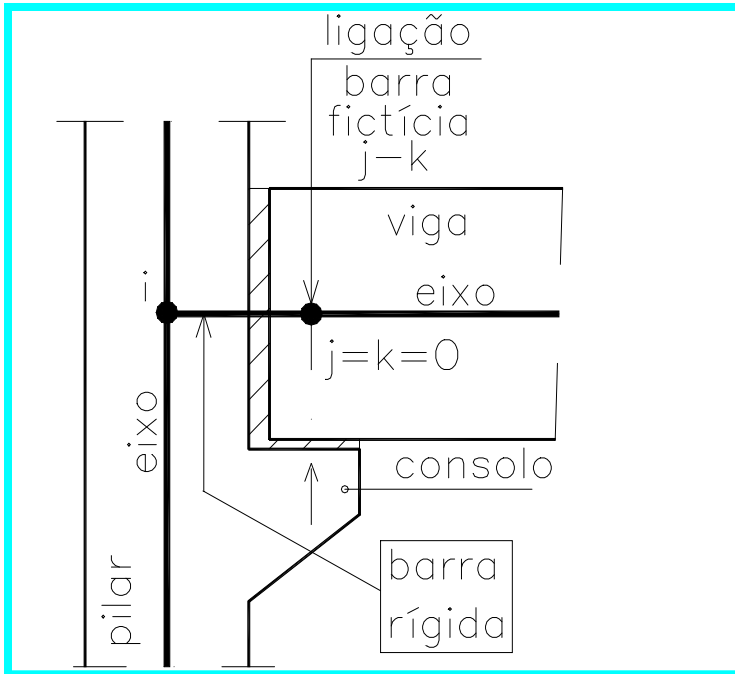
Inclinação do Chumbador $\alpha$	$X_{ce}$ (m)	RIGIDEZ $K_f$
90°	0,000	12,5 MN/rad
75°	0,100	13,3 MN/rad
60°	0,210	16,1 MN/rad
45°	0,343	22,6 MN/rad
30°	0,500	38,2 MN/rad

Rigidez do Chumbador	K1 (Pino)	K2 (B- Inserida)
BALDISSERA	71MN/m	700 MN/m

**ENSAIO:**  
 $K_f = 22,8 \text{ MNxm/rad}$

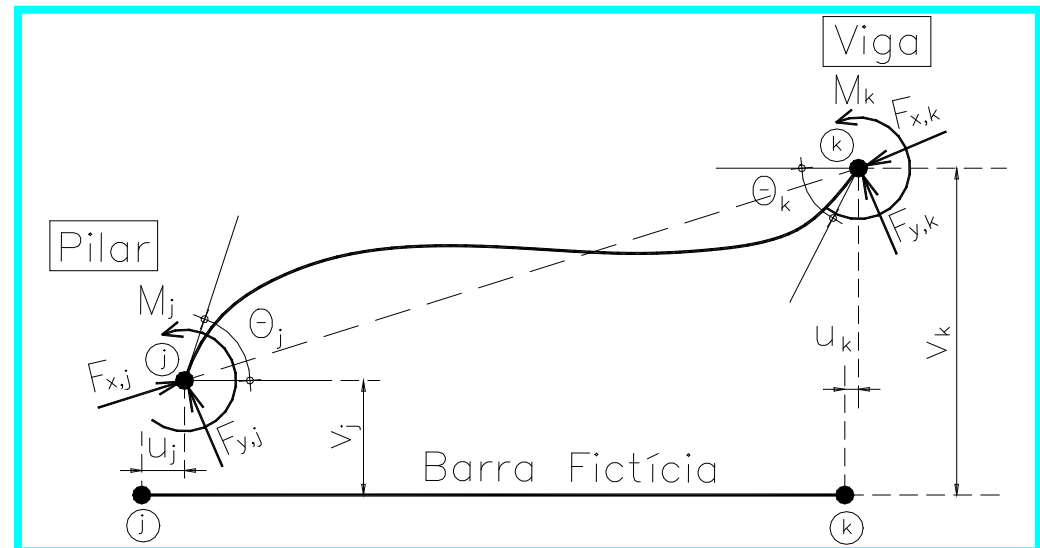
# MODELAÇÃO DA ESTRUTURA DE BARRAS

## REPRESENTAÇÃO DA LIGAÇÃO NO MODELO DE BARRA DA ESTRUTURA



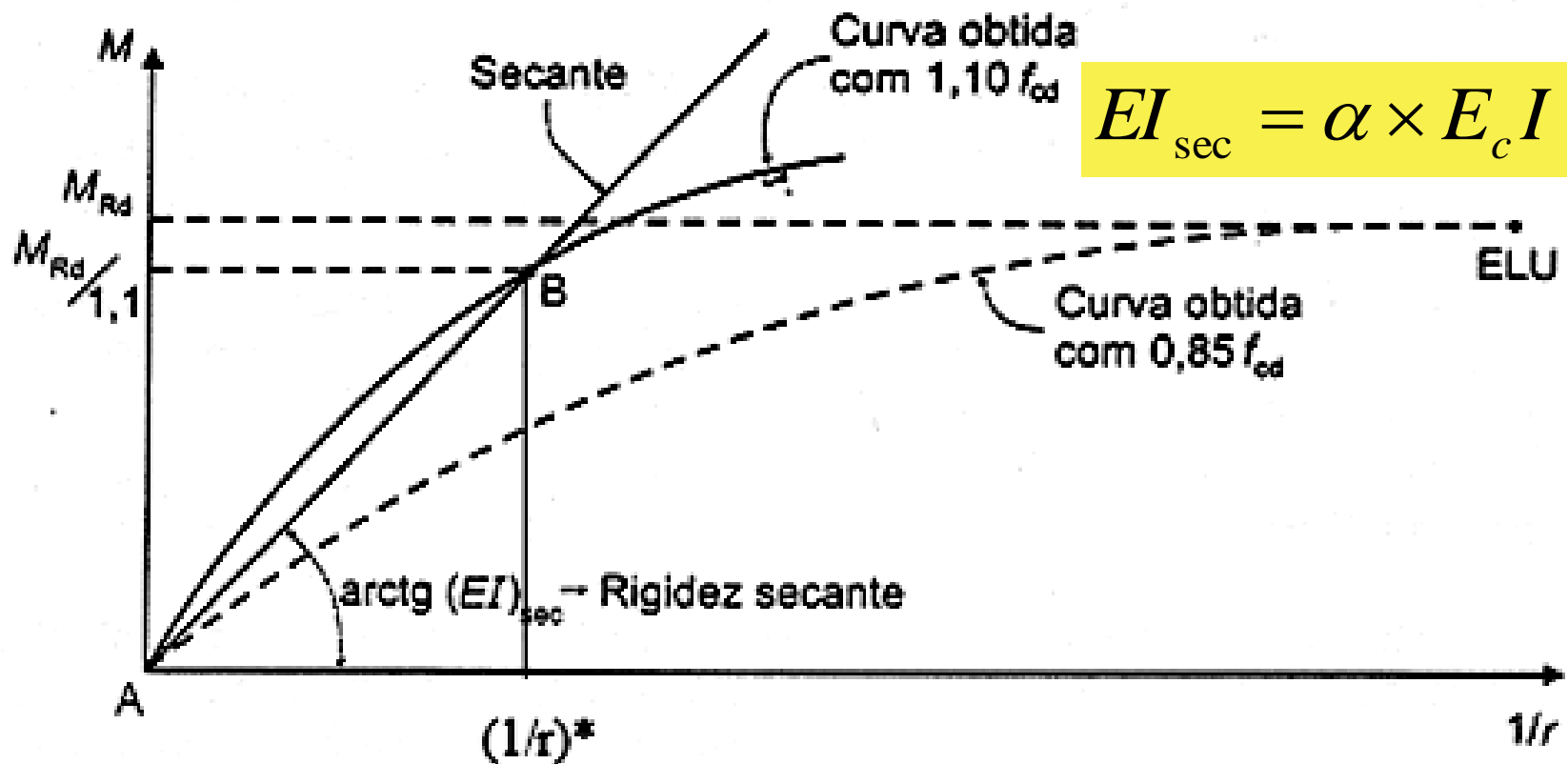
### LINHA DE AÇÃO DA REAÇÃO VERTICAL

$$\begin{bmatrix}
 S_{11} & S_{12} & S_{13} & -S_{11} & -S_{12} & -S_{13} \\
 S_{21} & S_{22} & S_{23} & -S_{21} & -S_{22} & -S_{23} \\
 S_{31} & S_{32} & S_{33} & -S_{31} & -S_{32} & -S_{33} \\
 -S_{11} & -S_{12} & -S_{13} & S_{11} & S_{12} & S_{13} \\
 -S_{21} & -S_{22} & -S_{23} & S_{21} & S_{22} & S_{23} \\
 -S_{31} & -S_{32} & -S_{33} & S_{31} & S_{32} & S_{33}
 \end{bmatrix}
 \begin{Bmatrix}
 u_j \\
 v_j \\
 \theta_j \\
 u_k \\
 v_k \\
 \theta_k
 \end{Bmatrix}
 =
 \begin{Bmatrix}
 F_{x,j} \\
 F_{y,j} \\
 M_j \\
 F_{x,k} \\
 F_{y,k} \\
 M_k
 \end{Bmatrix}$$

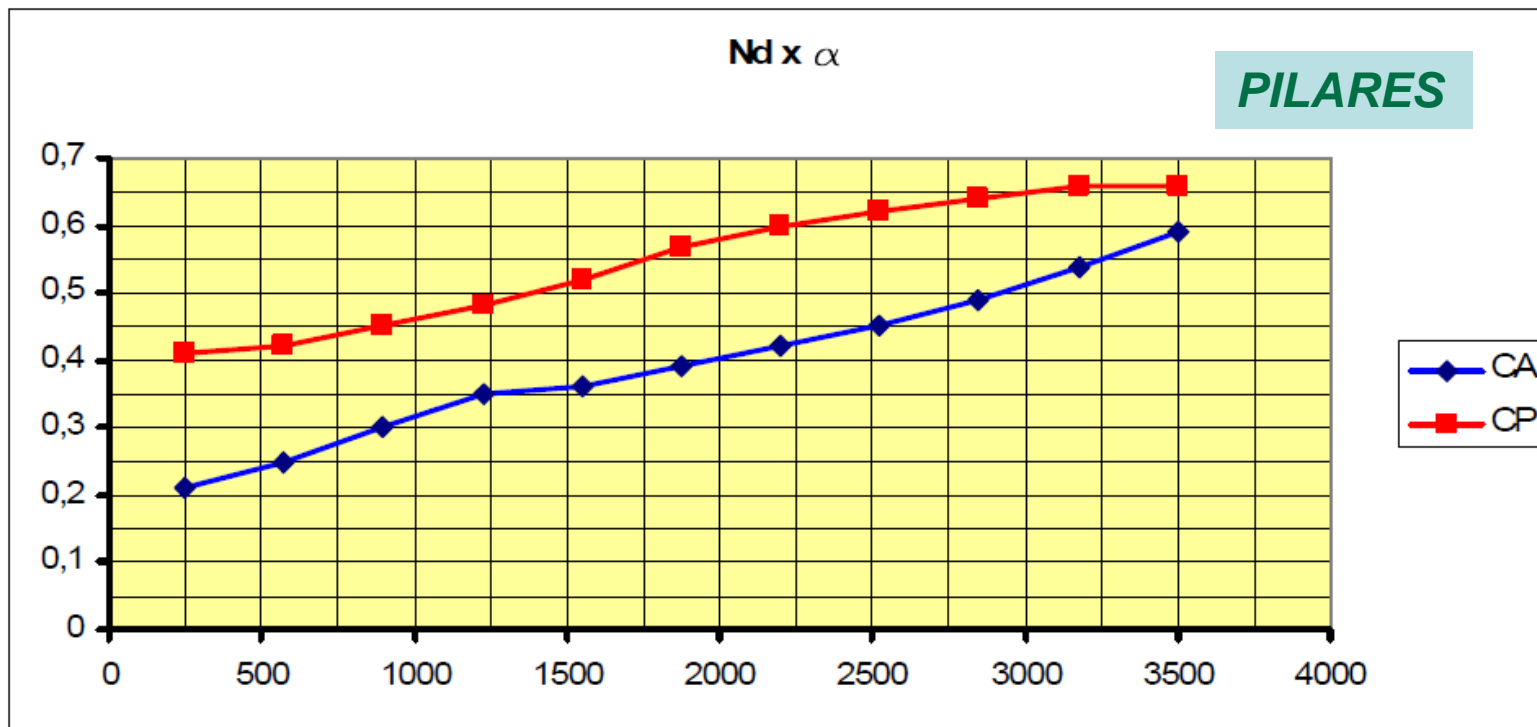


# NÃO LINEARIDADE FÍSICA

A NÃO LINEARIDADE FÍSICA FOI TRATADA ATRAVÉS DO CONCEITO DE RIGIDEZ SECANTE E CONSIDERADA NO MODELO DE CÁLCULO PELA REDUÇÃO DA RIGIDEZ BRUTA DA SEÇÃO DOS ELEMENTOS.

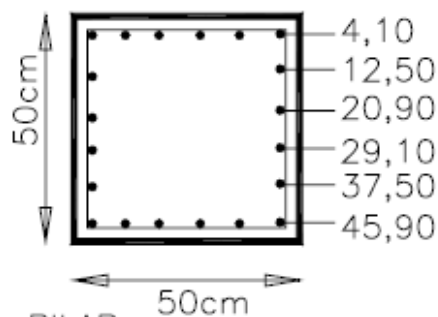


# NÃO LINEARIDADE FÍSICA



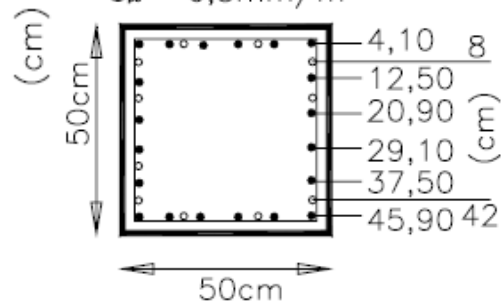
## CONCRETO ARMADO

- 20 $\phi$ 16mm (CA-50A)



## CONCRETO PROTENDIDO

- 20 $\phi$ 16mm (CA-50A)
  - 12 $\phi$ 15mm (CP-190RB)
- $\epsilon_{ps} = 6,5\text{mm/m}$



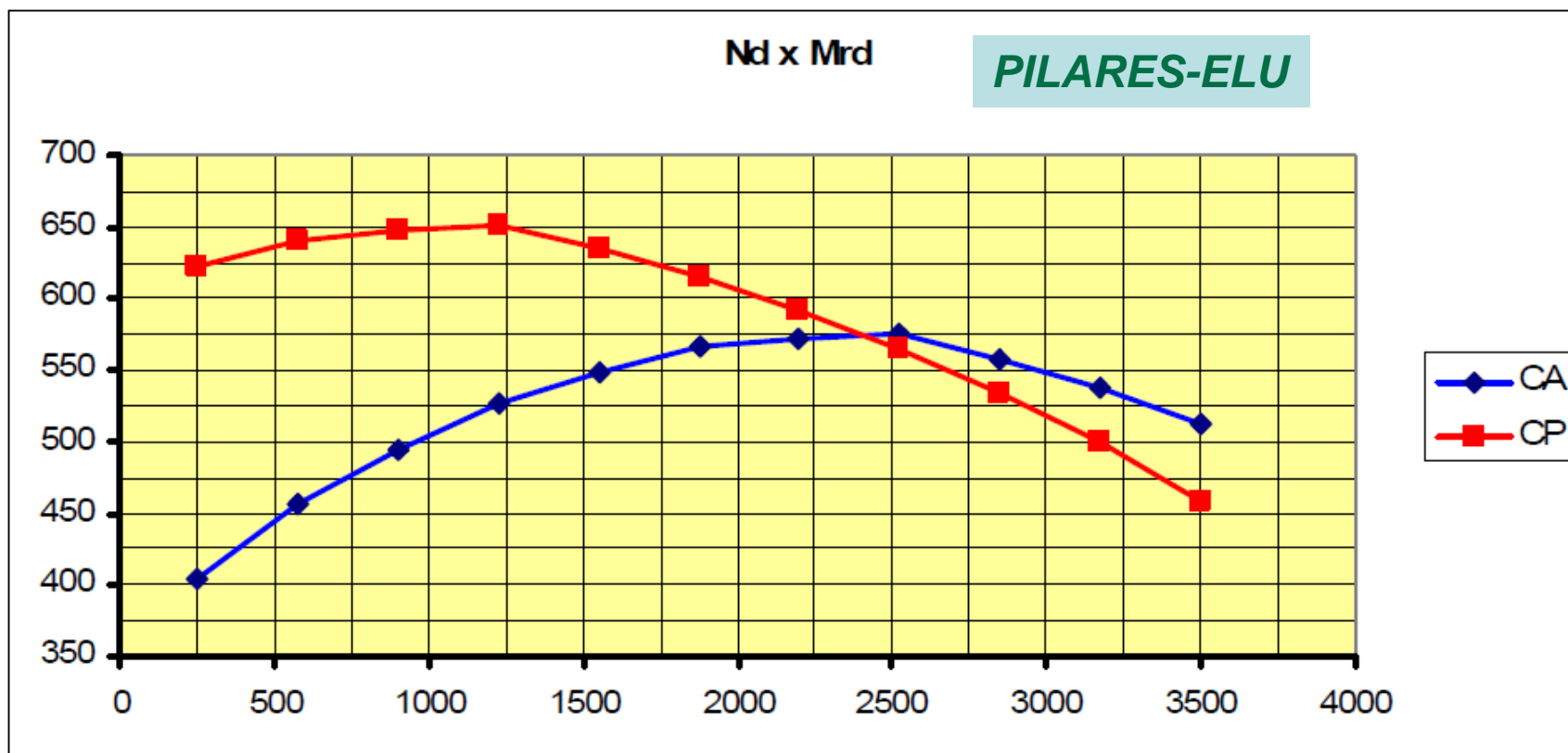
G	$\alpha$
G < 20%	0,40
20% < G < 90%	$\frac{0,40}{70}(G - 20) + 0,40$
G > 90%	0,80

G = Grau de engastamento da ligação semi-rígida (%).

# NÃO LINEARIDADE FÍSICA

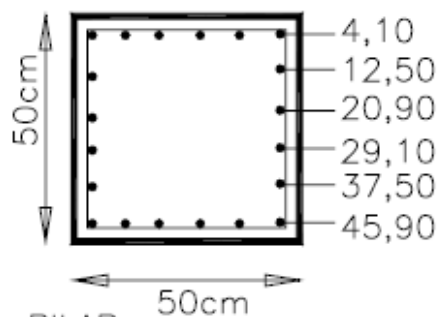
Nd x Mrd

PILARES-ELU



CONCRETO ARMADO

- 20 $\phi$ 16mm (CA-50A)

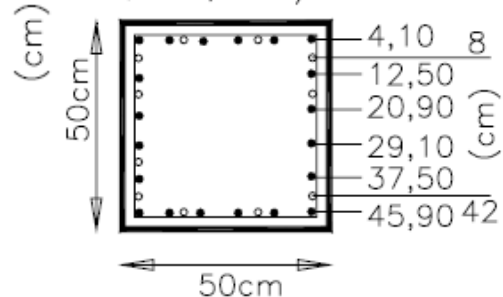


CONCRETO PROTENDIDO

- 20 $\phi$ 16mm (CA-50A)

- 12 $\phi$ 15mm (CP-190RB)

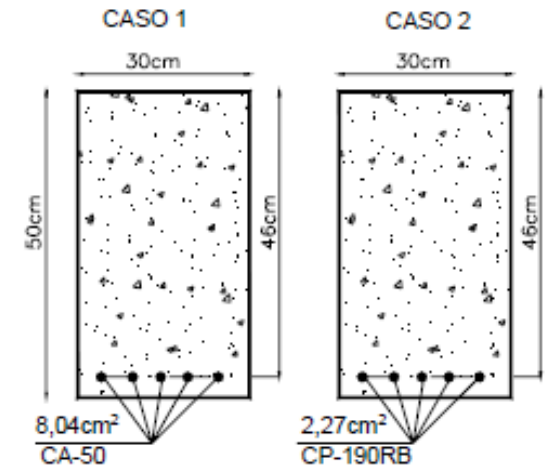
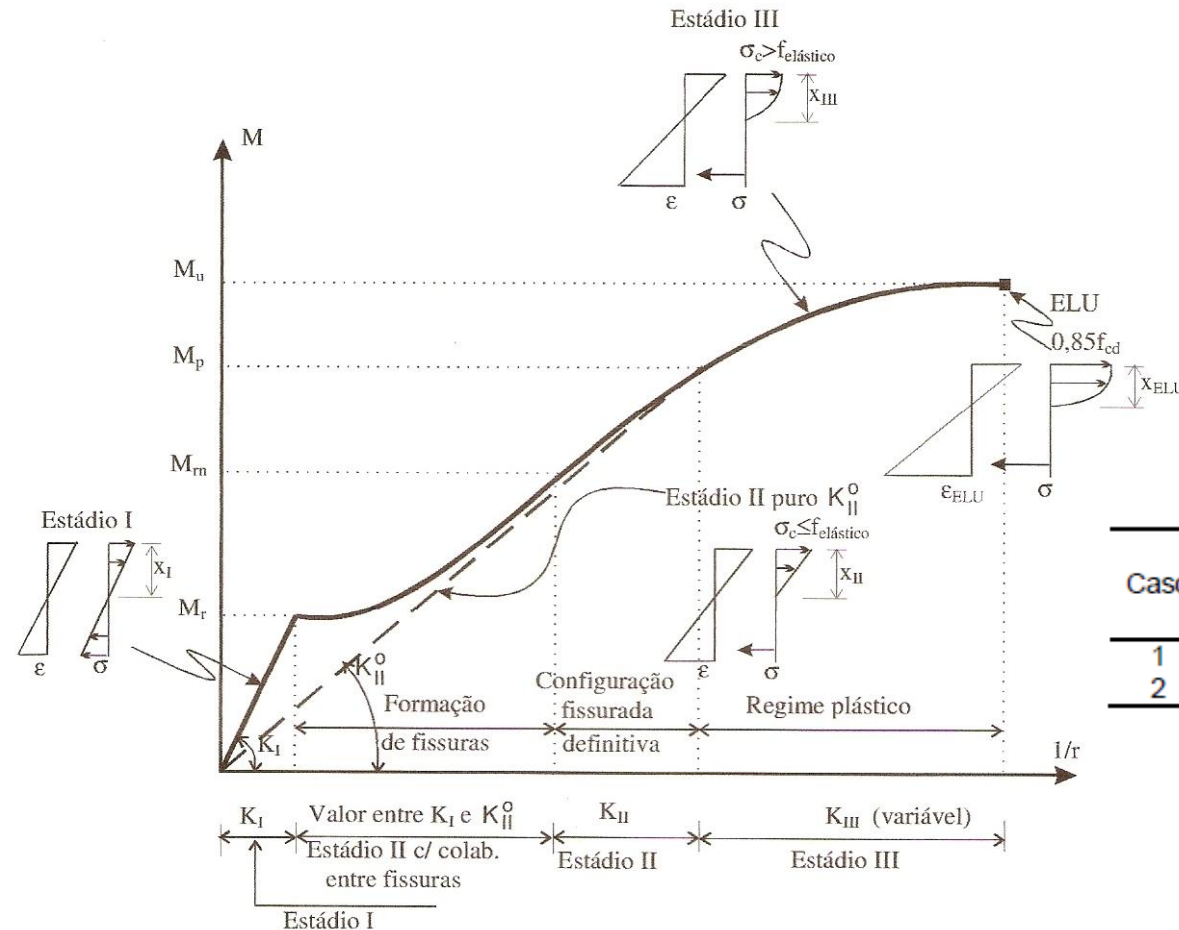
$$\epsilon_{p0} = 6,5 \text{ mm/m}$$



# NÃO LINEARIDADE FÍSICA

## RIGIDEZ SECANTE DE VIGAS

## VIGAS



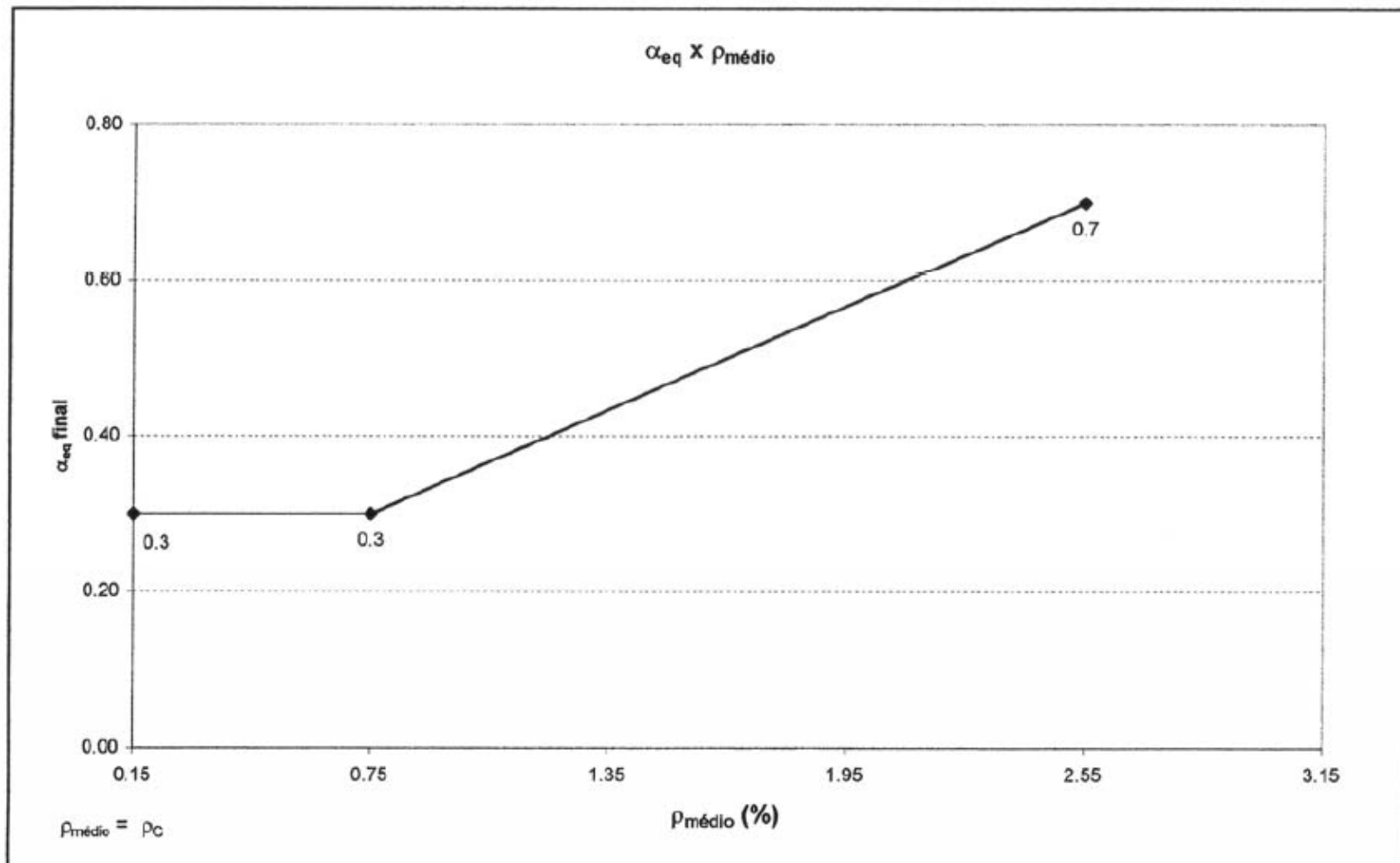
Caso	Momento Último (kNm)	Rigidez Secante Adimensional $\kappa$	$\alpha$
1	151,3	22,13	0,21
2	151,3	42,80	0,41

$$K_{II} = 0,25K_I$$

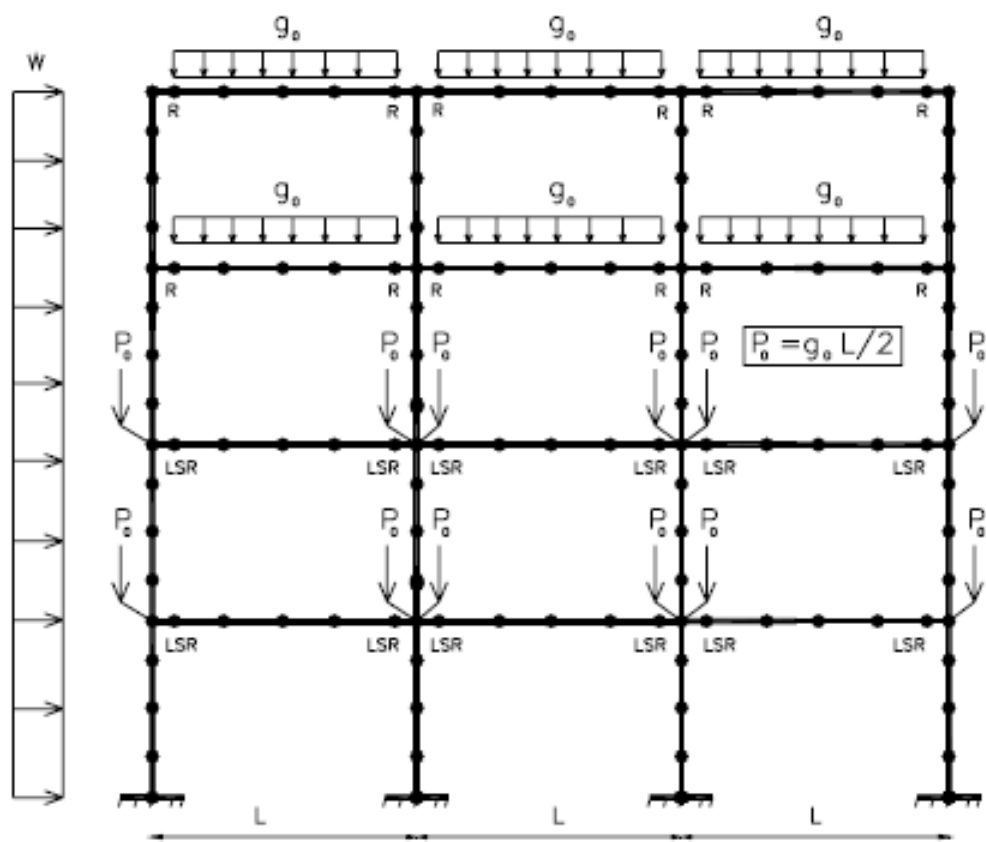
$$K_{III} = 0,90K_{II} \Rightarrow \alpha \cong 0,225$$

# NÃO LINEARIDADE FÍSICA

## RIGIDEZ SECANTE DE VIGAS (Crespo 2002-USP)



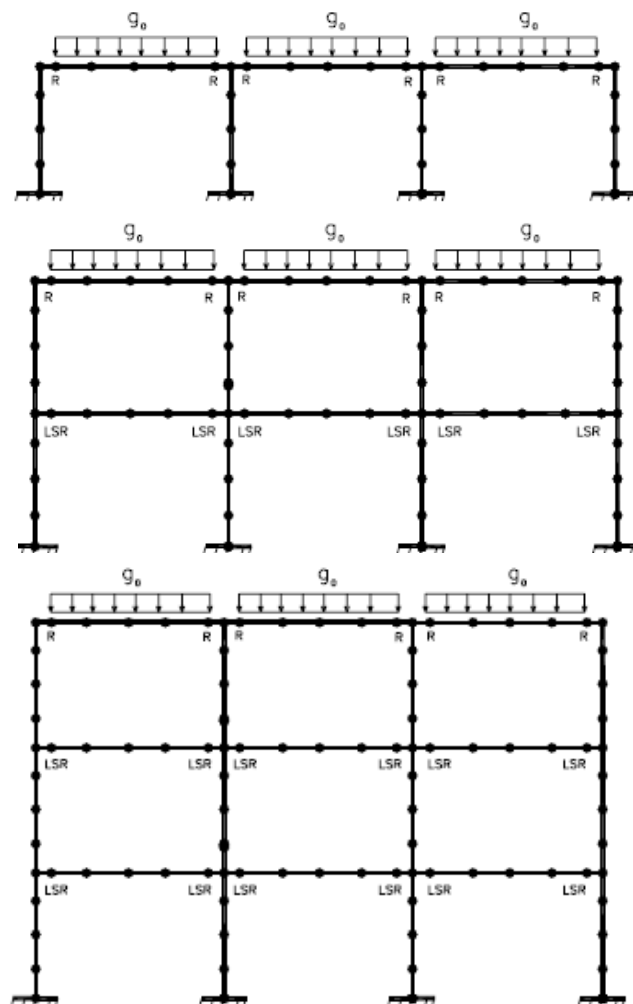
# FASE CONSTRUTIVA



LSR= Ligação Semi-Rígida / R= Ligação Articulada

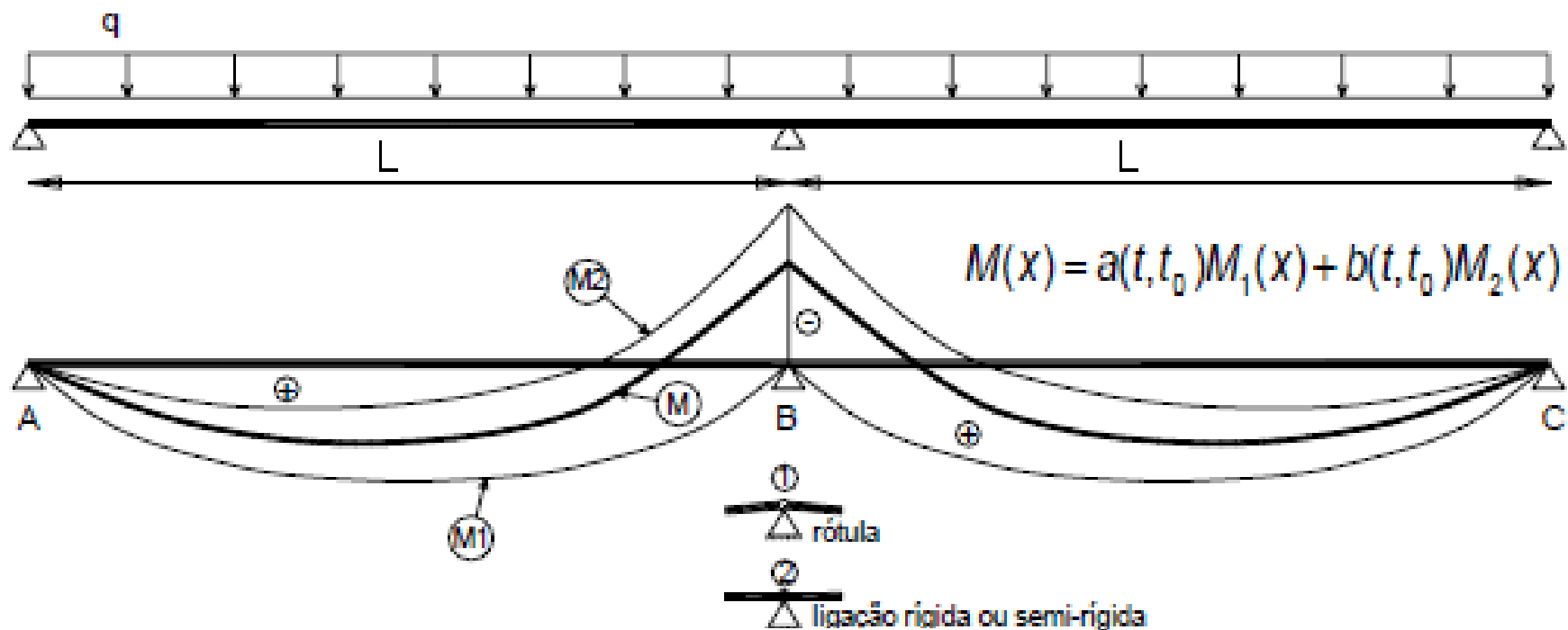
N.Pav.	CSF
1	24,4
2	6,7
3	2,6
4	1,3
5	<1

N.Pav = número de pavimentos articulados montados acima do 1º pavimento.



FASE 3

# EFEITO DO TEMPO



$t$	$a(t, t_0)$	$b(t, t_0)$
$t_0$	1	0
$t = \infty$	$a_\infty = 1 - b_\infty$	$b_\infty = \frac{\varphi_\infty}{1 + \chi_\infty \varphi_\infty}$

$$\chi(t, t_0)$$

**Coeficiente de relaxação ou de envelhecimento ~ 0,80**

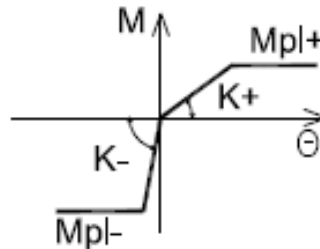


# FLUXOGRAMA DE ANÁLISE

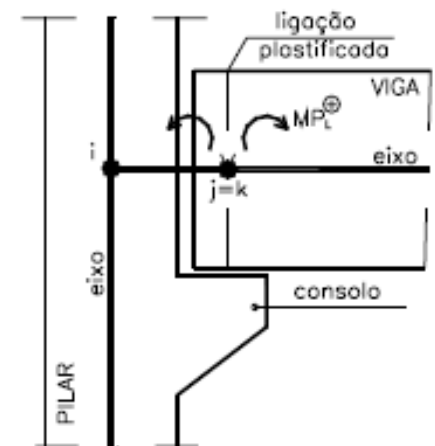
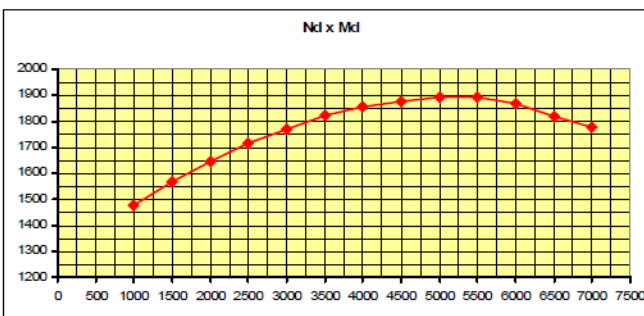
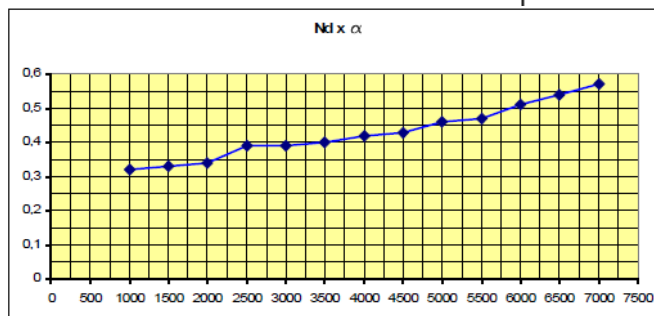
## ENTRADA DE DADOS DA ESTRUTURA

- MODELO DE PÓRTICO PLANO COM DISCRETIZAÇÃO DENSA
- LIGAÇÕES SEMI-RÍGIDAS

MODELO ELASTOPLÁSTICO



- DADOS DE CARGA E COEFICIENTES DE PONDERAÇÃO
- DADOS DE PARTIDA DA NÃO-LINEARIDADE FÍSICA  
VIGAS:  $\alpha=0,40$  PILARES:  $0,40 < \alpha < 0,80$
- DADOS PARA A NÃO-LINEARIDADE FÍSICA  
CURVAS:  $N_d \times \alpha$
- DADOS PARA VERIFICAÇÃO DO PILAR  
CURVAS:  $N_d \times M_{rd}$





# CONSIDERAÇÕES FINAIS

**ESPERA-SE QUE O CONTEÚDO APRESENTADO HABILITE E ENCORAJE OS PROJETISTAS DE ESTRUTURAS DE CONCRETO PRÉ-MOLDADO PARA A UTILIZAÇÃO DA LIGAÇÃO VIGA-PILAR SEMI-RÍGIDA COMO UMA ALTERNATIVA DE ENRIJECIMENTO E MELHORIA DE DESEMPENHO SOBRETUDO DAS ESTRUTURAS MULTI PISO.**



# CONSIDERAÇÕES FINAIS

***MINHA LINDA FORTALEZA, A CIDADE DA COPA,  
BEIJADA PELOS SEUS VERDES MARES BRAVIOS.***

***OBRIGADO !!***

