

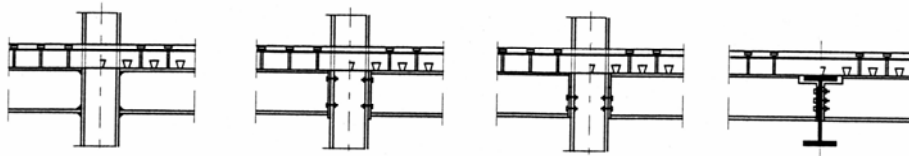
LIGAÇÕES MISTAS VIGA-PILAR

Rui António Duarte Simões - Dep. Engenharia Civil da Universidade de Coimbra

- No passado as ligações em construções mistas aço-concreto eram sempre tratadas como ligações metálicas, desprezando a contribuição do concreto armado no pavimento.
- Atualmente, prova-se que a consideração do concreto armado no comportamento das ligações (ligações mistas aço-concreto), na prática traduz-se em enormes vantagens, como sejam:
 - Redução do peso das vigas e consequente redução da quantidade de aço;
 - Redução da altura das vigas e consequente redução da altura total do edifício;
 - Melhor comportamento em serviço, reduzindo a fendilhação junto aos pilares devido à presença de armadura nos pavimentos.
- Actualmente a análise e dimensionamento de ligações mistas pode ser efectuada com base na Secção 8 do Eurocode 4 e Anexo J do Eurocode 3.

□ Comportamento de Ligações Mistas em Estruturas

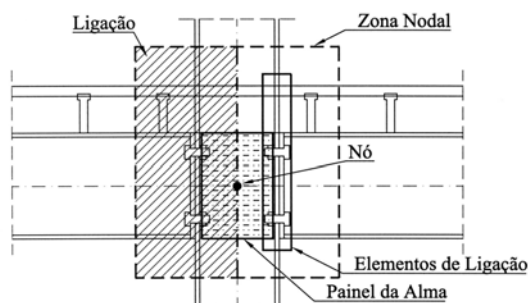
- Na figura seguinte são ilustradas algumas ligações mistas aço-concreto, definidas no âmbito do Eurocode 4 (Secção 8).



Ligações mistas

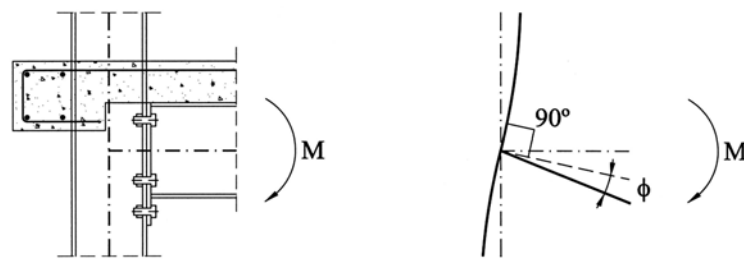
- Terminologia utilizada em ligações (figura ao lado):

- Nó ("node");
- Zona nodal ("nodal zone");
- Elementos de ligação ("connection");
- Ligação ("joint");
- Painel da alma ("shear panel").



Terminologia em ligações

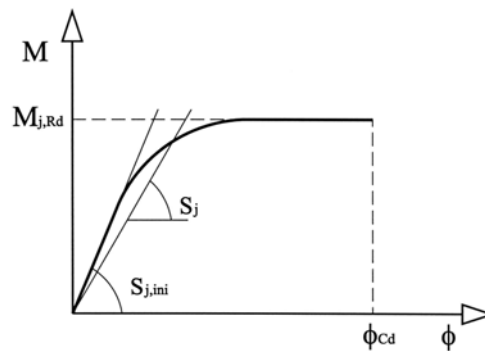
- Em rigor, o comportamento de uma ligação deveria ser analisado no espaço 3D; no entanto, devido especialmente à rigidez introduzida pelo pavimento em concreto armado, é comum desprezar-se as deformações de torção e de flexão fora do plano.
- Como consequência, o comportamento de uma ligação é normalmente traduzido pela curva momento fletor-rotação ($M-\phi$) no plano, sendo M o momento fletor atuante e ϕ a rotação correspondente, definida na figura seguinte:



Rotação de uma ligação

- A partir da curva momento fletor-rotação, como a que se ilustra na figura seguinte, identificam-se as seguintes propriedades:

- Momento Fletor Resistente ($M_{j,Rd}$);
- Rigidez Inicial ($S_{j,ini}$) ou Rigidez Secante (S_j);
- Capacidade de Rotação (ϕ_{Cd}).

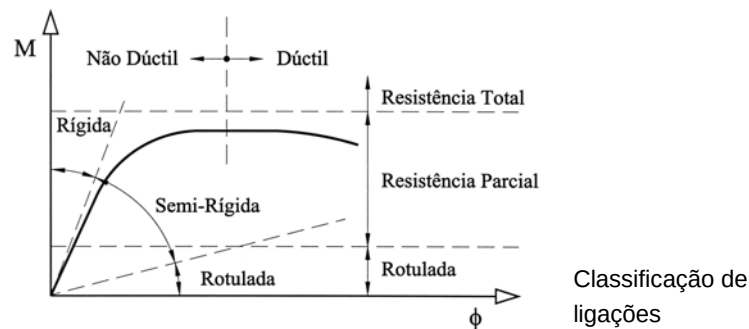


Curva $M-\phi$ de uma ligação

- O conhecimento da rigidez é fundamental para a utilização de métodos elásticos de análise da estrutura; o conhecimento da resistência e da capacidade de rotação é fundamental para a utilização de métodos plásticos de análise.

□ Classificação de Ligações

- Segundo a atual regulamentação europeia (EC4), uma ligação mista, com base na resistência pode ser classificada como ligação com *resistência total*, com *resistência parcial* ou *rotulada*; com base na rigidez pode ser classificada como *rígida*, *semi-rígida* ou *rotulada*; em termos de ductilidade uma ligação pode ser *dúctil* ou *não dúctil*.
- A classificação é efectuada comparando a resistência, a rigidez inicial e a capacidade de rotação com determinados valores limites, como se exemplifica de uma forma qualitativa na figura seguinte.

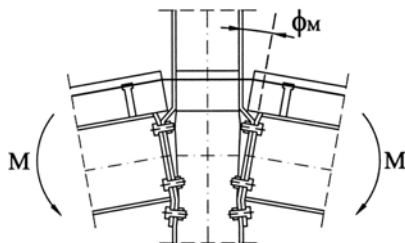


□ Modelação do Comportamento de Ligações Mistas

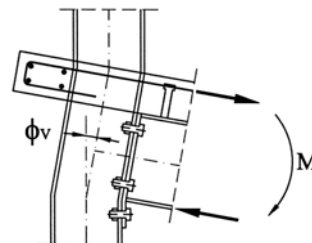
- Numa ligação viga-pilar, a rotação total pode ser originada por duas formas distintas de deformação:

Deformação dos elementos de ligação (placa de extremidade, mesa do pilar, cantoneiras de apoio, parafusos, etc.) e deformação por alongamento ou encurtamento da alma do pilar, provocadas pela flexão (ϕ_M);

Distorção do painel da alma do pilar, devido ao esforço de corte horizontal (ϕ_V).



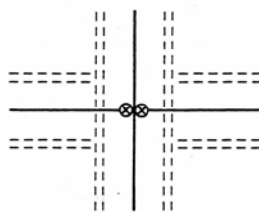
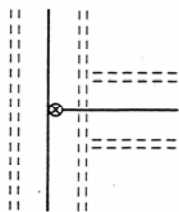
Rotação por flexão dos elementos de ligação



Rotação por corte no painel

- Na modelagem de estruturas, as ligações podem ser simuladas como molas, caracterizadas por uma rigidez rotacional igual à da ligação.

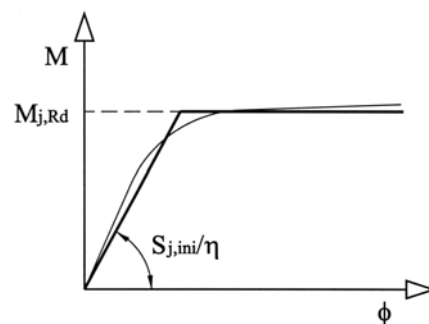
- De forma a simplificar a modelação de ligações em estruturas, as duas formas de rotação referidas podem ser associadas numa única mola.
- Uma ligação em nó externo é modelada como uma mola localizada no ponto de interseção dos eixos da viga e do pilar.
- As ligações em nó interno são modeladas como duas molas, uma de cada lado do nó, mas interagindo entre si. A necessidade de considerar a interação entre ligações em nó interno, deve-se ao fato de a distorção por corte na alma do pilar (carregamento não simétrico), ser devida aos momentos fletores atuantes em ambas as ligações. Segundo o EC 4 (Secção 8), a interação entre as ligações é simulada através da introdução de um parâmetro β na caracterização da componente painel da alma ao corte.



Modelação de ligações

□ Idealização do Comportamento de Ligações Mistas

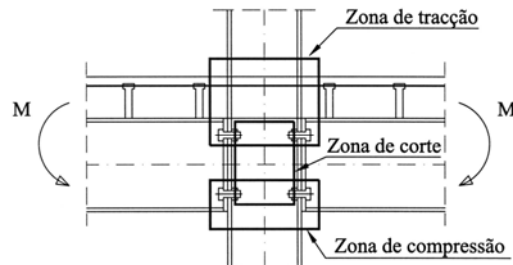
- O comportamento rotacional real de uma ligação metálica ou mista é traduzido por uma curva momento fletor-rotação não linear (pouco prático nas situações correntes).
- Em situações correntes, o Eurocódigo 4 (Seção 8) permite que as ligações sejam simuladas de uma forma aproximada, traduzindo o comportamento real através de modelos simplificados, como sejam os modelos bi-linear e tri-linear.
- O modelo bi-linear é ilustrado na figura ao lado, onde a curva momento fletor-rotação da ligação mista é idealizada através de uma curva bi-linear, cuja rigidez na zona elástica é dada por $S_{j,ini}/\eta$, sendo o coeficiente η igual a 2 em ligações mistas com placa de extremidade e definido no EC4 (Seção 8) para outras situações.



Modelo bi-linear

❑ Método das Componentes

- O comportamento de uma ligação é o resultado da interação entre o comportamento individual das diversas componentes, localizadas nas zonas de **Tração**, **Corte** e **Compressão**.



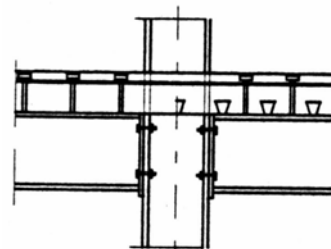
Zonas específicas de tensões

- Componentes cujo comportamento depende do concreto armado (EC4)
 - ≡ Armadura longitudinal e transversal do pavimento;
 - ≡ Interação viga metálica-pavimento;
 - ≡ Interação pavimento-pilar;
 - ≡ Alma do pilar ao corte e à compressão, reforçada com concreto (pilares mistos).
- Componentes metálicas (EC3)

- Numa ligação mista viga-pilar aparafusada com placa de extremidade, submetida a momento fletor negativo, devem ser consideradas as seguintes componentes:

Zona de Tração

- ≡ Armadura do pavimento;
- ≡ Ligação viga metálica-pavimento em concreto;
- ≡ Interação pavimento-pilar (ligação oposta);
- ≡ Alma do pilar;
- ≡ Mesa do pilar à flexão (T-Stub);
- ≡ Placa de extremidade à flexão (T-Stub);
- ≡ Parafusos;
- ≡ Alma da viga.



Ligação mista em nó interno

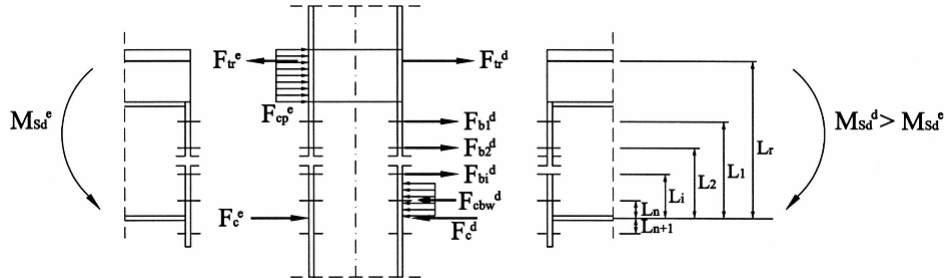
Zona de Corte

- ≡ Painel de alma do pilar, com a possibilidade de ser reforçado com concreto (pilar misto).

Zona de Compressão

- ≡ Alma do pilar, com a possibilidade de ser reforçada com concreto (pilar misto);
- ≡ Alma e mesa inferior da viga.

- **Resistência** - O momento fletor resistente ($M_{j,Rd}$) é avaliado com base nas forças máximas que se podem desenvolver em cada componente, como se exemplifica a seguir.

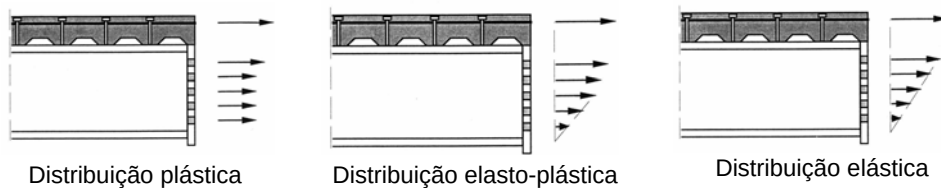


Ligações em nó interno com momentos fletores negativos (diferentes)

$$M_{j,Rd} = F_{tr} \cdot L_r + \sum_{i=0}^m (F_{bi} \cdot L_i) - h_w \cdot t_{wb} \cdot f_{ywb} \cdot \left(\frac{h_w}{2} + \frac{t_{fb}}{2} \right)$$

F_{tr} - Força de tração ao nível da armadura do pavimento; F_{bi} - Força de tração ao nível da linha de parafusos i ; F_c - Força de compressão ao nível do banzo inferior da viga; F_{cbw} - Força de compressão ao longo da alma da viga; F_{cp} - Força de compressão na superfície de interação entre o pavimento em concreto e a mesa do pilar.

- As forças máximas que se podem desenvolver em cada componente devem ser estabelecidas considerando os seguintes aspectos:
 - ≡ As Forças devem estar em equilíbrio com os esforços aplicados;
 - ≡ A resistência máxima de cada componente não pode ser excedida;
 - ≡ A capacidade de deformação de cada componente não pode ser excedida.
- Em geral, a avaliação do momento fletor resistente é efetuada com base numa distribuição plástica de forças pelas diversas componentes (linhas de parafusos); no entanto, quando a capacidade de redistribuição de forças for reduzida, como acontece por exemplo numa ligação com placa de extremidade de espessura elevada, devem ser utilizadas distribuições elásticas ou elasto-plásticas de forças conforme apresentado abaixo:

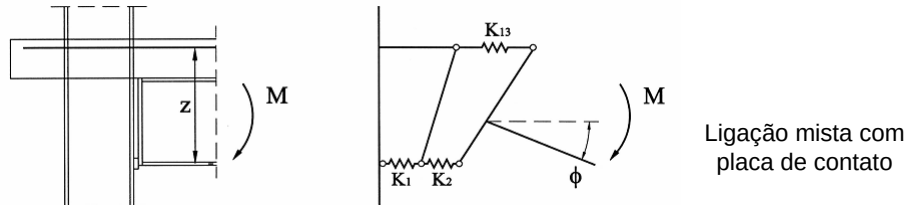


- **Rigidez Rotacional** - A rigidez inicial é avaliada com base na rigidez elástica das componentes. Cada componente é caracterizada (na zona elástica) por uma relação força-deformação linear, do tipo:

$$F_i = K_i \cdot E_a \cdot \Delta_i$$

sendo F_i a força desenvolvida na componente i , K_i o coeficiente de rigidez da componente i , E_a o módulo de elasticidade do aço estrutural e Δ_i a deformação da componente i .

- Na ligação simples ilustrada a seguir, as únicas componentes a serem consideradas na avaliação da rigidez são: a armadura longitudinal do pavimento em tração (K_{13}), a alma do pilar em compressão (K_2) e o painel da alma do pilar ao corte (K_1).



- Por razões de equilíbrio da seção da ligação, as forças F_i desenvolvidas nas diversas componentes são todas iguais a F ; o momento fletor atuante é dado por $M = F \cdot z$, em que z é o braço de forças e a rotação da ligação é dada por $\phi = (\Delta_{13} + \Delta_2 + \Delta_1)/z$, em que Δ_{13} , Δ_2 e Δ_1 representam as deformações nas três componentes da ligação considerada. A rigidez inicial $S_{j,ini}$ da ligação é dada pela seguinte equação:

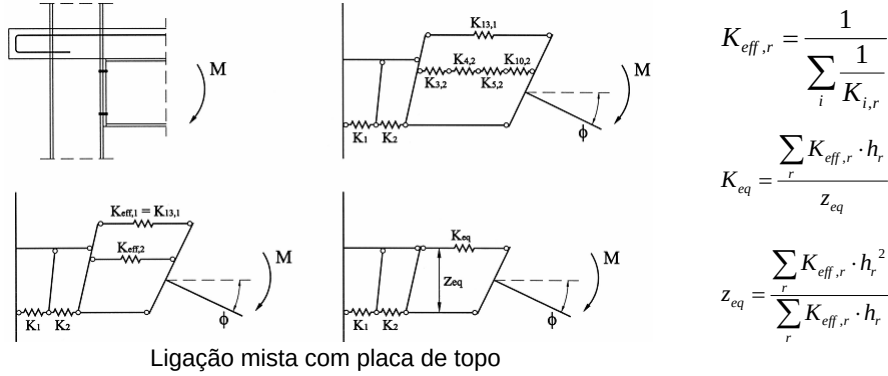
$$S_{j,ini} = \frac{M}{\phi} = \frac{F \cdot z}{\frac{\Delta_{13}}{z} + \frac{\Delta_2}{z} + \frac{\Delta_1}{z}} = \frac{F \cdot z^2}{\frac{F}{E_a} \cdot \left(\frac{1}{K_{13}} + \frac{1}{K_2} + \frac{1}{K_1} \right)} = \frac{E_a \cdot z^2}{\sum_i \frac{1}{K_i}}$$

- O modelo anterior constitui o modelo de associação (montagem) das componentes adotado nos EC3 e EC4, cuja expressão geral é a seguinte:

$$S_j = \frac{E_a \cdot z^2}{\mu_s \cdot \sum_i \frac{1}{K_i}}$$

em que $\mu_s = S_{j,inf}/S_j$ permite definir a rigidez secante para momentos fletores actuantes entre $2/3 M_{j,Rd}$ e $M_{j,Rd}$ (Secção 8 do EC4); a rigidez inicial $S_{j,ini}$ é obtida fazendo $\mu_s = 1.0$.

- Nas ligações correntes podem surgir componentes à tração ou à compressão em paralelo (a vários níveis) ou em série, como se ilustra na ligação seguinte.



- Para avaliar a rigidez da ligação anterior, é necessário associar as componentes em paralelo (substituindo K_i por K_{eq}) e/ou em série (substituindo K_i por $K_{eff,r}$), de forma a termos apenas componentes a dois níveis (tração e compressão), separadas por um braço de forças equivalente z_{eq} ; estes parâmetros são avaliados com as expressões indicadas acima, em que h_r é a distância entre uma componente ao nível r e o centro de compressões.

□ Componentes Específicas de uma Ligação Mista Viga-Pilar

i) Armadura do pavimento

- A resistência à tração da armadura longitudinal do pavimento $F_{tr,s,Rd}$ é avaliada através da seguinte expressão:

$$F_{tr,s,Rd} = A_{r,s} \cdot \frac{f_{sk}}{\gamma_s}$$

em que $A_{r,s}$ é a área da secção transversal da armadura longitudinal do pavimento contida na largura efectiva, f_{sk} é a tensão característica do aço e γ_s é um coeficiente parcial de segurança relativo ao aço da armadura longitudinal ($\gamma_s = 1.15$ segundo o EC4).

- Sempre que os momentos flectores atuantes à esquerda e à direita forem diferentes, para que a força na armadura longitudinal do pavimento obtida através da equação anterior se possa desenvolver, deve ser colocada no pavimento uma armadura transversal, do lado da ligação menos esforçada, com uma área A_t definida de acordo com 8.6.2 do EC4.

- Numa ligação em nó externo, para que a força $F_{tr,s,Rd}$ se possa desenvolver, é necessário que o processo de ancoragem da armadura longitudinal seja efectivo; caso contrário, deve ser desprezada a contribuição do pavimento, caracterizando a ligação apenas com base nas suas componentes metálicas.
- O coeficiente de rigidez da componente armadura do pavimento à tração, denominado por K_{13} no EC4 (Secção 8) é obtido através das seguintes expressões:

$$K_{13} = \frac{2 \cdot A_{r,s}}{h_c} \cdot \frac{E_s}{E_a}, \quad \text{Ligações em nó interno com } M_{esq} = M_{dir}$$

$$K_{13} = \frac{A_{r,s}}{3.6 \cdot h_c} \cdot \frac{E_s}{E_a}, \quad \text{Ligações em nó externo}$$

sendo E_s o módulo de elasticidade do aço da armadura longitudinal, E_a o módulo de elasticidade do aço estrutural e h_c a altura da secção metálica do pilar.

- Em outras situações, o coeficiente de rigidez pode ser avaliado de acordo com a Secção 8 (8.4.2) do EC 4.

ii) Interação viga metálica-pavimento

- A influência do deslizamento na superfície de contacto viga metálica-pavimento, na rigidez de uma ligação mista viga-pilar, pode ser considerada reduzindo o coeficiente relativo à armadura longitudinal K_{13} (método simplificado descrito na secção 8 (8.4.3) do EC4).
- Para ligações em nó interno com momentos iguais em ambas as ligações (ou para a ligação mais solicitada no caso dos momentos serem diferentes) e para ligações em nó externo, o coeficiente de rigidez K_{13} deve ser multiplicado por um fator de redução dado por:

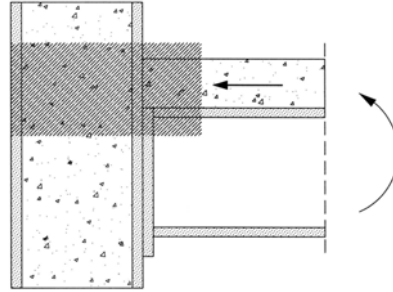
$$K_r = \frac{1}{1 + \frac{E_s \cdot K_{13}}{K_{sc}}}$$

em que K_{sc} é um coeficiente que depende essencialmente da distribuição e tipo de conectores utilizados na ligação viga metálica-pavimento e pode ser avaliado com base na Secção 8 (8.4.3) do EC4.

iii) Interação pavimento-pilar

- Segundo o EC 4 (Secção 8), a resistência ao esmagamento do concreto na interface pavimento-mesa do pilar, pode ser avaliada através da seguinte expressão:

$$F_{cp,Rd} = 1.1 \cdot b_{c,eff} \cdot d_{eff} \cdot 0.85 \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c}$$



Zona de contacto pavimento-pilar

em que $b_{c,eff}$ é a largura da secção do pilar, d_{eff} é a espessura efectiva do pavimento, f_{ck} é a tensão característica à compressão do concreto do pavimento e γ_c é o coeficiente parcial de segurança relativo ao concreto ($\gamma_c=1.5$ segundo o EC 4).

- Actualmente o EC4 (Secção 8) ainda não permite quantificar a influência desta componente na rigidez de uma ligação (ligações sujeitas a momento fletor positivo ou ligações em nó interno com momentos negativos diferentes à esquerda e à direita); esta componente é ainda objeto de investigação.

iv) Pannel da alma do pilar ao corte horizontal

- A resistência ao corte horizontal do pannel da alma reforçado com concreto é dada pela seguinte expressão:

$$V_{wp,Rd} = V_{wp,a,Rd} + V_{wp,c,Rd}$$

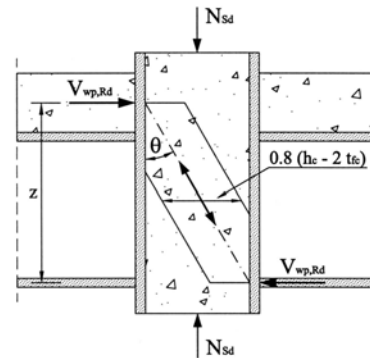
sendo $V_{wp,a,Rd}$ a resistência ao corte da alma metálica do pilar e $V_{wp,c,Rd}$ o aumento de resistência devido ao concreto envolvente da alma, obtido através da seguinte expressão:

$$V_{wp,c,Rd} = \nu \cdot \frac{0.85 \cdot f_{ck}}{\gamma_c} \cdot A_c \cdot \sin \theta$$

$$A_c = [0.8 \cdot (h_c - 2 \cdot t_{fc}) \cdot \cos \theta] \cdot [b_c - t_{wc}] \quad \theta = \arctan((h_c - 2 \cdot t_{fc})/z)$$

$$\nu = 0.55 \cdot (1 + 2 \cdot (N_{Sd} / N_{pl,Rd})) \leq 1.1$$

sendo h_c e b_c a altura e a largura da seção metálica do pilar, respectivamente, t_{fc} e t_{wc} as espessuras da mesa e da alma da mesma seção e z o braço de forças (z_{eq} segundo o EC4). O fator de redução ν traduz a influência do esforço axial, sendo N_{Sd} e $N_{pl,Rd}$ o esforço axial atuante e o esforço axial resistente do pilar, respectivamente.



Reforço do pannel da alma com concreto

- O coeficiente de rigidez do painel da alma reforçada com concreto é dado pela seguinte expressão:

$$K_{1,ref} = 0.06 \cdot \frac{b_c \cdot h_c}{\beta \cdot z} \cdot \frac{E_{cm}}{E_a}$$

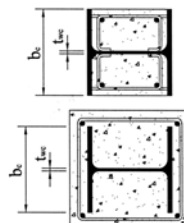
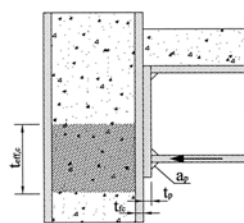
sendo:

- z - O braço de forças, definido de acordo com a Secção 8 (8.2.4) do Eurocódigo 4;
 - β - Um parâmetro de transformação para ter em conta a interação entre as ligações esquerda e direita de um nó; segundo a Secção 8 (8.2.4) do Eurocódigo 4, este parâmetro pode ser tomado com os seguintes valores aproximados: $\beta = 0$ para ligações em nó interno com carregamento simétrico, $\beta = 1$ para ligações em nó externo e $\beta = 2$ para ligações em nó interno com carregamento anti-simétrico;
 - E_{cm} - O módulo de elasticidade do concreto;
 - E_a - O módulo de elasticidade do aço estrutural;
 - h_c, b_c - A altura e a largura da secção metálica do pilar, respectivamente.
- Segundo o EC4 (Secção 8), o concreto no painel da alma do pilar constitui apenas um reforço da componente alma do pilar ao corte e não mais uma componente.

v) Alma do pilar à compressão

- Em um pilar misto, o concreto envolvente da alma, além de eliminar o risco de flambagem local permitindo o desenvolvimento da resistência plástica da alma metálica, contribui para aumentar a resistência à compressão. Segundo o EC4 (Secção 8), essa contribuição pode ser avaliada através da seguinte expressão:

$$F_{c,wc,c,Rd} = K_{wc,c} \cdot t_{eff,c} \cdot (b_c - t_{wc}) \cdot \frac{0.85 \cdot f_{ck}}{\gamma_c}$$



Reforço da alma do pilar com concreto, na zona de compressão

em que $K_{wc,c} = 1.3 + 3.3 \cdot \sigma_{com,c,Ed} / (f_{ck} / \gamma_c) \leq 2.0$ é um fator dependente da tensão de compressão vertical $\sigma_{com,c,Ed}$, provocada no concreto pelo esforço axial atuante no pilar N_{Sd} , $t_{eff,c}$ é a altura efectiva de concreto (8.3.3.2 da Secção 8 - EC4) e b_c é a largura da mesa do pilar; as restantes grandezas são descritas na figura.

- O coeficiente de rigidez do concreto envolvente da alma do pilar à compressão, designado por $K_{2,ref}$, pode ser avaliado através da seguinte expressão, para ligações aparafusadas com placa de extremidade:

$$K_{2,ref} = \frac{0.5 \cdot t_{eff,c} \cdot b_c}{h_c} \cdot \frac{E_{cm}}{E_a}$$

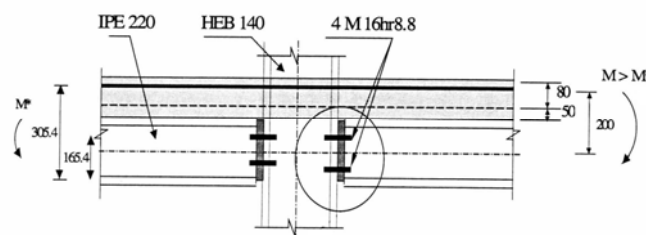
cujas grandezas foram definidas anteriormente.

- Tal como na componente anterior, também aqui o concreto envolvente da alma do pilar à compressão é assumido apenas como um reforço da componente, e não como mais uma componente.

□ Capacidade de rotação de uma ligação mista

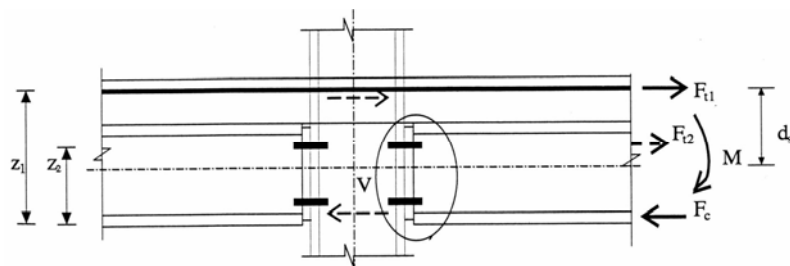
- Na Secção 8 do Eurocódigo 4 (à semelhança do Anexo J do EC3) a ductilidade das ligações é avaliada apenas de uma forma qualitativa; neste documento são indicadas disposições de dimensionamento de forma a que a rotura seja condicionada por componentes dúcteis (armadura do pavimento à tração, painel da alma ao corte, etc...), o que à partida garante uma capacidade de rotação elevada.

- **EXEMPLO DE APLICAÇÃO** - Cálculo da resistência ($M_{i,Rd}$) e da rigidez inicial ($S_{j,ini}$) de uma ligação mista viga-pilar com placa de topo aparafusada, em nó interno, como se ilustra na figura seguinte:



Ligação mista viga-pilar em nó interno

- Dados adicionais:
 - = Aço estrutural (perfis e placas de topo) - S275 ($f_y = 275$ MPa);
 - = Armadura longitudinal - $f_{sk} = 460$ MPa; percentagem da armadura longitudinal em relação à secção de concreto = 0.7%;
 - = Conectores - Rigidez = 100 kN/mm; espaçamento = 100 mm;
 - = concreto - $f_{ck} = 20$ MPa; $E_{cm} = 29$ GPa.



Distribuição de forças na ligação mais esforçada

- O momento resistente ($M_{j,Rd}$) e a rigidez inicial ($S_{j,ini}$), considerando duas situações: pilar metálico e pilar misto, obtidos através do método das componentes proposto pelos EC3 e EC4, são descritos no quadro seguinte:

Pilar metálico		Pilar misto	
$M_{j,Rd}$ (kNm)	$S_{j,ini}$ (kNm/rad)	$M_{j,Rd}$ (kNm)	$S_{j,ini}$ (kNm/rad)
40.7	9126	44.9	10792

□ BIBLIOGRAFIA

- CEN - Eurocódigo 3 - Projecto de Estruturas de Aço - Parte 1.1: Regras Gerais e Regras para Edifícios, vols. I e II, ENV 1993-1-1, 1998.
- CEN - Annex J for Eurocode 3 - Joints in Building Frames. ENV 1993-1-1:1992/A2, October 1998.
- CEN - Eurocode 4 – Design of Composite Steel and Concrete Structures - Part 1.1 (Draft nº 1): General Rules and Rules for Buildings, prEN 1994-1-1: 2001.
- COST C1 - Composite Steel-Concrete Joints in Braced Frames for Buildings. Edited by D. Anderson, Brussels-Luxembourg, 1996.
- SCI - Moment Connections in Composite Construction: Interim Guidance for End-Plate Connections. Prepared by Lawsen, R. M. and Gibbons, C., SCI-P-143, 1995.
- SCI - Joints in Steel Construction - Composite Connections. Compiled by G. Couchman and A. Way, SCI-P-213, 1998.
- ECCS - Design of Composite Joints for Buildings. Edited by D. Anderson et al., Nº 109, 1999.
- Li, T. Q., Nethercot, D. A. and Choo, B. S. - Behaviour of Flush End-Plate Composite Connections with Unbalanced Moment and Variable Shear/Moment Ratios - II. Prediction of Moment Capacity. Journal of Constructional Steel Research, vol. 38, n. 2, pp. 165-198, 1996.

ANÁLISE EXPERIMENTAL DE LIGAÇÕES MISTAS VIGA-PILAR

Departamento de Engenharia Civil - Universidade de Coimbra

□ PRINCIPAIS OBJETIVOS

→ **Modelagem Experimental** - Avaliação do comportamento global de ligações mistas viga-pilar com placa de extremidade:

- Ligações em nó interno / nó externo; Ações de carácter estático monotónico / cíclico; Ligações submetidas a momento fletor negativo / positivo; Efeito do confinamento do concreto armado em pilares.

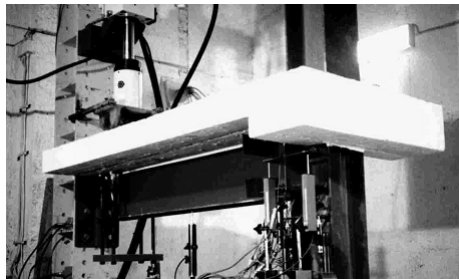
→ **Modelagem Analítica e Comparação com Resultados Experimentais**

- Alargar e/ou validar a metodologia de análise estática de ligações mistas adotada no Eurocódigo 4; Validar e calibrar os modelos de comportamento cíclico considerados.

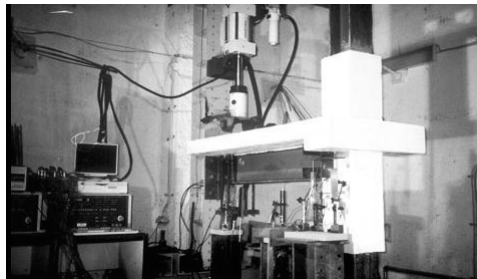
□ PROGRAMA EXPERIMENTAL

Ensaio	Ligações	Pilar	Tipo de Carregamento
E1	Nó Interno	Metálico	Estático (M^- / M^-)
E2	Nó Interno	Metálico	Estático (M^+ / M^-)
E3	Nó Externo	Metálico	Estático (M^-)
E4	Nó Externo	Metálico	Estático (M^+)
E5	Nó Externo	Misto	Estático (M^-)
E6	Nó Externo	Misto	Estático (M^+)
E7	Nó Interno	Misto	Estático (M^- / M^-)
E8	Nó Interno	Misto	Estático (M^+ / M^-)
E9	Nó Externo	Metálico	Cíclico
E10	Nó Externo	Misto	Cíclico
E11	Nó Interno	Metálico	Cíclico
E12	Nó Interno	Misto	Cíclico

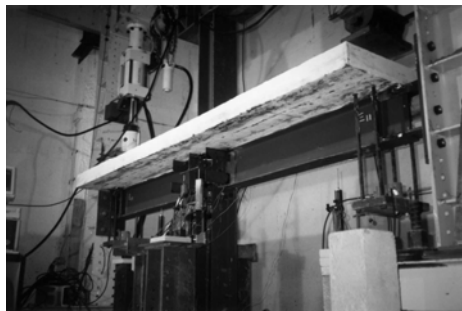
■ Modelos Laboratoriais



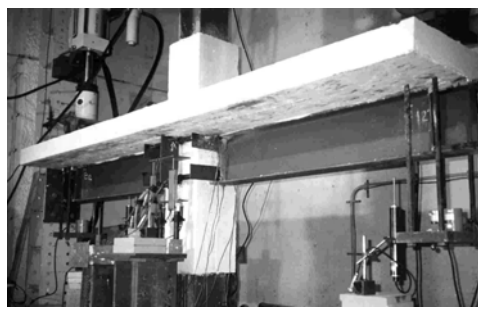
Nó externo, pilar metálico (E3, E4 e E9)



Nó externo, pilar misto (E5, E6 e E10)



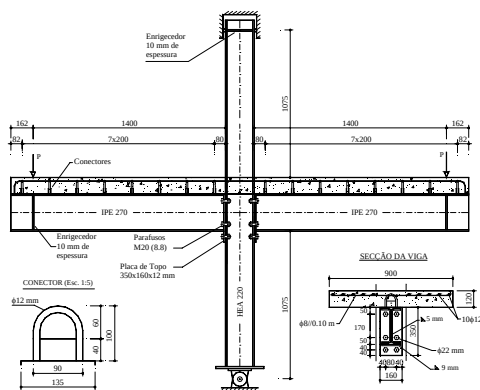
Nó interno, pilar metálico (E1, E2 e E11)



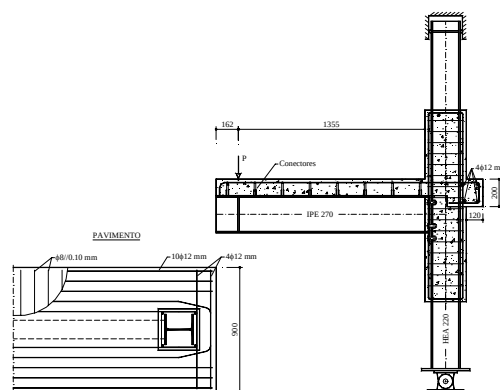
Nó interno, pilar misto (E7, E8 e E12)

□ DEFINIÇÃO GEOMÉTRICA

- Viga Mista - IPE 270, ligado por meio de 8 conectores a um pavimento em concreto, com uma armadura longitudinal constituída por 10 barras $\phi 12$ mm;
- Pilar - HEA 220, envolvido em concreto no caso do pilar misto;
- Ligação Metálica - Placa de extremidade aparafusada ao pilar (6M20);
- Esforços nas Ligações - Aplicação de cargas verticais a uma distância de 1,40 m.



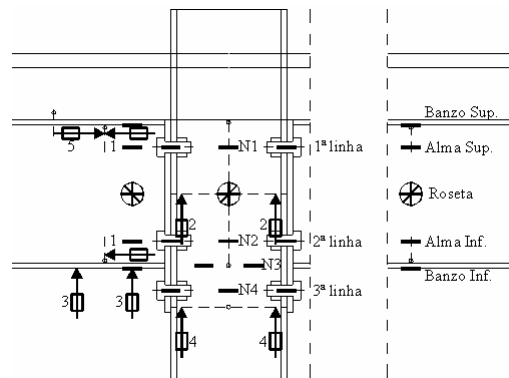
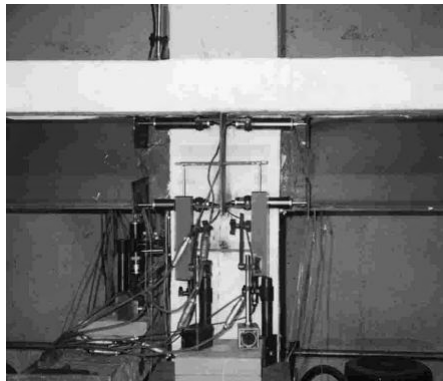
Ensaios E1, E2 e E11



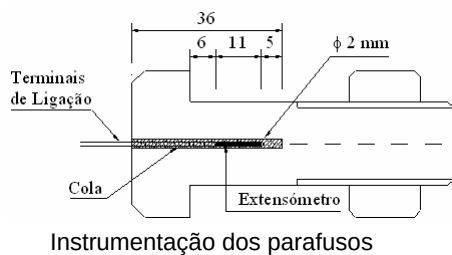
Ensaios E5, E6 e E10

□ INSTRUMENTAÇÃO DOS MODELOS

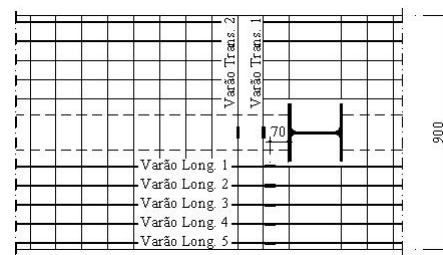
- **Equipamento laboratorial:** Transdutores de deslocamentos (LVDT's); Extensômetros lineares; Rosetas; Células de carga; Inclínômetros manuais; Sistema de aquisição de dados TDS601-TML.



Pormenorização da instrumentação na zona do nó



Instrumentação dos parafusos

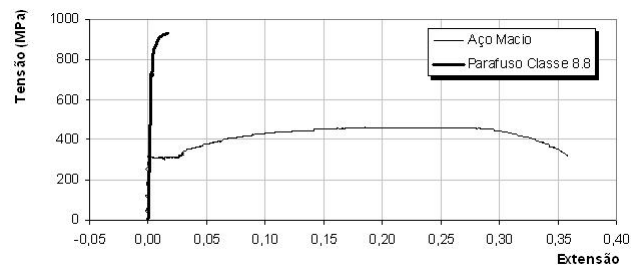


Instrumentação das armaduras do pavimento

□ CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

MATERIAIS

- Aço S235 - perfis metálicos;
- Aço Classe 8.8 - parafusos;
- Aço A400 NR - armaduras;
- concreto C35/45 - pavimento e pilar.



Curva tensão-deformação dos aços utilizados em perfis e parafusos

Testes do aço – EN 10002, EN 10020 e EN 10025

	Elemento		Tensão de Cedência (MPa)	Tensão Última (MPa)	Extensão Última (%)	Extensão na Rotura (%)	Módulo de Elasticidade (MPa)
Lote 1	Víga	Alma	306	439	23.9	31.8	198
	IPE270	Banzo	267	415	24.4	36.1	203
	Pilar	Alma	328	476	22.1	31.5	198
	HEA220	Banzo	303	459	20.6	34.5	211
	Placa Topo		283	437	23.7	31.0	206
	Parafusos		-	939	-	-	219
Lote 2	Víga	Alma	345	508	21.3	31.8	203
	IPE270	Banzo	311	493	20.9	34.9	208
	Pilar	Alma	495	589	17.5	25.6	204
	HEA220	Banzo	479	578	13.9	21.2	213
	Placa Topo		304	460	23.7	36.6	217
	Parafusos		-	1008	-	-	209
Conectores			376	645	17.1	33.3	175
Varão ϕ 12mm			541	639	15.0	25.6	205
Varão ϕ 8 mm			513	600	16.4	23.2	212
Varão ϕ 6 mm			470	614	13.6	17.6	208

Nota: O aço dos pilares do Lote 2 (perfis HEA 220) é diferente do aço dos restantes elementos.

Testes do concreto (ensaio E1 a E8) - ENV 206

		Densidade			Tensão de Rotura (MPa)			Módulo de Elasticidade (GPa)
		Condições normalizadas		Condições do modelo	Condições normalizadas		Condições do modelo	
Ensaio (Idade)	Provete	14 dias	28 dias	Dia do Ensaio	14 dias	28 dias	Dia do Ensaio	Dia do Ensaio (Exp./EC2)
E1	Cúbico	2.43	2.42	2.39	30.47	35.78	34.23	___ / 31.3
(23 dias)	Cilíndrico			2.32			27.65	
E2	Cúbico	2.46	2.50	2.46	43.78	46.52	41.83	___ / 31.9
(16 dias)	Cilíndrico			2.36			29.98	
E3	Cúbico	2.50	2.51	2.46	53.73	56.85	48.62	___ / 34.3
(16 dias)	Cilíndrico			2.37			39.00	
E4	Cúbico	2.50	2.50	2.49	44.15	45.26	43.82	___ / 33.2
(15 dias)	Cilíndrico			2.35			34.51	
E5	Cúbico	2.46	2.45	2.43	32.26	42.22	38.51	27.4 / 31.6
(16 dias)	Cilíndrico			2.37			28.90	
E6	Cúbico	2.44	2.47	2.44	34.40	35.68	34.37	27.3 / 31.3
(15 dias)	Cilíndrico			2.31			27.76	
E7	Cúbico	2.50	2.50	2.47	35.77	40.81	41.26	23.8 / 31.8
(34 dias)	Cilíndrico			2.35			29.57	
E8	Cúbico	2.48	2.50	2.47	40.60	46.44	41.90	25.5 / 32.6
(15 dias)	Cilíndrico			2.33			32.31	

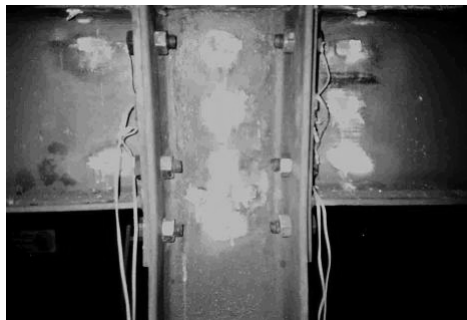
□ ANÁLISE DOS ENSAIOS ESTÁTICOS

PRINCIPAIS MODOS DE ROTURA - Ligações em Nó Interno

Ensaio E1 - Instabilidade local da alma do pilar ao nível da mesa inferior das vigas.

Ensaio E7 - Plastificação da armadura longitudinal do pavimento em tração;

- Plastificação por compressão da mesa inferior e alma das vigas.



E1 (Pilar Metálico, M-/M-)



E7 (Pilar Misto, M-/M-)

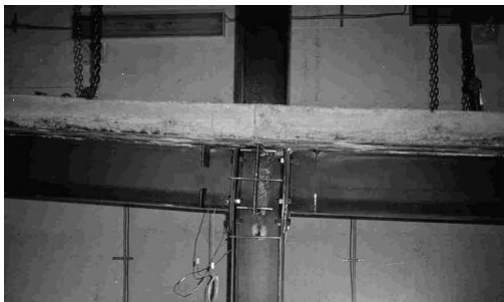
Ensaio E2 - Corte horizontal no painel da alma do pilar.

Ensaio E8 - Corte horizontal no painel da alma do pilar;

- Plastificação da armadura longitudinal do pavimento (Momento -);

- Plastificação por compressão da mesa inferior da viga (Momento -);

- Esmagamento do concreto na interface pavimento-pilar (Momento +).

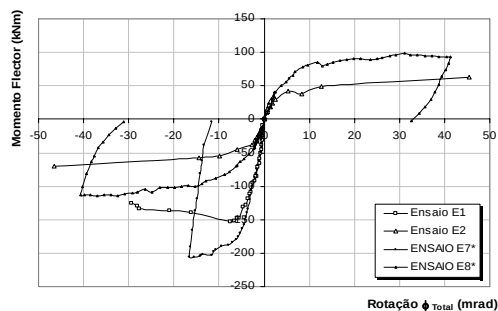


E2 (Pilar Metálico, M+/M-)



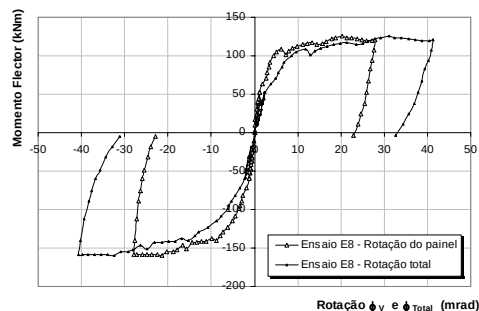
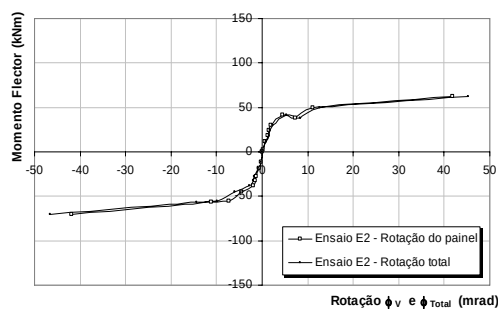
E8 (Pilar Misto, M+/M-)

Resultados dos Ensaios em Nó Interno (Curvas M- ϕ)



Efeito do concreto Armado no Pilar

Ensaio E1 (Pilar Metálico)	Rigidez Inicial $\uparrow$ 30 % Resistência $\uparrow$ 34 %	Ensaio E7 (Pilar Misto)
Ensaio E2 (Pilar Metálico)	Rigidez Inicial $\uparrow$ 55 % (M+) $\uparrow$ 58 % (M-) Resistência $\uparrow$ 56 % (M+) $\uparrow$ 63 % (M-)	Ensaio E8 (Pilar Misto)
Ensaio E2	— $\phi_v = 90 \% \times \phi_{Total}$	
Ensaio E8	— $\phi_v = 65 \% \times \phi_{Total}$	



PRINCIPAIS MODOS DE ROTURA - Ligações em Nó Externo

Ensaio E3 - Corte horizontal no painel da alma do pilar.

Ensaio E4 - Corte horizontal no painel da alma do pilar.

Ensaio E5 - Plastificação da armadura longitudinal do pavimento em tração;

- Plastificação por compressão da mesa inferior e alma da viga.

Ensaio E6 - Flexão da placa de extremidade e da mesa do pilar, na zona de tração.

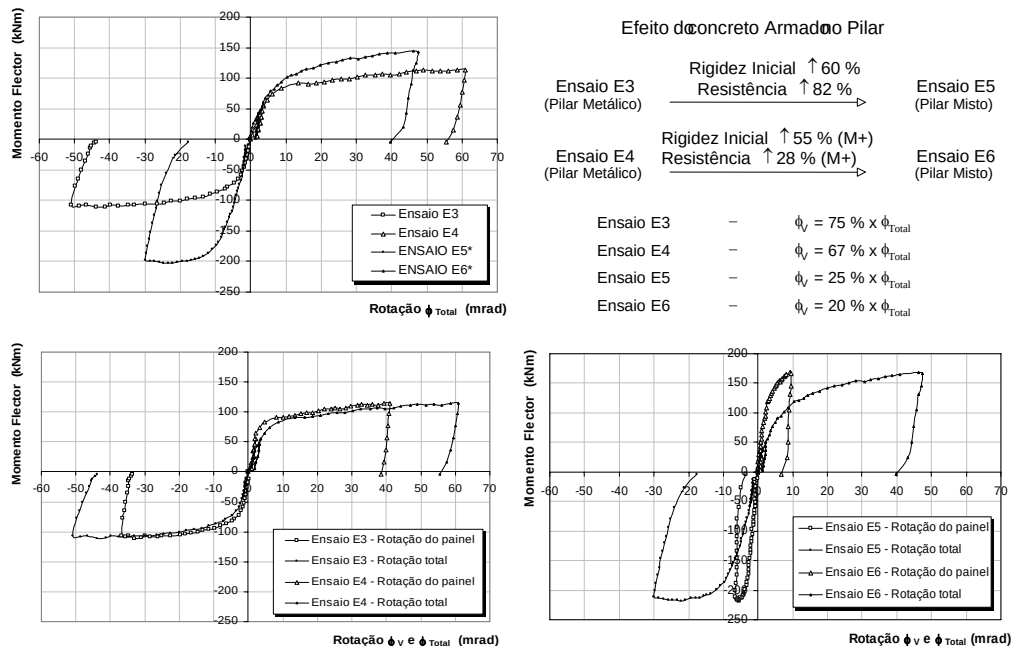


E3 (Pilar Metálico, M-)



E5 (Pilar Misto, M-)

Resultados dos Ensaios em Nó Externo (Curvas M- ϕ)



□ APLICABILIDADE E CALIBRAÇÃO DE MODELOS ANALÍTICOS (COMPORTAMENTO ESTÁTICO)

Momento Resistente Analítico ($M_{j,Rd}^{anal}$) / Experimental ($M_{j,Rd}^{exp}$)

Ensaio		E1	E2	E7	E8	E3	E4	E5	E6
$M_{j,Rd}^{anal} / M_{j,Rd}^{exp}$	Positivo		1.04		0.99		1.13		0.92
	Negativo	0.92	1.03	1.00	1.05	0.98		1.01	

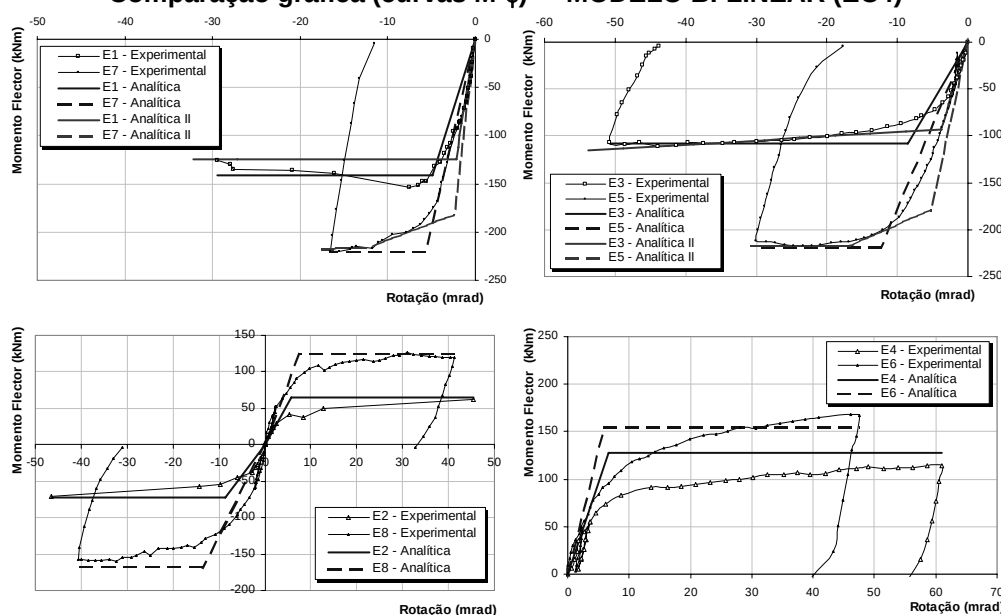
- Boa correlação em quase todas as ligações ensaiadas ($M_{j,Rd}^{anal} / M_{j,Rd}^{exp} \leq 1.0$);
- A sobreavaliação máxima foi de 13%, verificada na ligação do ensaio E4 (M+).

Rigidez Inicial Analítica ($S_{j,ini}^{anal}$) / Experimental ($S_{j,ini}^{exp}$)

Ensaio		E1	E2	E7	E8	E3	E4	E5	E6
$S_{j,ini}^{anal} / S_{j,ini}^{exp}$	Positiva		1.58		1.49		1.34		1.17
	Negativa	0.92	0.98	0.94	0.91	0.94		0.82	

- Rigidez inicial (M-) - resultados analíticos muito próximos dos experimentais, mas sempre inferiores ($S_{j,ini}^{anal} / S_{j,ini}^{exp} \leq 1.0$); diferença máxima de -18% (ensaio E5);
- Rigidez inicial (M+) - verificou-se uma sobreavaliação em todos os ensaios (diferença máxima de +58% no ensaio E2), justificada pelo facto de na metodologia utilizada se ter desprezado a deformabilidade à compressão do concreto na interface pavimento-pilar.

Comparação gráfica (curvas M- ϕ) - MODELO BI-LINEAR (EC4)



Ensaio em Nó Interno

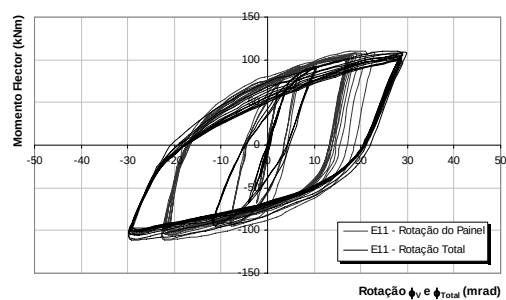
Ensaio em Nó Externo

□ ANÁLISE DOS ENSAIOS CÍCLICOS

- Metodologia proposta pelo ECCS:
 - 4 ciclos em regime elástico;
 - Séries de 3 ciclos de amplitudes crescentes em regime plástico.

ENSAIO E11 - Nó Interno com Pilar Metálico

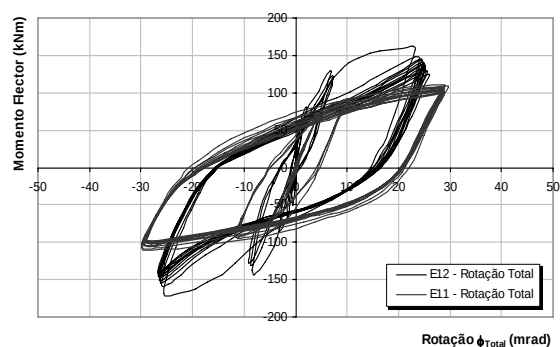
COMPONENTE MAIS INFLUENTE - Paineis da alma do pilar ao corte, caracterizada por uma reduzida degradação das propriedades das ligações.



ENSAIO E12 - Nó Interno com Pilar Misto

COMPONENTE MAIS INFLUENTE - Paineis da alma do pilar ao corte, embora com uma contribuição menor do que a verificada no ensaio E11, devido ao reforço provocado pelo concreto.

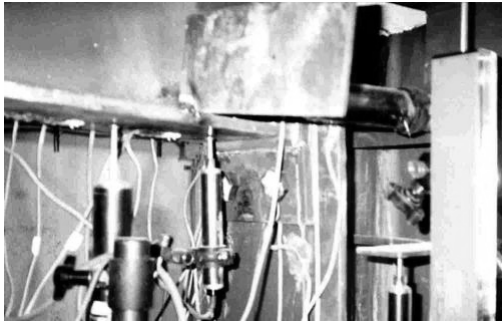
O decréscimo de momento fletor verificado a seguir aos primeiros ciclos de amplitude máxima deveu-se à fissuração do concreto, especialmente no pilar; no final do ensaio, o comportamento aproximou-se do verificado no ensaio E11.



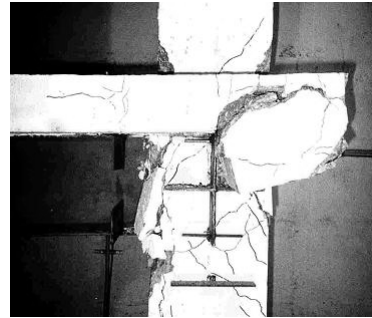
ENSAIOS E9 e E10 - Nó Externo

COMPONENTES MAIS INFLUENTES

- Painel da alma do pilar ao corte;
- Placa de topo (rompeu) e mesa do pilar em flexão ao nível do banzo inferior da viga e esmagamento do concreto na interface pavimento-pilar (M +);
- Fissuração do concreto no pavimento na zona de ancoragem da armadura longitudinal (M -).



E9 (Pilar Metálico)



E10 (Pilar Misto)