

## SEMINÁRIO



PORTUGAL  
STEEL

**Caracterização de ligações viga-coluna em estruturas metálicas  
Método analítico (NP EN 1993-1-8)  
e Análise experimental**

*Luís Magalhães – Instituto Politécnico de Castelo Branco*

# Caracterização de ligações viga-coluna em estruturas metálicas

## MÉTODO ANALÍTICO (NP EN 1993-1-8)

Comportamento das ligações

Classificação de ligações

Método dos componentes

## ANÁLISE EXPERIMENTAL

Programa de ensaios

Preparação dos provetes

Layout de ensaios

Resultados

## CARACTERIZAÇÃO DE LIGAÇÕES VIGA-COLUNA EM ESTRUTURAS METÁLICAS

- Métodos:
  - Numéricos;
  - **Analíticos;**
  - **Experimentais.**
- Objetivos:
  - Determinar o comportamento real das ligações;
  - Influência no comportamento global da estrutura.

## MÉTODO ANALÍTICO (NP EN 1993-1-8)

**Norma Portuguesa** NP  
EN 1993-1-8  
2010

---

**Eurocódigo 3 – Projecto de estruturas de aço**  
**Parte 1-8: Projecto de ligações**

**Eurocode 3 – Calcul des structures en acier**  
**Partie 1-8: Calcul des assemblages**

**Eurocode 3 – Design of steel structures**  
**Part 1-8: Design of joints**

ISBN 978-989-95-90-000-00

**EXCERPTOS**  
Excerpts from the Portuguese version of Eurocode 3, parts 1-1 to 1-8, concerning design of steel structures, joints, and connections.

**COORDENADORA**  
Vandystegiana de EN 1993-1-8:2010 + AC:2008

**REVISÃO**  
Serviço de Normalização + 1970000, 1993-1-8-2010  
e pessoas nomeadas da entidade de NP EN 1993-1-8:2010

**ELABORAÇÃO**  
ET 117 (L. M. R. C.)

**EDIÇÃO**  
Março de 2010

**CÓDIGO DE PREÇO**  
N007043

© IPQ - entidade pública

**Instituto Português de Qualidade**

Rua Sá da Bandeira, 1  
1600-016 LISBOVA, PORTUGAL  
Tel: +351 21 710 000 000 Fax: +351 21 710 000 000  
E-mail: info@ipq.pt Website: www.ipq.pt

MÉTODO ANALÍTICO (NP EN 1993-1-8)

COMPORTAMENTO DAS LIGAÇÕES

- Análise simplificada de pórticos metálicos:

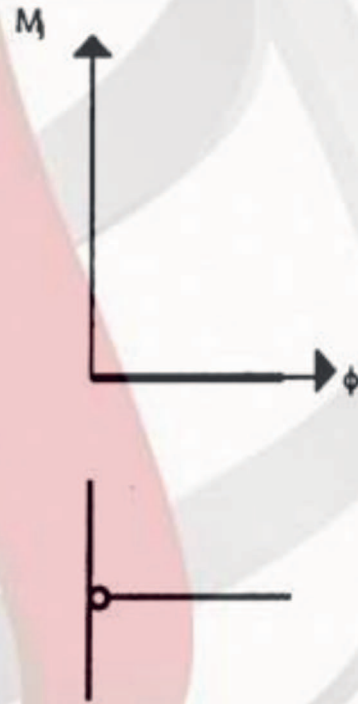
Infinitamente rígido

$(\phi = 0)$



Articulado (rotulado)

$(Mj = 0)$



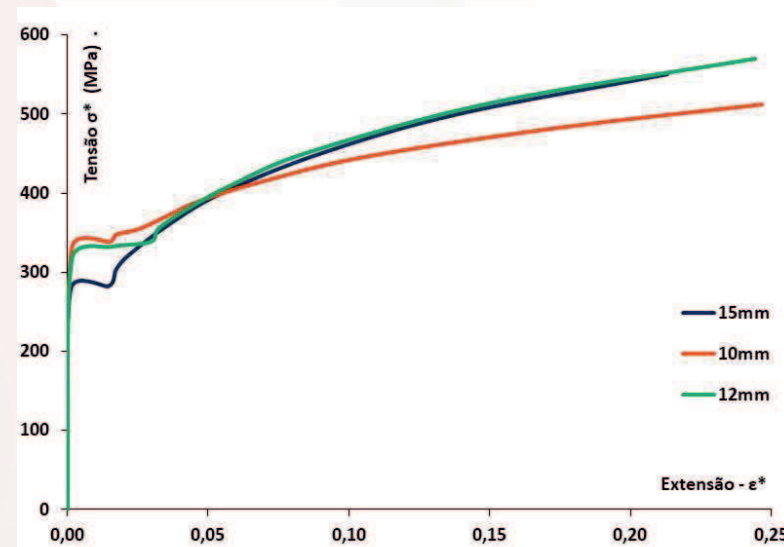
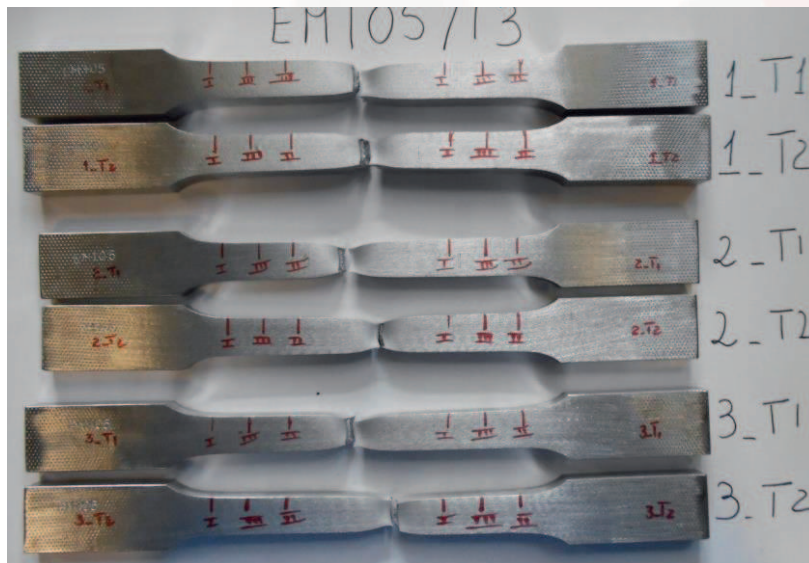
## COMPORTAMENTO DAS LIGAÇÕES MÉTODO ANALÍTICO (NP EN 1993-1-8)

- Comportamento real das ligações é mais complexo:

- Curvas momento rotação não lineares.

Imperfeições; Tensões residuais; Contacto; Escorregamento.

Não linearidade do material - **Comportamento do aço.**



COMPORTAMENTO DAS LIGAÇÕES

MÉTODO ANALÍTICO (NP EN 1993-1-8)

Infinitamente rígido

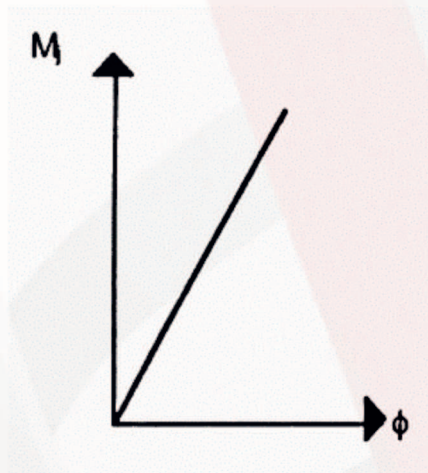


Semi-rígido

$(M_j \neq 0)$   $(\phi \neq 0)$



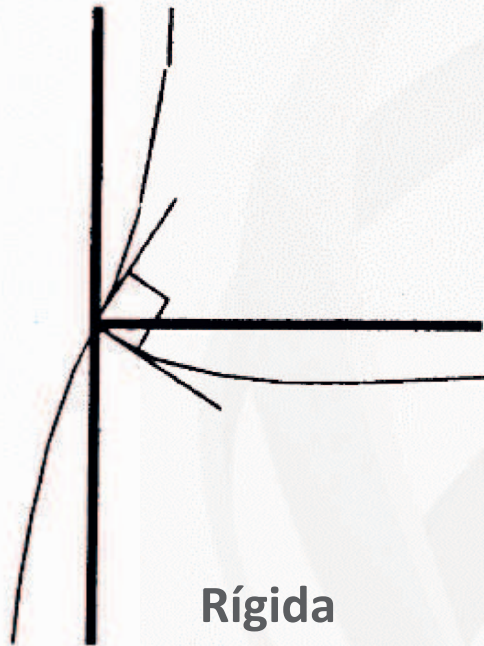
Articulado (rotulado)



**LIGAÇÃO SEMI-RÍGIDA**

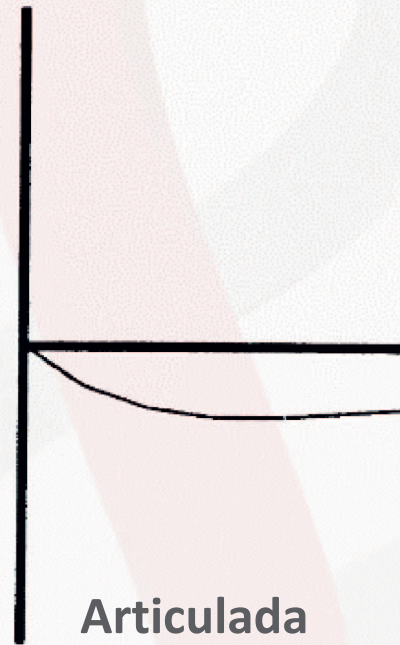
COMPORTAMENTO DAS LIGAÇÕES

MÉTODO ANALÍTICO (NP EN 1993-1-8)



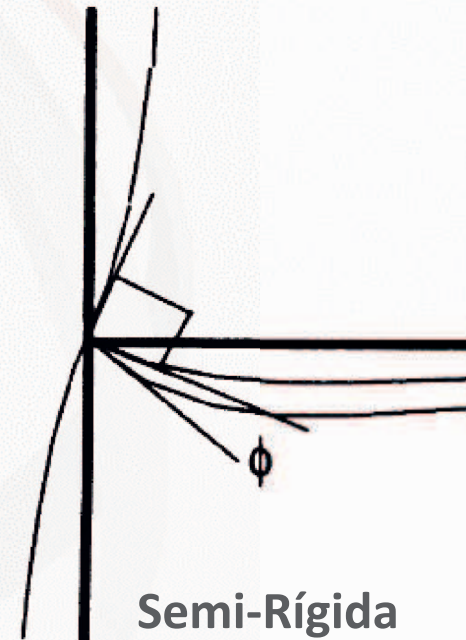
Rígida  
"Rotação"

Coluna - Viga



Articulada  
"Rotação"

Viga



Semi-Rígida  
"Rotação"

Coluna - Viga  
Ligação

## COMPORTAMENTO DAS LIGAÇÕES

## MÉTODO ANALÍTICO (NP EN 1993-1-8)

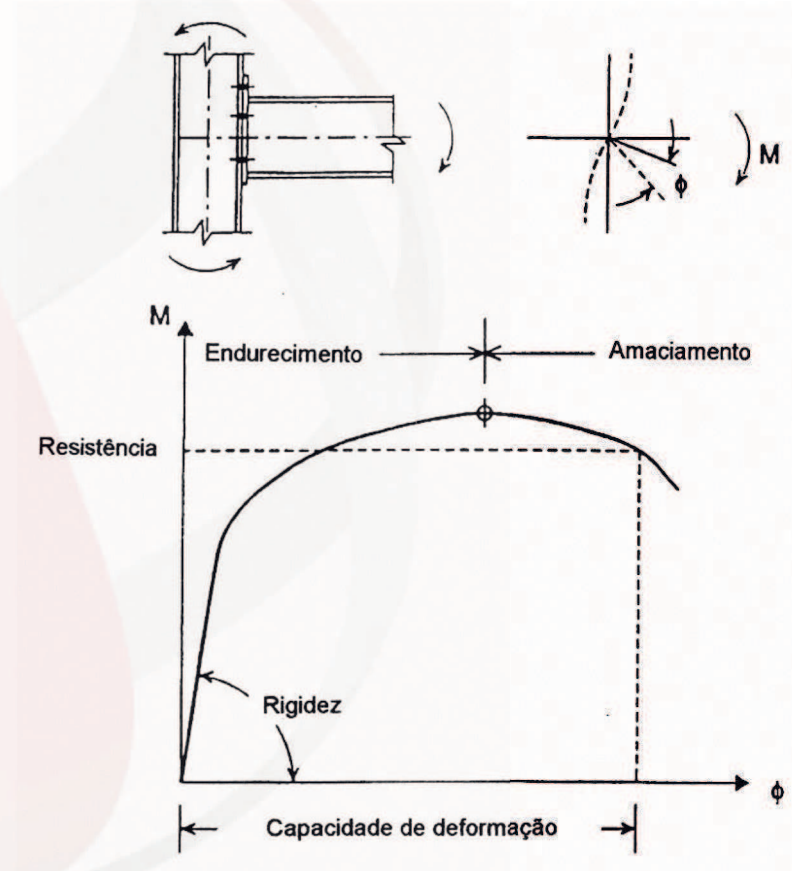
### Comportamento não linear

- Resistência;
- Rigidez;



### **MÉTODO DOS COMPONENTES**

- Ductilidade ou  
(Capacidade de Deformação).

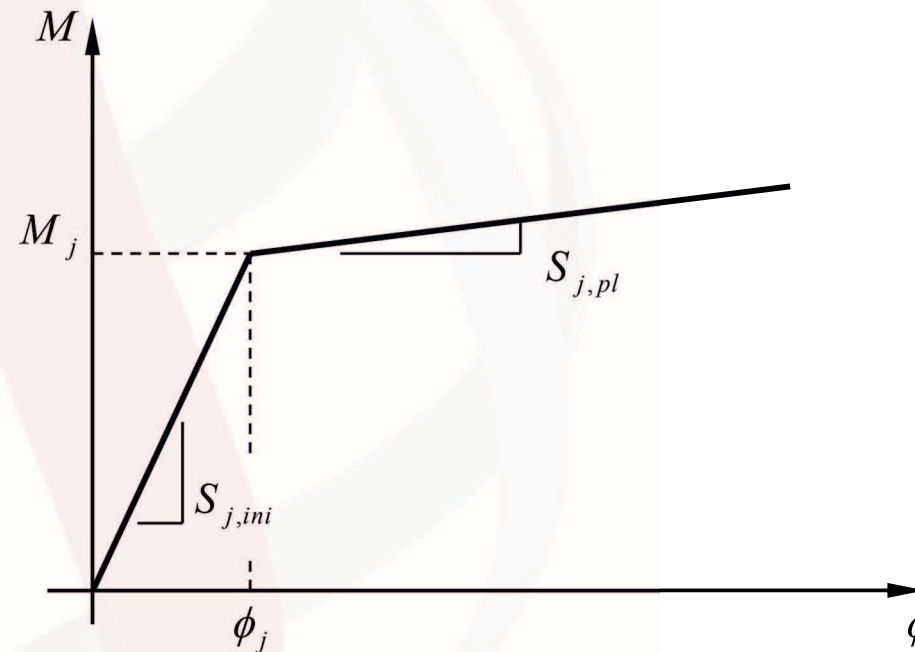


## MÉTODO ANALÍTICO (NP EN 1993-1-8)

### COMPORTAMENTO DAS LIGAÇÕES

#### MODELAÇÃO DAS LIGAÇÕES

- Rígidas:
  - Rigidez infinita.
- Semi-rígidas:
  - Rigidez elástica ( $S_{j,ini}$ );
  - Resistência ( $M_j$ );
  - Rigidez pós elástica ( $S_{j,pl}$ ).
- Articuladas:
  - Rigidez nula.



## MÉTODO ANALÍTICO (NP EN 1993-1-8)

## COMPORTAMENTO DAS LIGAÇÕES

## MODELAÇÃO

- **Articulada** - modelação em que a ligação não transmite momentos fletores;
- **Contínua** - modelação em que a ligação não tem efeito na análise global;
- **Semicontínua** - modelação em que a ligação tem efeito na análise global.

## ANÁLISE GLOBAL

- **Análise elástica** - relação momento rotação linear ( $S_j, i_n$ );
- **Análise rígido-plástica** - consideração do momento resistente ( $M_j$ );
- **Análise elásto-plástica** - baseada em curvas momento rotação não lineares.

MÉTODO ANALÍTICO (NP EN 1993-1-8)

COMPORTAMENTO DAS LIGAÇÕES

Método de análise global  $\leftrightarrow$  Classificação da ligação  $\leftrightarrow$  Tipo de modelação:

Método de análise global	Classificação da ligação		
Elástica	Nominalm. Articulada	Rígida	Semi-rígida
Rígido-plástica	Nominalm. Articulada	Resistência total	Resistência parcial
Elasto-plástica	Nominalm. Articulada	Rígida e Resistência total	Semi-rígida e Resistência parcial Semi-rígida e Resistência total Rígida e Resistência parcial
Tipo de modelação	Articulada	Contínua	Semicontínua

MÉTODO ANALÍTICO (NP EN 1993-1-8)

COMPORTAMENTO DAS LIGAÇÕES

Método de análise global  $\leftrightarrow$  Classificação da ligação  $\leftrightarrow$  Tipo de modelação:

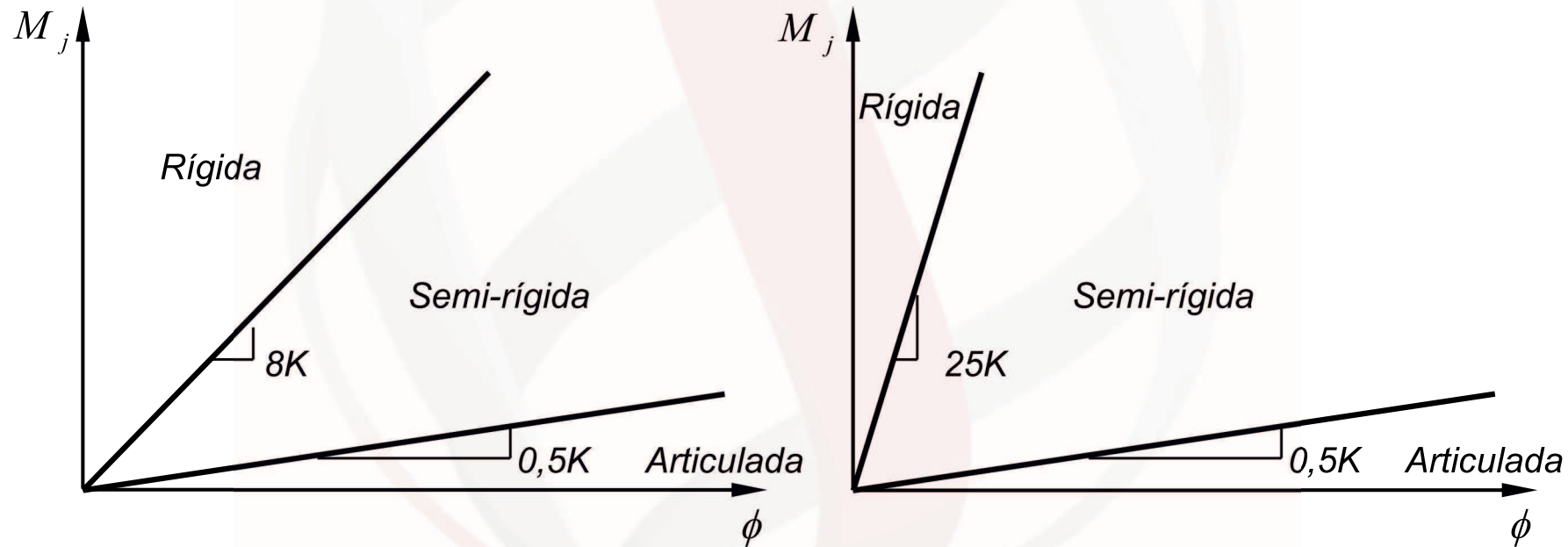
Método de análise global	Classificação da ligação		
Elástica	Nominalm. Articulada	Rígida	Semi-rígida
Rígido-plástica	Nominalm. Articulada	Resistência total	Resistência parcial
<b>Elasto-plástica</b>	Nominalm. Articulada	Rígida e Resistência total	Semi-rígida e Resistência parcial Semi-rígida e Resistência total Rígida e Resistência parcial
Tipo de modelação	Articulada	Contínua	<b>Semicontínua</b>

## CLASSIFICAÇÃO DE LIGAÇÕES

### CLASSIFICAÇÃO PELA RIGIDEZ DE ROTAÇÃO

*Contraventados*

*Não-Contraventados*



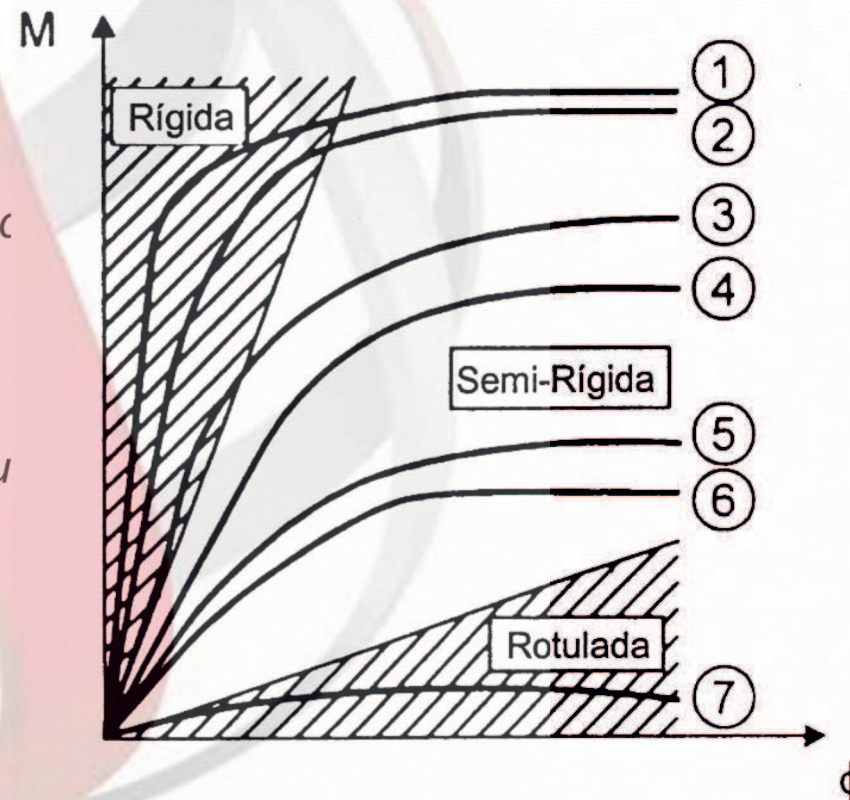
## CLASSIFICAÇÃO DE LIGAÇÕES

## CLASSIFICAÇÃO PELA RIGIDEZ DE ROTAÇÃO

## MÉTODO ANALÍTICO (NP EN 1993-1-8)

### Ligações correntes:

- ① *Ligação integralmente soldada*
- ② *Ligação com chapa de extremidade estenc*
- ③ *Ligação de banzos inferiores e superiores*
- ④ *Ligação com chapa de extremidade rasa*
- ⑤ *Ligação com cantoneiras de banzo e ângu  
de alma*
- ⑥ *Ligação com cantoneiras de banzo*
- ⑦ *Ligação de duplo ângulo de alma*



## CLASSIFICAÇÃO PELO MOMENTO RESISTENTE

Momento resistente

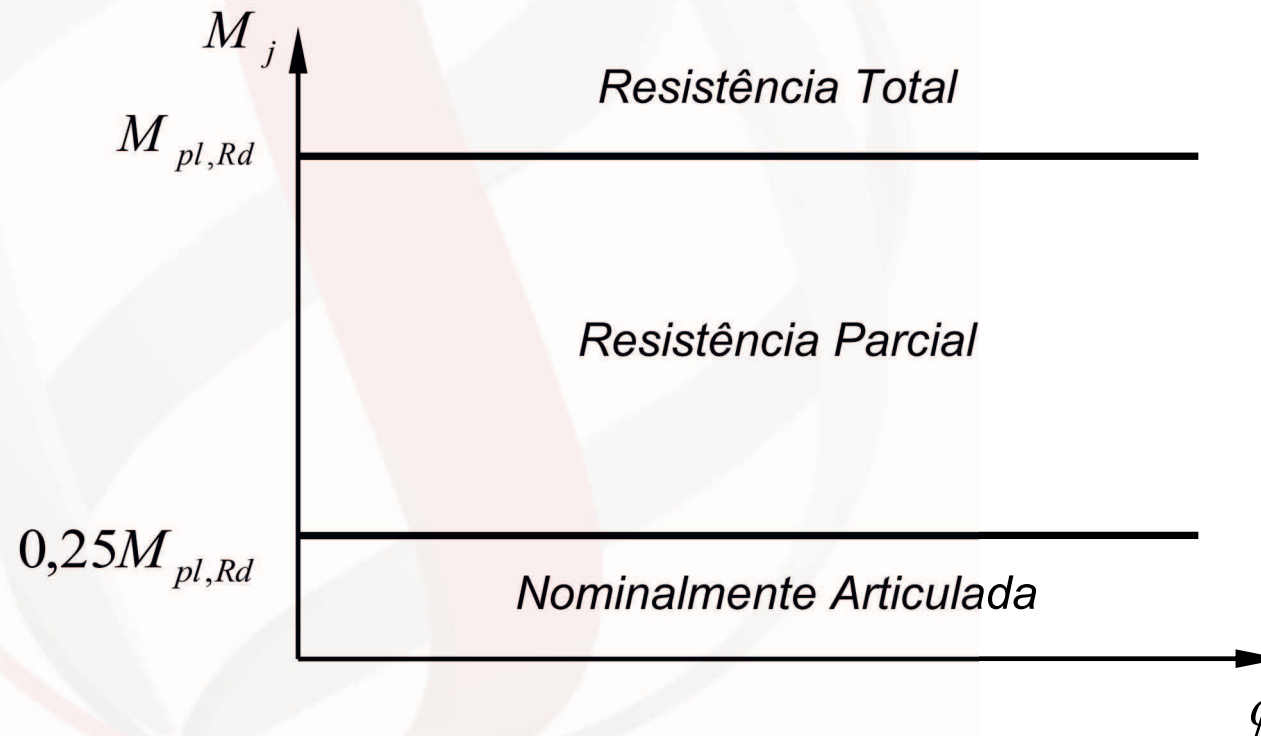
$$M_{pl,Rd}$$

Ligações no topo

$$\text{menor} \begin{cases} M_{b,pl,Rd} \\ M_{c,pl,Rd} \end{cases}$$

Ligações intermédias

$$\text{menor} \begin{cases} M_{b,pl,Rd} \\ 2M_{c,pl,Rd} \end{cases}$$



## MÉTODO DOS COMPONENTES

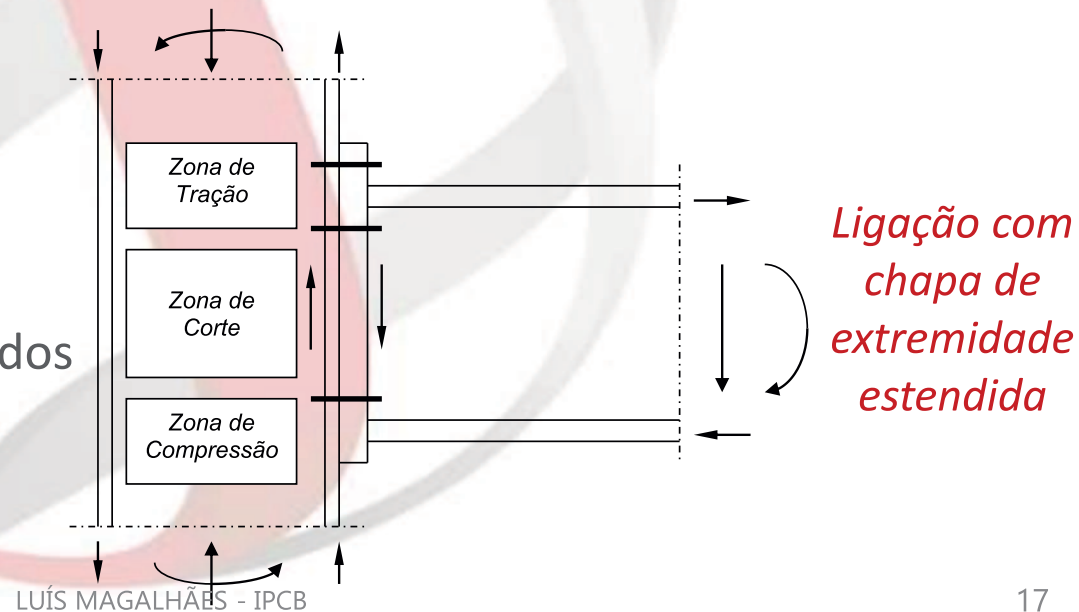
- Aplicado para a modelação das ligações.
- Ligação definida por um conjunto de **componentes básicos**.
- Determinação da resistência e rigidez da ligação.
- Linha de atuação das forças em zonas distintas da ligação:

**Zona de tração;**

**Zona de corte;**

**Zona de compressão.**

- **Componentes básicos agrupados** nas 3 zonas.



## MÉTODO DOS COMPONENTES

## MÉTODO ANALÍTICO (NP EN 1993-1-8)

**Aplicação do método:**

1º Passo - Identificação dos componentes ativos no nó considerado;

2º Passo - Determinar para cada componente básico:

Força resistente ( $F_{Rdi}$ );

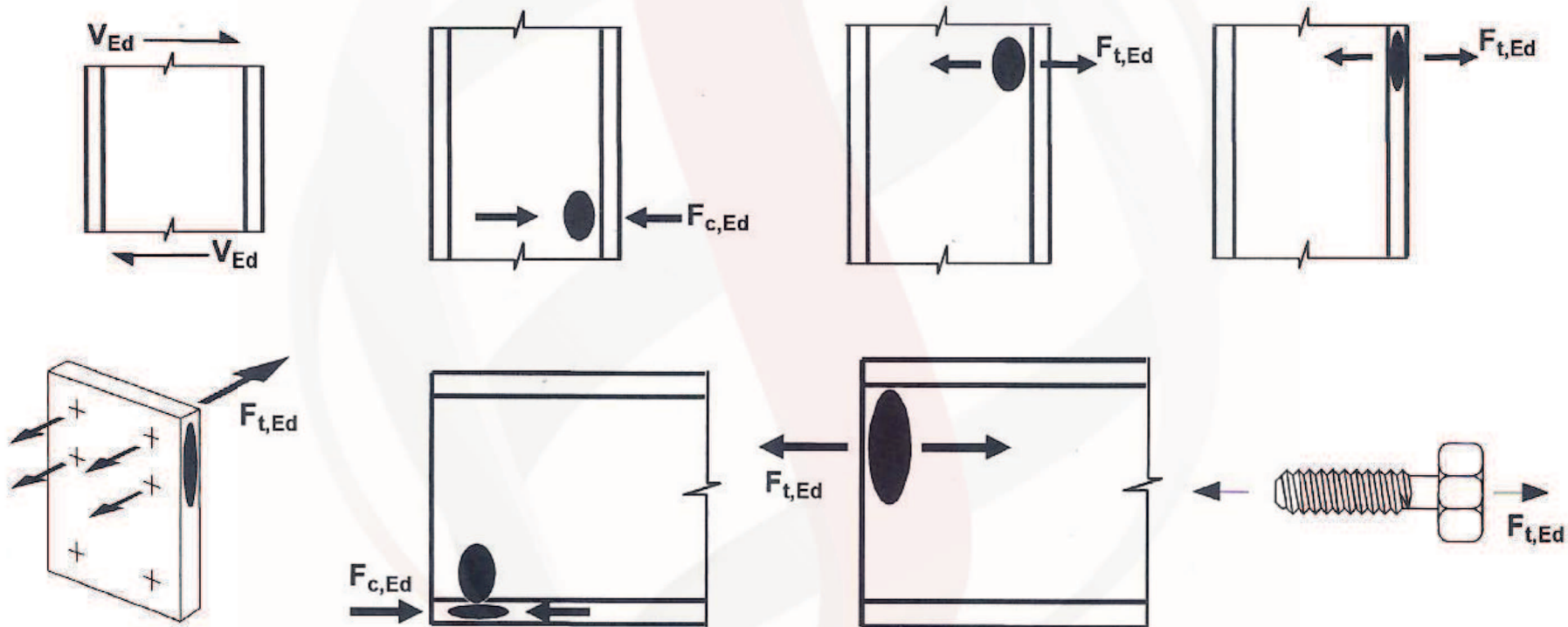
Coeficiente de rigidez ( $K_i$ ).

3º Passo - Assemblagem de todos os componentes constituintes da ligação e avaliação do momento resistente e da rigidez de rotação.

MÉTODO DOS COMPONENTES

MÉTODO ANALÍTICO (NP EN 1993-1-8)

Forças que atuam ao nível dos componentes básicos:



## PEÇA EM T EQUIVALENTE (T-STUB)

Nas ligações aparafusadas, é adotado um modelo formado por uma peça em T equivalente, tracionada para obter os valores de cálculo da resistência dos componentes básicos associados a estas ligações.

### 3 Modos de rotura associados:

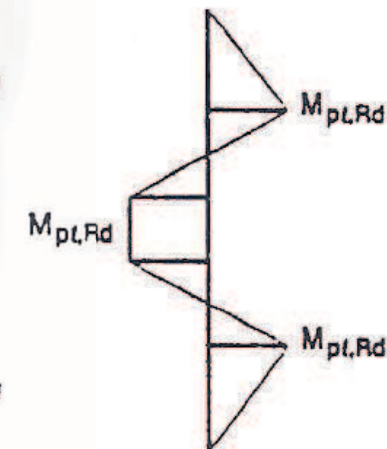
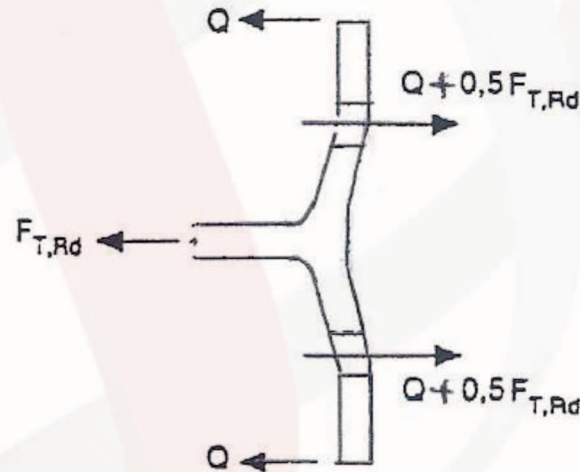
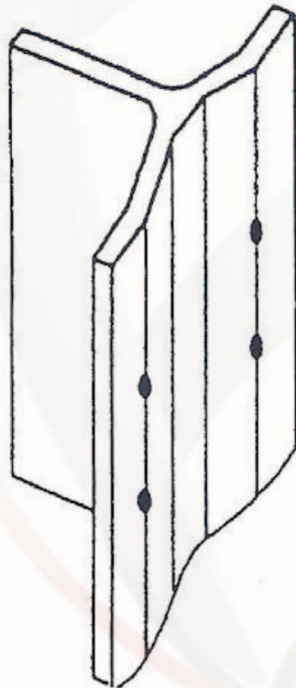
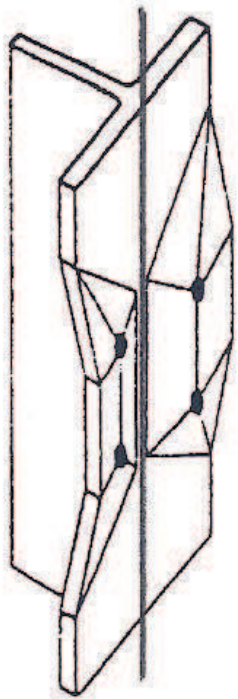
- **Modo 1** - **Plastificação total do banzo;**
- **Modo 2** - **Rotura dos parafusos com plastificação dos banzos;**
- **Modo 3** - **Rotura dos parafusos.**

MÉTODO DOS COMPONENTES

MÉTODO ANALÍTICO (NP EN 1993-1-8)

PEÇA EM T EQUIVALENTE (T-STUB)

**Modo 1 - *Plastificação total do banzo.***

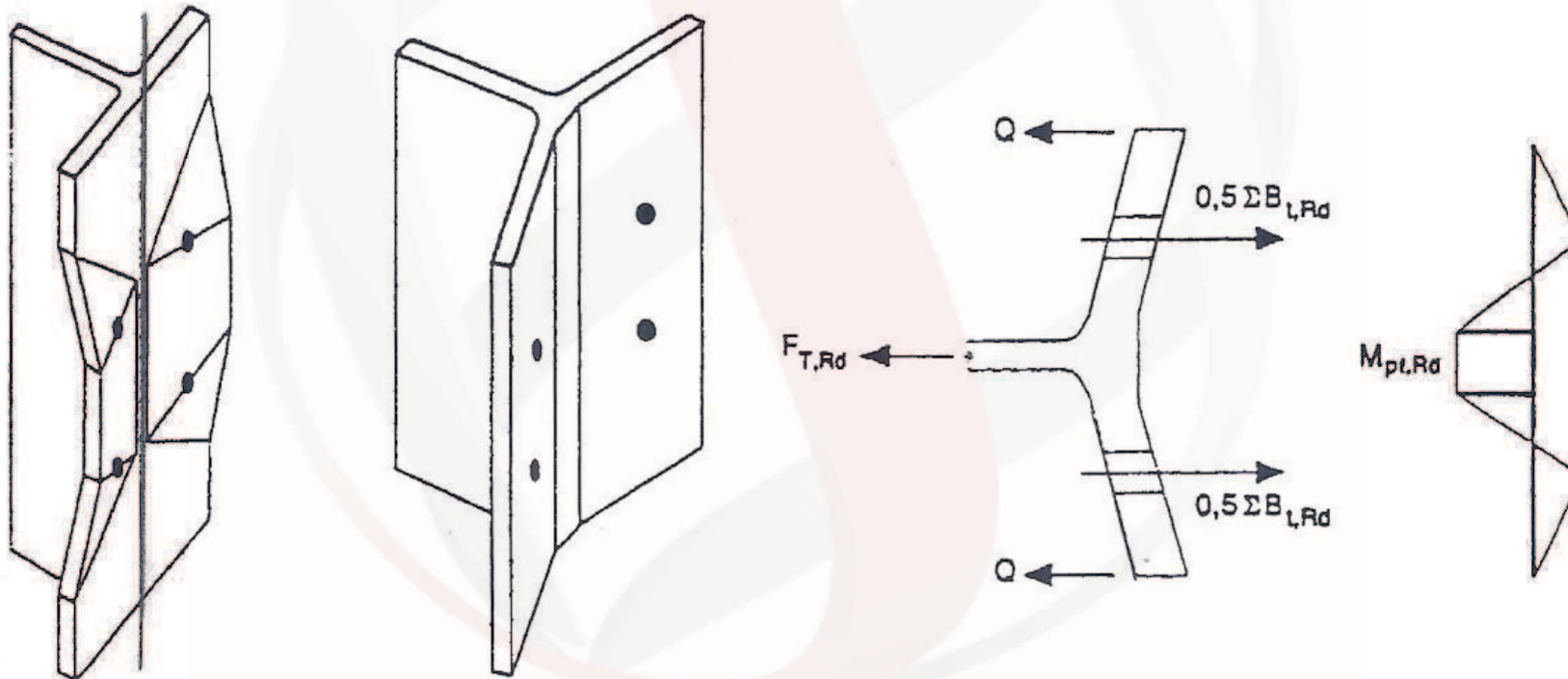


MÉTODO DOS COMPONENTES

MÉTODO ANALÍTICO (NP EN 1993-1-8)

PEÇA EM T EQUIVALENTE (T-STUB)

**Modo 2 - *Rotura dos parafusos com plastificação dos banzos.***

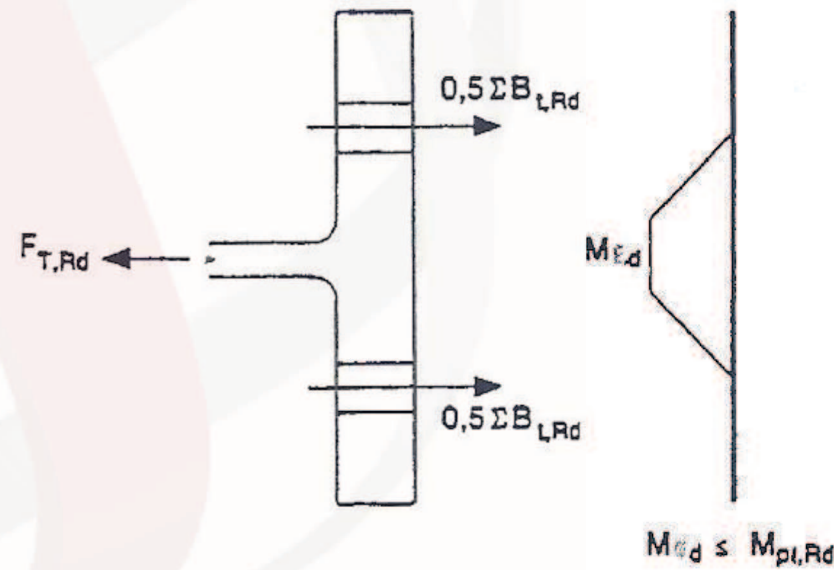
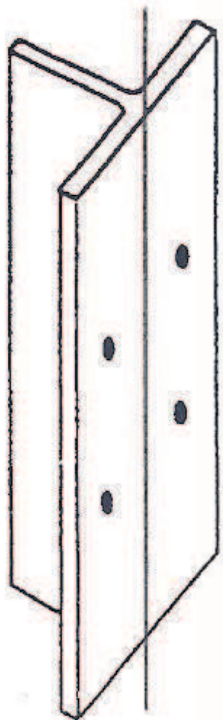


MÉTODO DOS COMPONENTES

MÉTODO ANALÍTICO (NP EN 1993-1-8)

PEÇA EM T EQUIVALENTE (T-STUB)

**Modo 3 - *Rotura dos parafusos.***

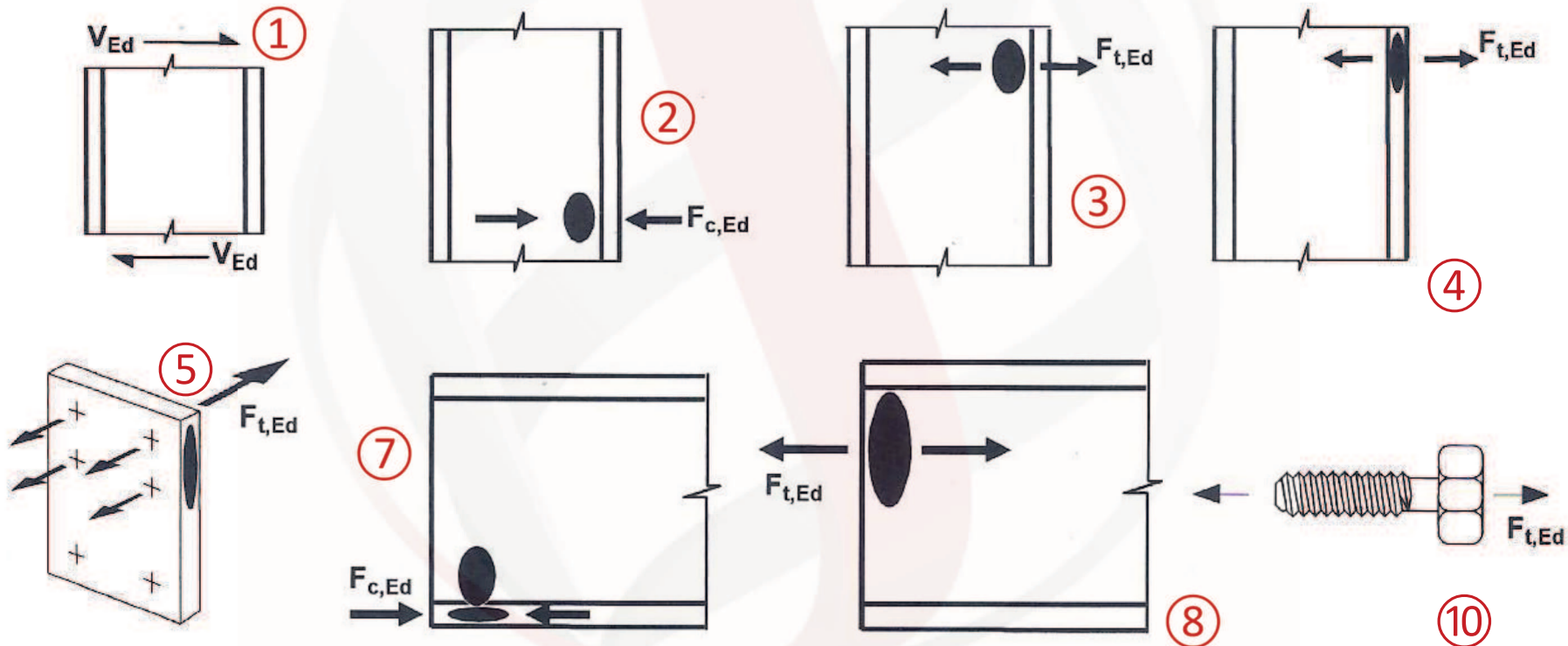


MÉTODO DOS COMPONENTES

MÉTODO ANALÍTICO (NP EN 1993-1-8)

CARACTERIZAÇÃO DOS COMPONENTES

Componentes básicos de dimensionamento:



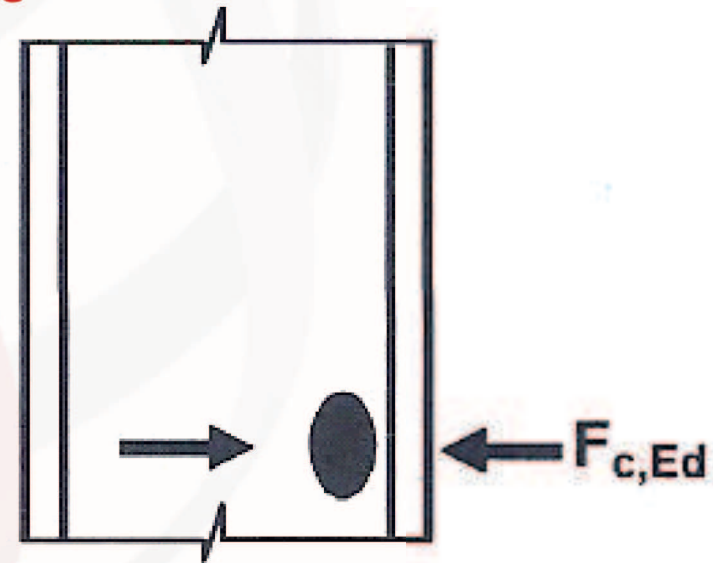
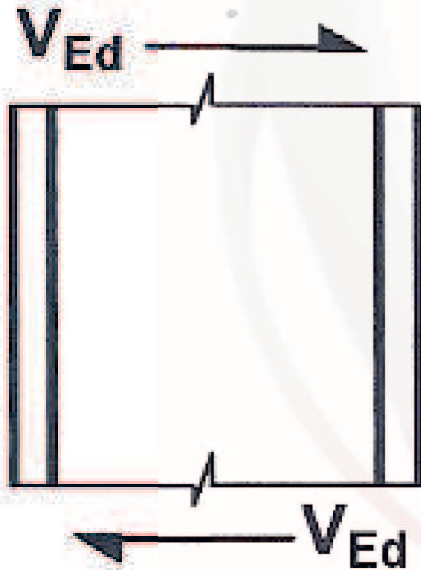
MÉTODO DOS COMPONENTES

MÉTODO ANALÍTICO (NP EN 1993-1-8)

CARACTERIZAÇÃO DOS COMPONENTES

Componentes básicos de dimensionamento:

① Painel de alma de coluna solicitado ao corte



② Alma de coluna em compressão transversal

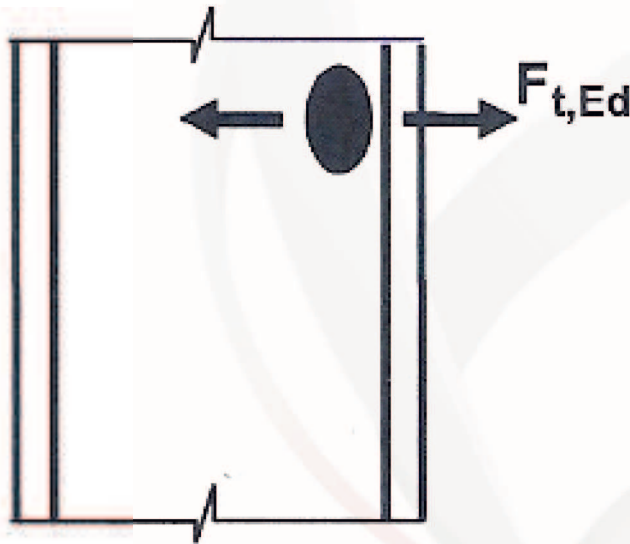
MÉTODO DOS COMPONENTES

MÉTODO ANALÍTICO (NP EN 1993-1-8)

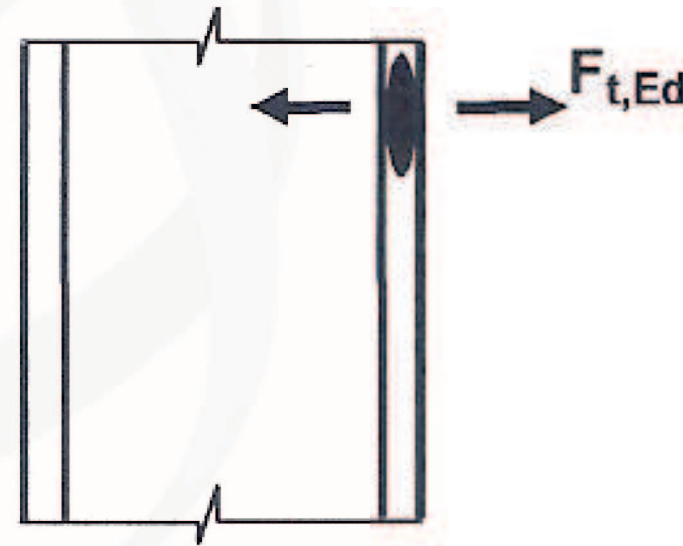
CARACTERIZAÇÃO DOS COMPONENTES

Componentes básicos de dimensionamento:

**3) Alma de coluna em tração transversal**



**4) Banzo de coluna em flexão**



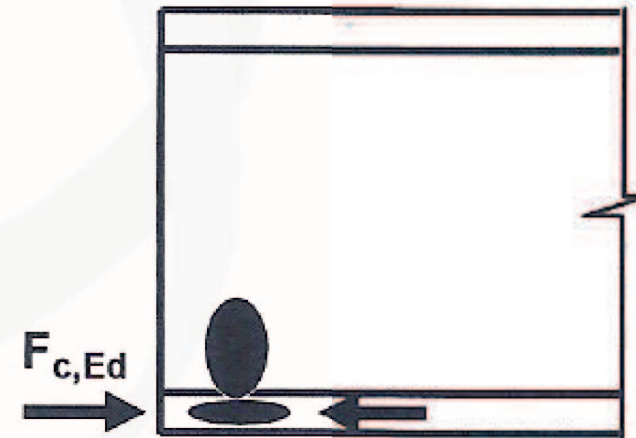
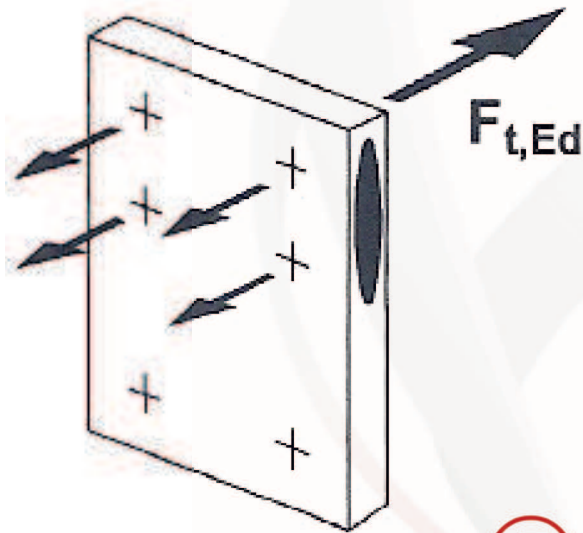
MÉTODO DOS COMPONENTES

MÉTODO ANALÍTICO (NP EN 1993-1-8)

CARACTERIZAÇÃO DOS COMPONENTES

Componentes básicos de dimensionamento:

**5** Chapa de extremidade em flexão



**7** Banzo e alma de viga ou de coluna em compressão

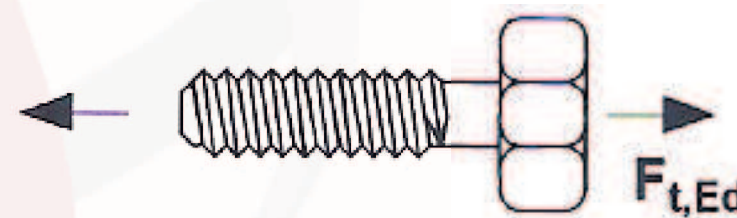
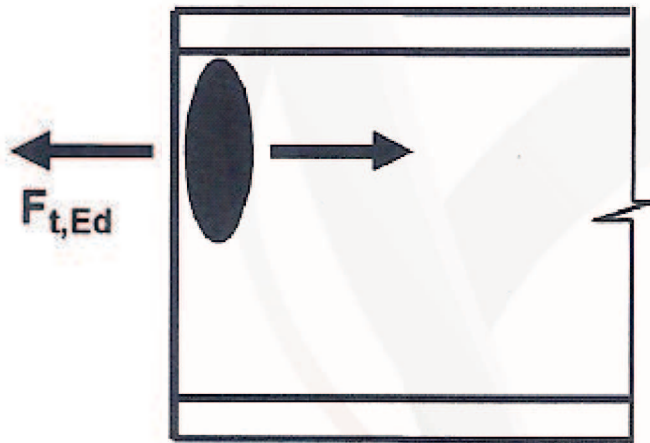
MÉTODO DOS COMPONENTES

MÉTODO ANALÍTICO (NP EN 1993-1-8)

CARACTERIZAÇÃO DOS COMPONENTES

Componentes básicos de dimensionamento:

## ⑧ Alma da viga à tração



## ⑩ Parafusos à tração

MÉTODO DOS COMPONENTES

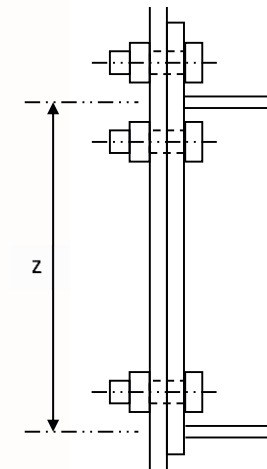
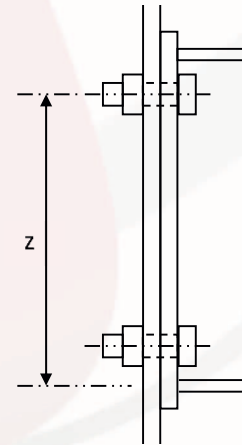
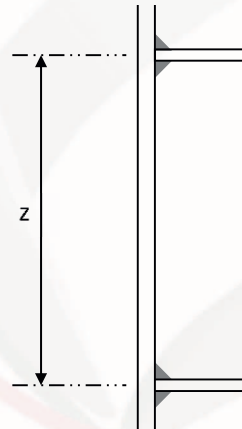
MÉTODO ANALÍTICO (NP EN 1993-1-8)

## MOMENTO FLETOR RESISTENTE

$$M_{j,Rd} = F_{Rd} \times z$$

$F_{Rd}$  - menor dos valores de  $F_{Rd,i}$  de todos os componentes envolvidos na  
ligação

$z$  - braço das forças



## RIGIDEZ DE ROTAÇÃO

Determinada com base nas flexibilidades dos seus componentes básicos, representadas pelos coeficientes de rigidez elástica,  $k_i$ :

$$S_j = \frac{E \times z^2}{u \times \Sigma \frac{1}{k_i}}$$

$u$  - relação de rigidezes =  $S_{j,ini}/S_j$

$$= 1 \rightarrow M_{j,Ed} \leq (2/3) \times M_{j,Rd}$$

$$= (1,5 \times M_{j,Ed}/M_{j,Rd})^\Psi \rightarrow (2/3) \times M_{j,Rd} < M_{j,Ed} \leq M_{j,Rd}$$

$\Psi = 2,7$  (ligações soldadas e ligações aparafusadas com chapa de extremidade)

MÉTODO DOS COMPONENTES

MÉTODO ANALÍTICO (NP EN 1993-1-8)

RIGIDEZ DE ROTAÇÃO

Coeficientes,  $k_i$ , a considerar no cálculo da rigidez de rotação de ligações simples:

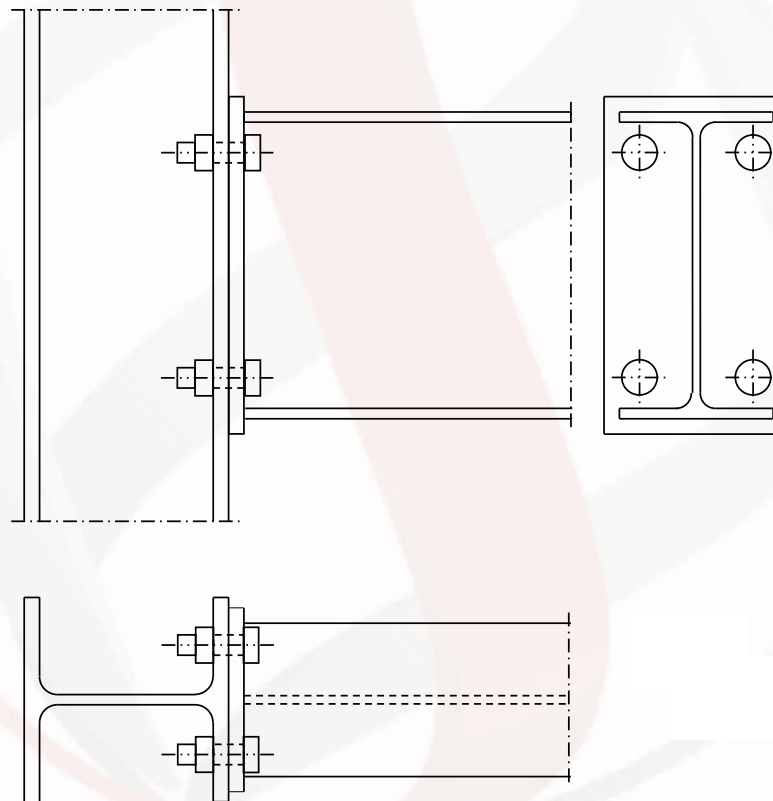
Ligação	Coeficientes de rigidez	Observações
Ligação soldada	$k_1, k_2, k_3$	
Ligação com uma linha de parafusos em tração	$k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_{10}$	
Ligação com mais que uma linha de parafusos em tração	$k_1, k_2, k_{eq}$	ponto 6.3.3 do EC3-1-8
Ligação com chapa de extremidade estendida com duas linhas de parafusos em tração	$k_1, k_2$ $k_3, k_4, k_5, k_{10}$	valores modificados dos coeficientes da zona de tração

MÉTODO DOS COMPONENTES

MÉTODO ANALÍTICO (NP EN 1993-1-8)

## APLICAÇÃO A LIGAÇÕES CORRENTES

*Ligação aparafusada  
com placa de  
extremidade rasa*

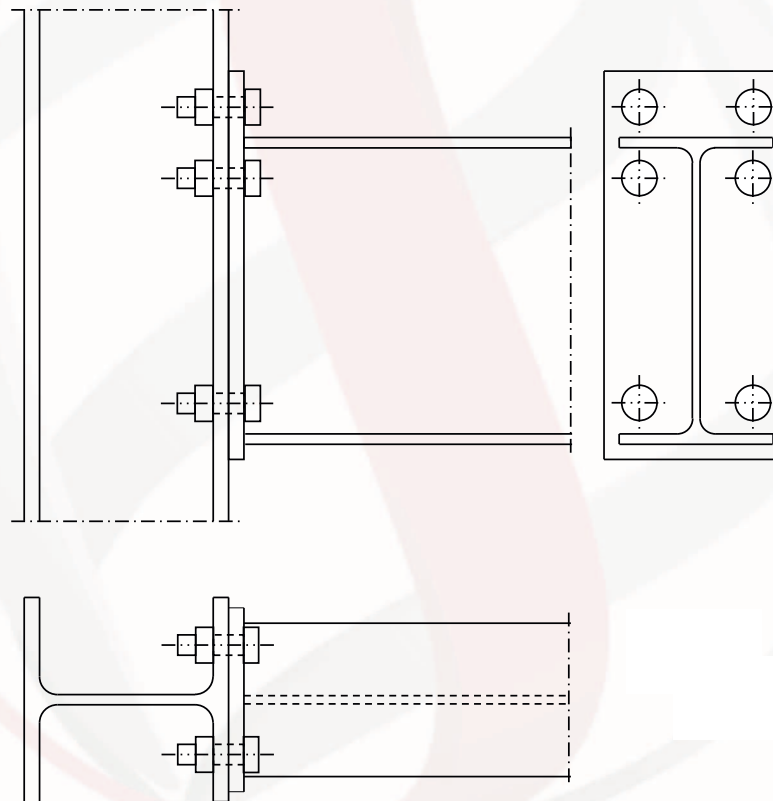


MÉTODO DOS COMPONENTES

MÉTODO ANALÍTICO (NP EN 1993-1-8)

APLICAÇÃO A LIGAÇÕES CORRENTES

**Ligação aparafusada  
com placa de  
extremidade  
estendida**



MÉTODO DOS COMPONENTES

MÉTODO ANALÍTICO (NP EN 1993-1-8)

APLICAÇÃO A LIGAÇÕES CORRENTES

Ligações aparafusadas com chapa de extremidade:



① Painel de alma de coluna solicitado ao corte



② Alma de coluna em compressão transversal



③ Alma de coluna em tração transversal



④ Banzo de coluna em flexão



⑤ Chapa de extremidade em flexão



⑦ Banzo e alma de viga ou de coluna em compressão



⑧ Alma da viga à tração



⑩ Parafusos à tração

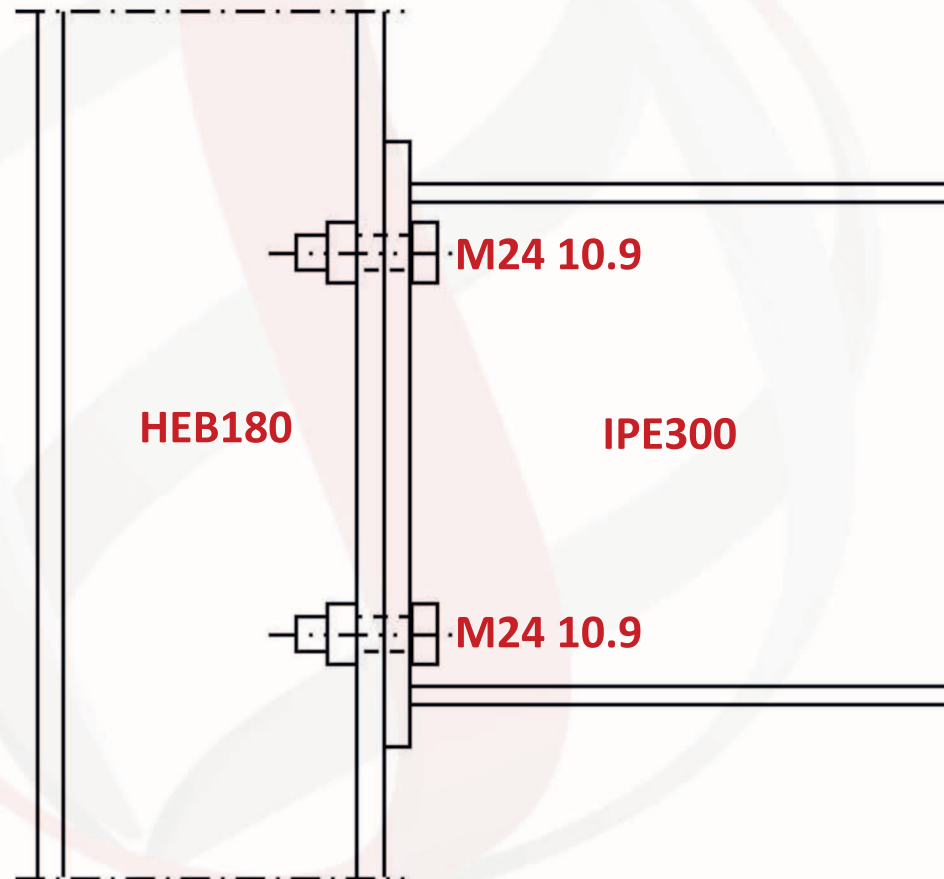
MÉTODO DOS COMPONENTES

MÉTODO ANALÍTICO (NP EN 1993-1-8)

APLICAÇÃO A LIGAÇÕES CORRENTES

*Ligação aparafusada  
com placa de  
extremidade rasa*

Fe510  
S355



MÉTODO DOS COMPONENTES

MÉTODO ANALÍTICO (NP EN 1993-1-8)

APLICAÇÃO A LIGAÇÕES CORRENTES

Compressão	Forças Resistentes [KN]	Tracção	Compressão	Coefficientes de Rigidez [m]	Tracção
F1 = 373,4 F2 = 451,2		F3 = 417,9 F4 = 363,0 F5 = 508,3	k1 = 0,003083 k2 = 0,010722		k3 = 0,009023 k4 = 0,011884 k5 = 0,051887
F7 = 771,1		F8 = 631,3 F10 = 508,3	k7 = Infinito		k8 = Infinito k10 = 0,009903

$$M_{j,Rd} = F_{Rd} \times z = 373,4 \times 0,24895 = 92,9 \text{ KNm}$$

$$S_{j,ini} = \frac{E \times z^2}{\sum \frac{1}{k_i}} = 17777,1 \text{ KNm}$$

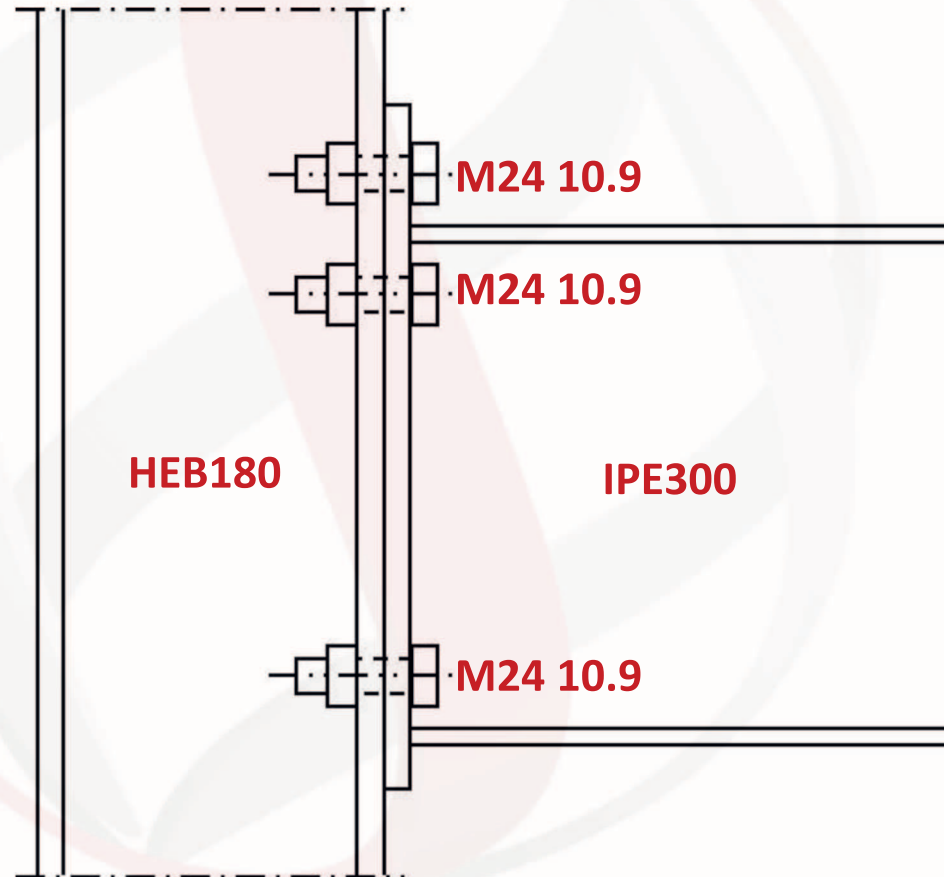
MÉTODO DOS COMPONENTES

MÉTODO ANALÍTICO (NP EN 1993-1-8)

APLICAÇÃO A LIGAÇÕES CORRENTES

*Ligação aparafusada  
com placa de  
extremidade estendida*

**Fe510  
S355**



MÉTODO DOS COMPONENTES

MÉTODO ANALÍTICO (NP EN 1993-1-8)

APLICAÇÃO A LIGAÇÕES CORRENTES

Compressão	Forças Resistentes [KN]	Tracção		
		Interior	Exterior	Equivalente
F1 = 373,4 F2 = 451,2				
		F3 = 494,8	F3 = 494,8	F3e = 494,8
		F4 = 545,9	F4 = 545,9	F4e = 545,9
		F5 = 508,3	F5 = 414,7	F5e = 829,3
F7 = 771,1		F8 = 631,3	F8 = ?	F8e = 631,3
		F10 = 508,3	F10 = 508,3	F10e = 1016,6

$$M_{j,Rd} = F_{Rd} \times z = 373,4 \times 0,2893 = 108,0 \text{ KNm}$$

MÉTODO DOS COMPONENTES

MÉTODO ANALÍTICO (NP EN 1993-1-8)

APLICAÇÃO A LIGAÇÕES CORRENTES

Compressão	Coeficientes de Rigidez [m]	Tracção		
		Interior	Exterior	Modificado
k1 = 0,002659				
k2 = 0,010722				
		k3 = 0,006457	k3 = 0,006457	k3m = 0,012914
		k4 = 0,008505	k4 = 0,008505	k4m = 0,017011
		k5 = 0,051887	k5 = 0,045183	k5m = 0,090367
k7 = Infinito		k8 = Infinito	k8 = Infinito	
		k10 = 0,009909	k10 = 0,009909	k10m = 0,019818

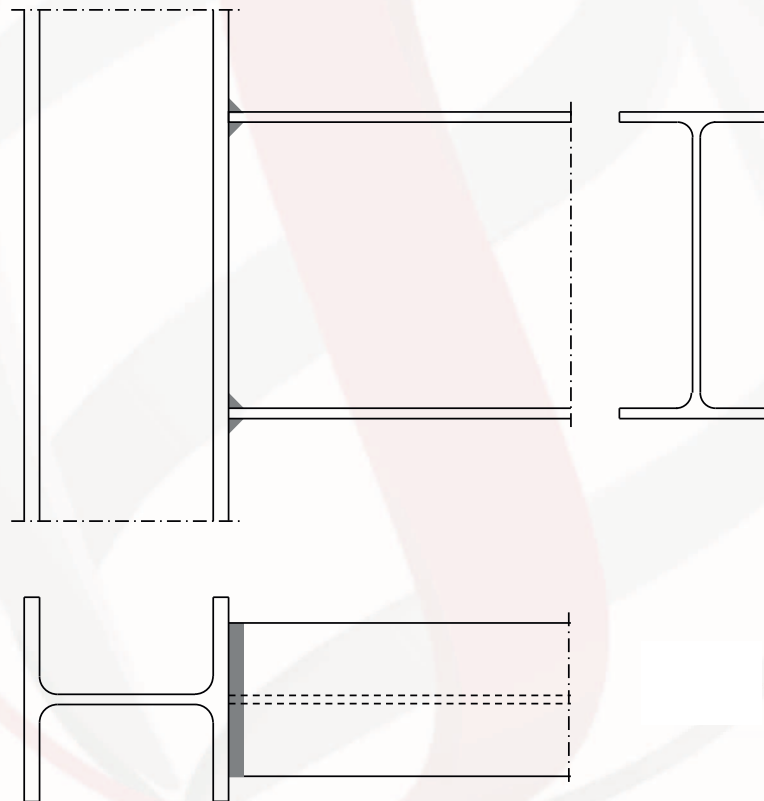
$$S_{j,ini} = \frac{E \times z^2}{\sum \frac{1}{k_i}} = 26344,4 \text{ KNm}$$

MÉTODO DOS COMPONENTES

MÉTODO ANALÍTICO (NP EN 1993-1-8)

## APLICAÇÃO A LIGAÇÕES CORRENTES

### *Ligação soldada*



MÉTODO DOS COMPONENTES

MÉTODO ANALÍTICO (NP EN 1993-1-8)

APLICAÇÃO A LIGAÇÕES CORRENTES

Ligações soldadas:



① Painel de alma de coluna solicitado ao corte



② Alma de coluna em compressão transversal



③ Alma de coluna em tração transversal



④ Banzo de coluna em flexão



⑦ Banzo e alma de viga ou de coluna em compressão



MÉTODO DOS COMPONENTES

MÉTODO ANALÍTICO (NP EN 1993-1-8)

APLICAÇÃO A LIGAÇÕES CORRENTES

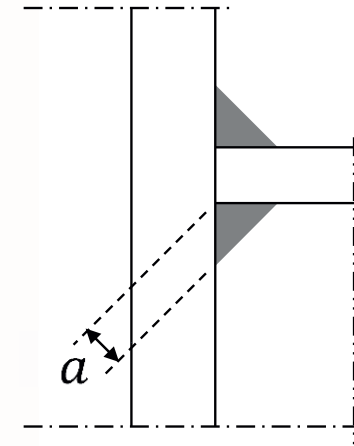
*Ligação soldada*

*definir  $a_b$  - espessura efetiva da solda*

**Fe510  
S355**

**HEB180**

**IPE300**



MÉTODO DOS COMPONENTES

MÉTODO ANALÍTICO (NP EN 1993-1-8)

APLICAÇÃO A LIGAÇÕES CORRENTES

Compressão	Forças Resistentes [KN]	Tracção	Compressão	Coefficientes de Rigidez [m]	Tracção
F1 = 373,4			k1 = 0,00266		
F2 = 397,6			k2 = 0,00828		
F3 = 397,6			k4 = Infinito		k3 = 0,00828
F4 = 518,5		F3 = 397,6	k7 = Infinito		k4 = Infinito
F7 = 771,1		F4 = 518,5			

$$M_{j,Rd} = F_{Rd} \times z = 373,4 \times 0,2893 = 108,0 \text{ KNm}$$

$$S_{j,ini} = \frac{E \times z^2}{\sum \frac{1}{k_i}} = 28458,6 \text{ KNm}$$

MÉTODO DOS COMPONENTES

MÉTODO ANALÍTICO (NP EN 1993-1-8)

APLICAÇÃO A LIGAÇÕES CORRENTES

## Resultados

Ligação	Resistência $M_{j,Rd}$ [KNm]	Rigidez $S_{j,ini}$ [KNm]	Rigidez $S_j$ [KNm]
Ligação com chapa de extremidade rasa	92,9	17777,1	5948,6
Ligação com chapa de extremidade estendida	108,0	26344,4	8815,4
Ligação soldada	108,0	28458,6	9522,9

$$S_{j,ini} / S_j = u \approx 3$$

## ANÁLISE EXPERIMENTAL



## ENSAIOS EXPERIMENTAIS

Programa Doutoral em Construção Metálica e Mista

Laboratório de Estruturas e Mecânica Estrutural

## ANÁLISE EXPERIMENTAL

**DEC** DEPARTAMENTO  
DE ENGENHARIA CIVIL  
UNIVERSIDADE  
DE COIMBRA



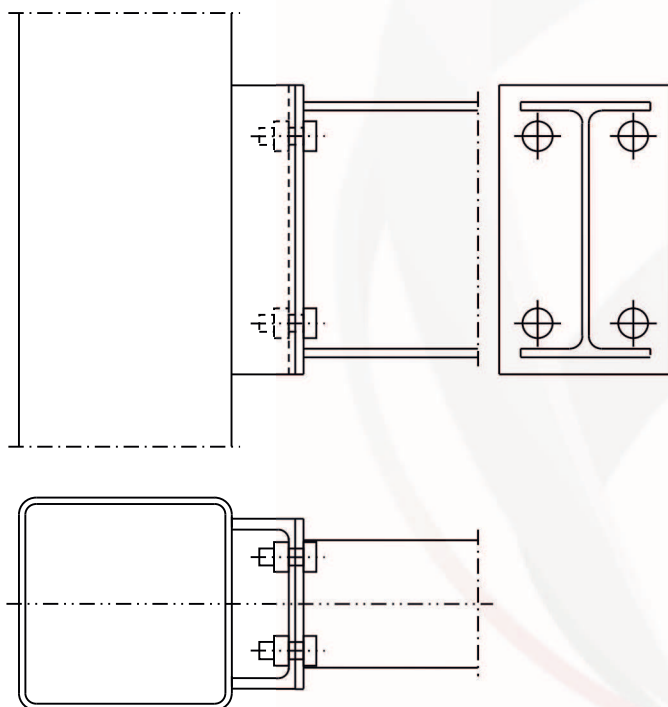
Institute for Sustainability and  
Innovation in Structural Engineering

**FERPINTA**

**GRUPO FERPINTA**

## ESQUEMA DOS ENSAIOS EXPERIMENTAIS

### Ligações metálicas: Viga I - Coluna Tubular (SHS)





## PROGRAMA DE ENSAIOS

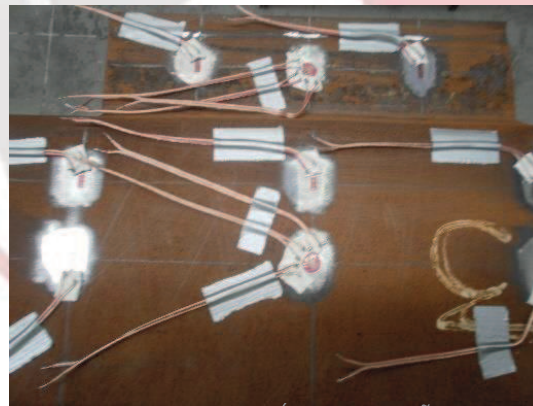
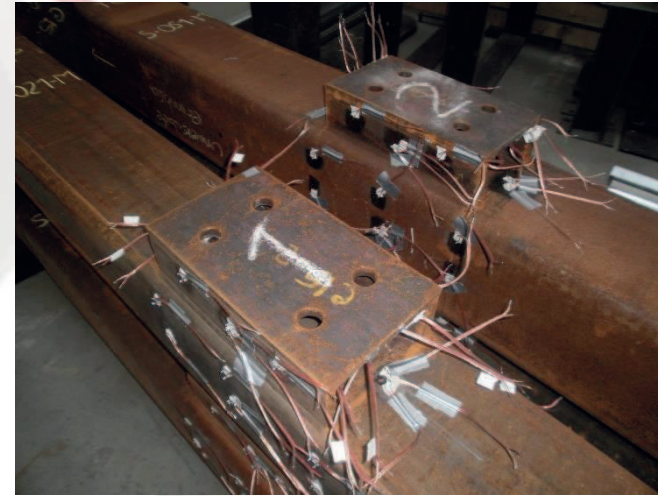
### Parâmetros:

*Largura do perfil tubular*  
*Espessura do perfil tubular*  
*Preenchimento com betão*  
*Esforço axial*

N.º	Perfil	wc [mm]	tc [mm]	Betão	Esforço Axial	Protótipo (Referência)
1	SHS	220	8	X	X	S-021
2		250				10
3			S-052			
4		220	8	✓	S-121	
5		250		X	✓	S-251

## PREPARAÇÃO DOS PROTÓTIPOS

## ANÁLISE EXPERIMENTAL

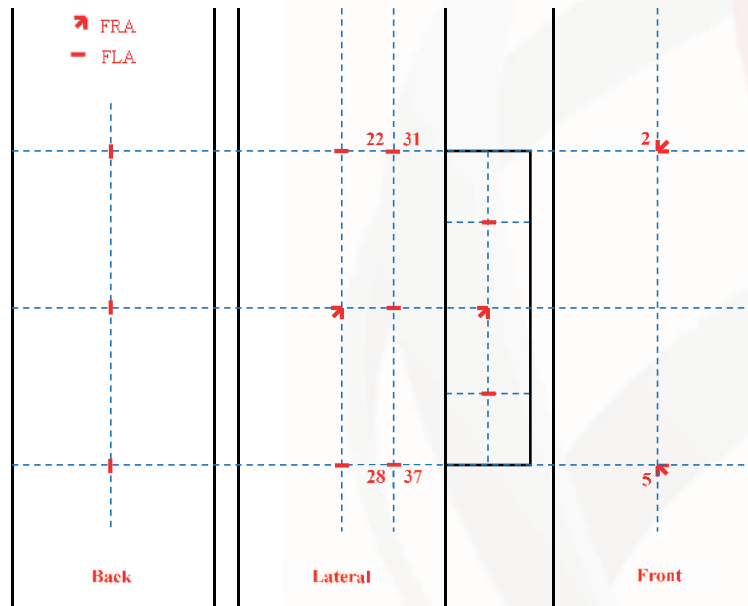


03/10/2018

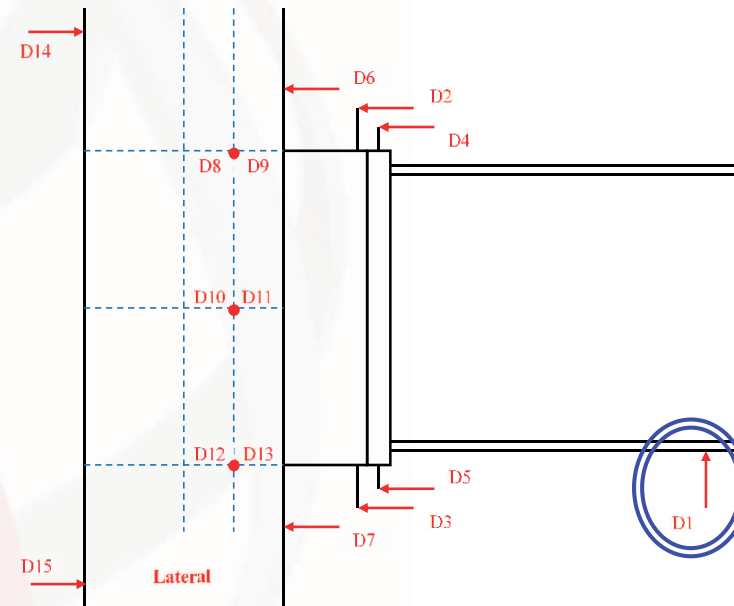
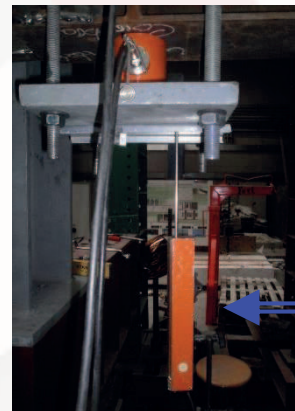
LUÍS MAGALHÃES - IPCB

50

## ESQUEMA DE COLOCAÇÃO DOS DISPOSITIVOS DE MEDIÇÃO



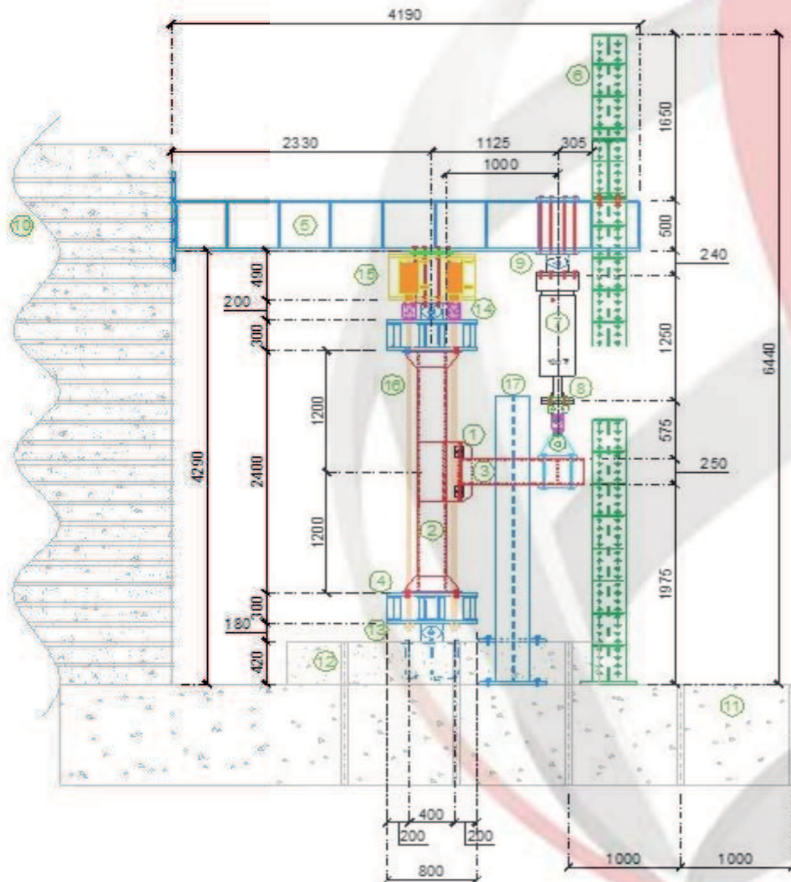
*Extensómetros*



*Transdutores de deslocamento*

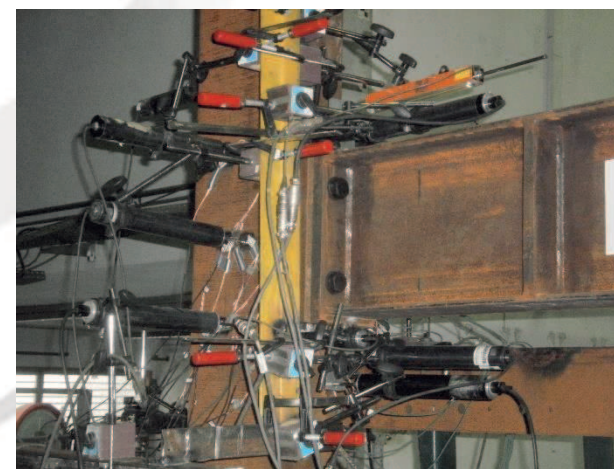
## LAYOUT DE ENSAIOS

## ANÁLISE EXPERIMENTAL



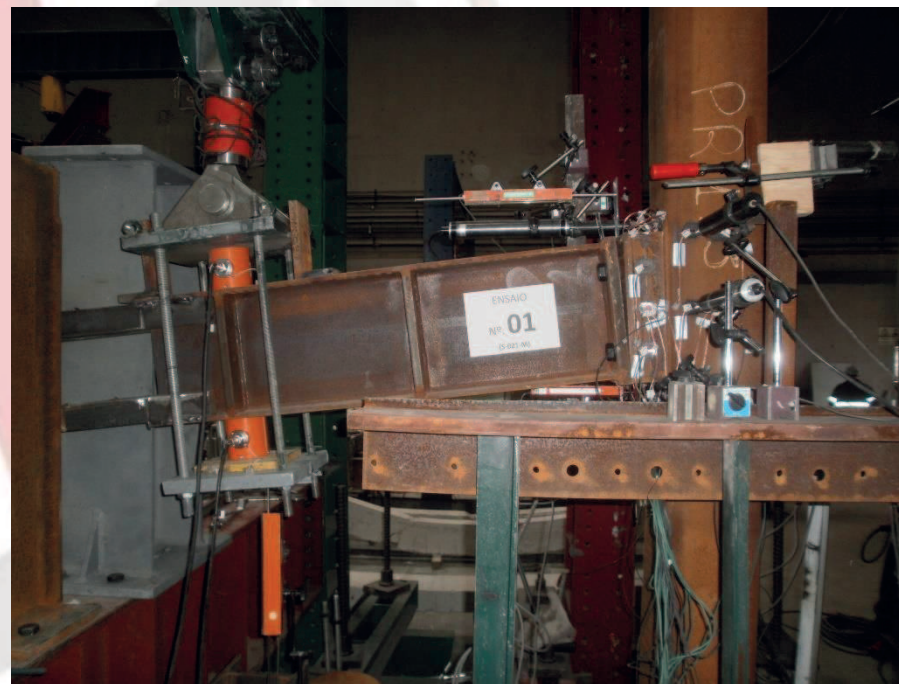
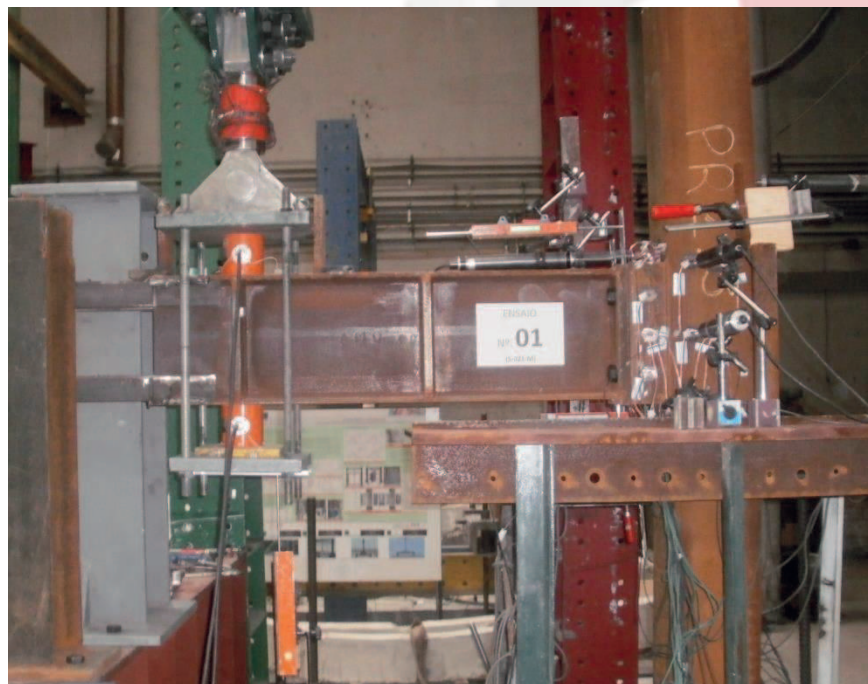
## LAYOUT DE ENSAIOS

## ANÁLISE EXPERIMENTAL



## RESULTADOS DOS ENSAIOS MONOTÓNICOS

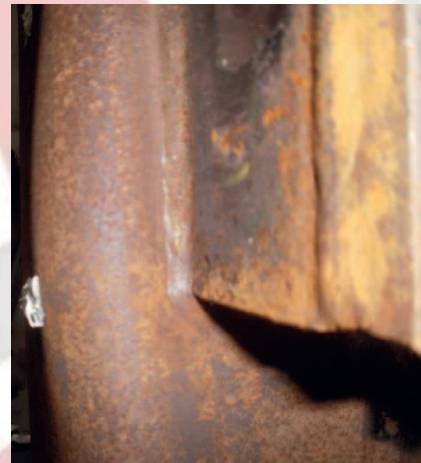
## ANÁLISE EXPERIMENTAL



## RESULTADOS DOS ENSAIOS MONOTÓNICOS

## ANÁLISE EXPERIMENTAL

### Deformações



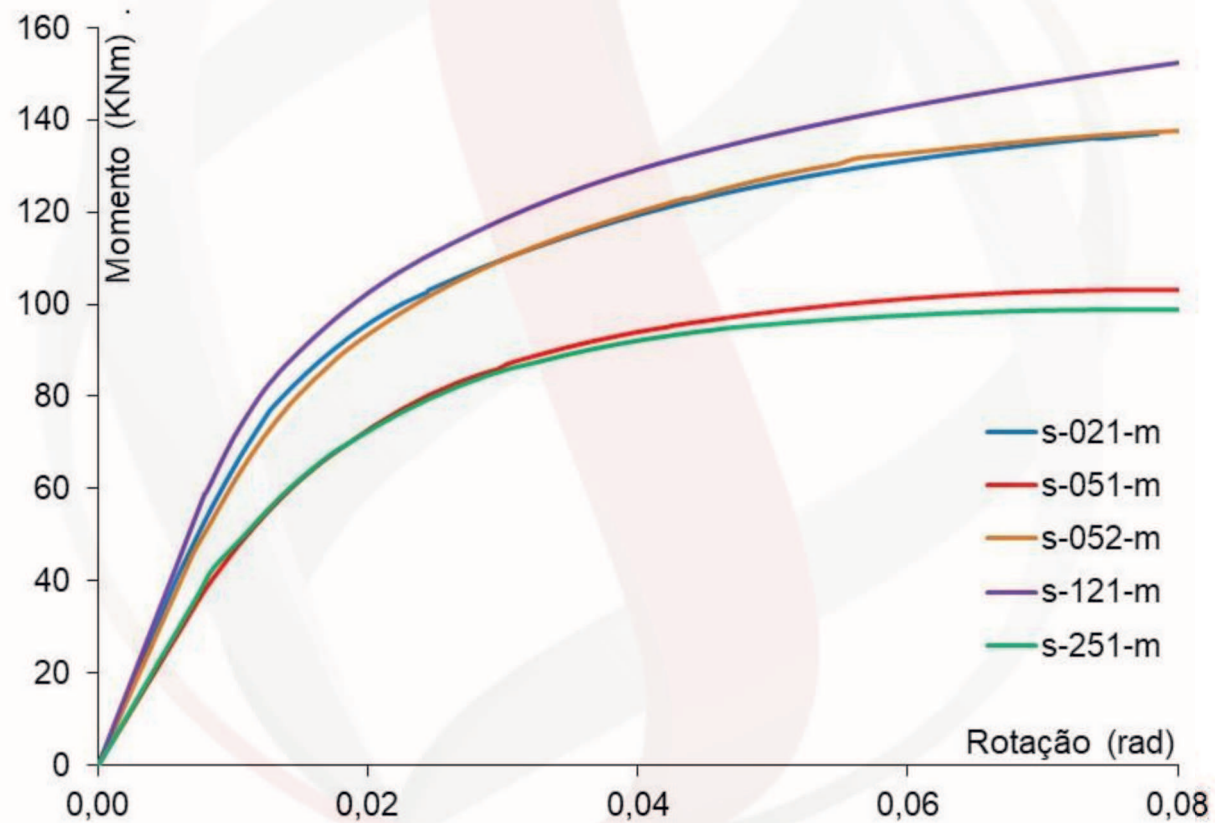
## RESULTADOS DOS ENSAIOS MONOTÓNICOS

## ANÁLISE EXPERIMENTAL

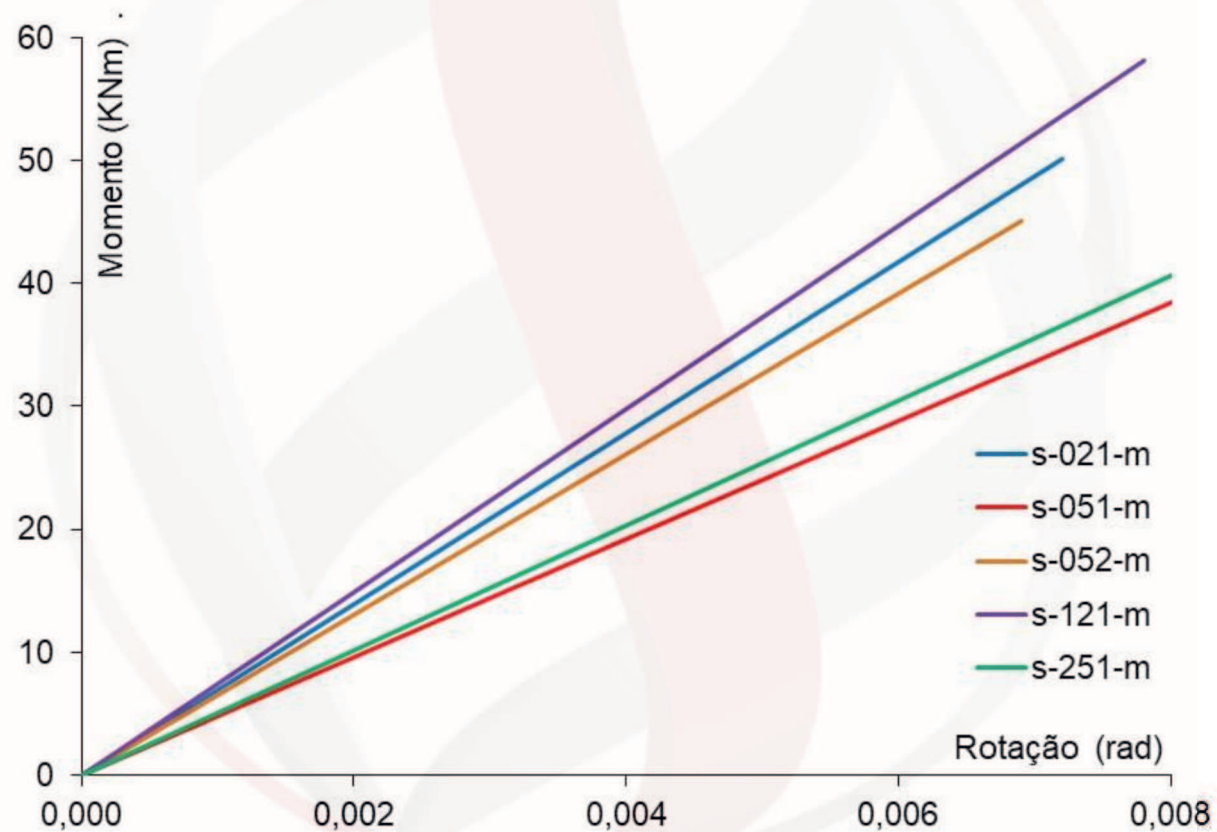
### Rotura



## Curvas Momento - Rotação



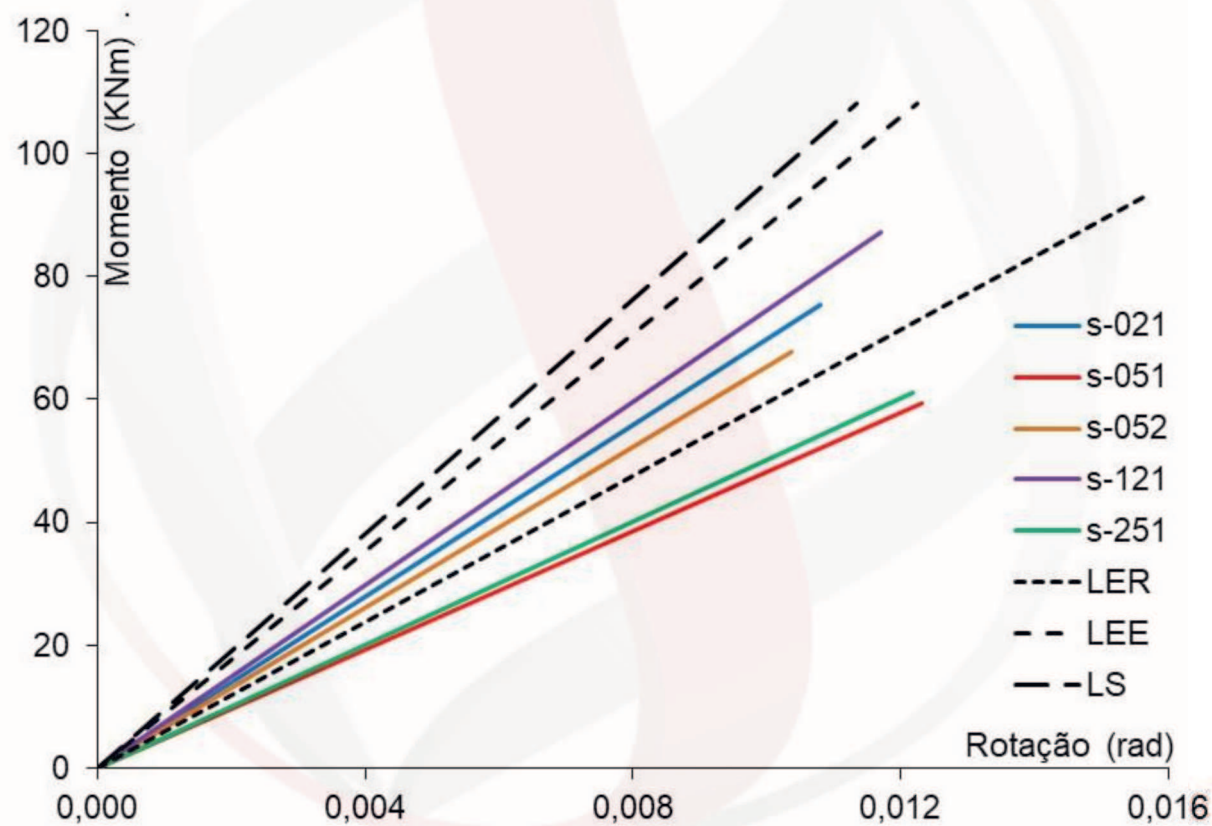
## Curvas Momento – Rotação (Momento elástico)



## Curvas Momento - Rotação

Ligação	Resistência $M_{j,Rd}$ [KNm]	Rigidez $S_j$ [KNm]
S-021	75,3	6967,8
S-051	59,3	4812,2
S-052	67,7	6531,1
S-121	87,3	7457,5
S-251	61,1	5011,7

## COMPARAÇÃO DE RESULTADOS (ANALÍTICOS – EXPERIMENTAIS)



## SEMINÁRIO



PORTUGAL  
STEEL

*Obrigado pela atenção dispensada*

*Luís Magalhães – [Immbmagalhaes@ipcb.pt](mailto:Immbmagalhaes@ipcb.pt)*