

APLICAÇÃO DO MÉTODO DAS COMPONENTES A CARREGAMENTOS CÍCLICOS

João Pedro Santos^a, Luís Calado^b

^a *Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Departamento de Estruturas, Lisboa*

^b *Instituto Superior Técnico, Departamento de Engenharia Civil e Arquitectura, Lisboa*

Resumo. A crescente utilização de ligações semi-rígidas e o aparecimento dos Eurocódigos motivaram o estabelecimento do Método das Componentes como principal método de análise de ligações metálicas e mistas. Este método mecânico permite caracterizar o comportamento de ligações sujeitas a carregamentos estáticos no entanto pouco se sabe sobre a sua aplicação a carregamentos cíclicos. O trabalho que se apresenta consiste num estudo do desempenho deste método em situações de carregamentos cíclicos. Para tal são analisados os resultados do Método das Componentes e de ensaios experimentais, estáticos e cíclicos quase estáticos, a diversos modelos de ligações viga-coluna. Além das conclusões sobre a capacidade de caracterização do comportamento cíclico de ligações são também definidos parâmetros de ajuste deste método a carregamentos cíclicos aplicados a ligações metálicas e mistas.

1 Introdução

No passado as ligações metálicas e mistas eram tidas como infinitamente rígidas ou rotuladas. A pormenorização deste tipo de ligações seguia o objectivo de conseguir transmitir o maior ou o menor momento possível (respectivamente, ligações rígidas e rotuladas) sem a ocorrência de rotura.

Com a chegada das “novas” ligações semi-rígidas, os sectores da construção metálica e mista sofreram alterações devido às novas possibilidades de optimização deste tipo de estruturas. Diversos trabalhos de investigação foram realizados para definir modelos matemáticos e físicos de descrição do comportamento de ligações semi-rígidas aplicáveis ao dimensionamento e verificação de segurança. De entre estes destacam-se os modelos de molas, também apelidados de modelos mecânicos [1][2]. A adopção de um destes modelos como metodologia de análise de ligações dos Eurocódigos Estruturais [3][4] - o Método das Componentes - impulsionou diversos trabalhos de investigação com o objectivo de cobrir situações omitidas pelos Eurocódigos, nomeadamente situações em que as vigas estão sujeitas a flexão composta [5][6], pós-cedência e exigências de ductilidade [7] e situações de actuação de elevadas temperaturas [8][9]. No que diz respeito a situações de carregamentos cíclicos alguns modelos

mecânicos, de difícil aplicação prática [10], foram realizados com o intuito de descrever o comportamento dinâmico de ligações metálicas e mistas.

O trabalho que se apresenta foi desenvolvido no âmbito de [11] e consiste num estudo do desempenho do Método das Componentes, tal como se encontra estipulado nos Eurocódigos, [3][4], para situações de carregamento cíclico. Para tal são estudados, na secção 2, resultados de 8 ensaios experimentais, estáticos e cíclicos quase estáticos, em modelos de ligações metálicas e mistas, viga-coluna, soldadas e com cantoneiras. O comportamento destas ligações é caracterizado, na secção 3 deste trabalho, através do Método das Componentes. Os resultados obtidos nesta secção são analisados e comparados com os experimentais na secção 4. Nesta definem-se também parâmetros que permitem a caracterização do comportamento cíclico de ligações e os critérios usados para a sua determinação. Na secção 5 retiram-se as principais conclusões obtidas do trabalho realizado.

2 Ensaios experimentais

2.1 Descrição e enquadramento

No âmbito do trabalho que se apresenta foram estudados os resultados de ensaios experimentais realizados no LERM – Laboratório de Estruturas e Resistência dos Materiais do Instituto Superior Técnico. Parte destes ensaios pertenceram ao programa experimental realizado no âmbito do Projecto Europeu RECOS – *Reliability of moment resistant connections of steel building frames in seismic areas*, em 1999 e 2000.

Os modelos ensaiados consistem em ligações viga-pilar, metálicas e mistas construídos à escala 1:1. O perfil utilizado para a coluna é, em todos os modelos, um HEB 200 enquanto que a viga um IPE 300. As tipologias de ligações usadas, apresentadas na “Fig. 1”, são duas: ligações viga-coluna soldadas e ligações viga-coluna com cantoneiras de topo, assento e alma. Quatro destas são metálicas e as restantes mistas sendo que duas delas constituídas por pilar metálico e viga mista e as outras por pilar e viga mistos.

Os modelos WW-S1 e TSW-S1 foram sujeitos a ensaios estáticos monotónicos e os restantes a ensaios cíclicos de acordo com *Short Testing Procedure* do ECCS – TC13 [12].

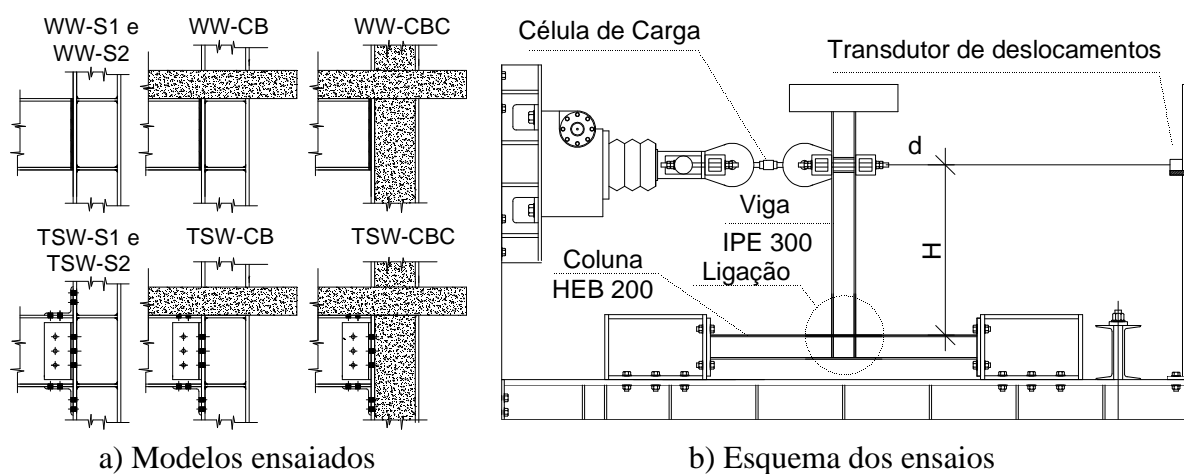


Fig. 1: Ensaios experimentais

2.2 Resultados experimentais

Os resultados dos ensaios experimentais apresentam-se, na “Fig. 2”, sob a forma de gráficos $M - d/H$ em que d é o deslocamento medido no transdutor representado e H o comprimento da viga entre a coluna e ao ponto de fixação do transdutor de deslocamentos (“Fig. 1”). O valor de M é obtido através da multiplicação do valor de força, medido na célula de carga, pelo valor de H . A razão da apresentação de resultados em gráficos de momento flector em função de d/H deve-se ao facto de, assim, estarem facilitadas as tarefas de conversão entre estes e os das curvas $M-\Phi$, obtidas do Método das Componentes [3][4].

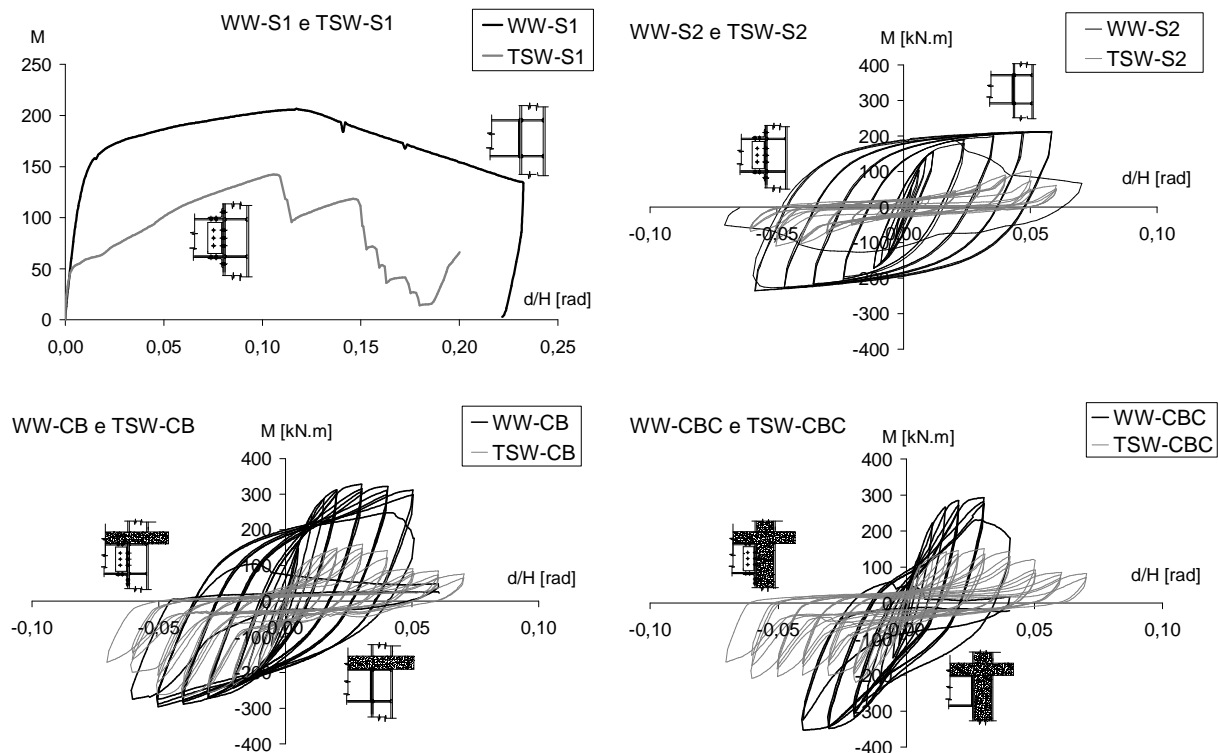


Fig. 2: Resultados dos ensaios experimentais sob a forma de gráficos $M - d/H$

2.3 Obtenção das curvas $M-d/H$ correspondentes à rotura dos modelos ensaiados

O Método das Componentes permite caracterizar o comportamento estático de ligações estruturais. Como *inputs* requer a introdução de grandezas físicas e geométricas e características do carregamento. Como *output* fornece um curva de momento flector, M , em função da rotação relativa, Φ , que pode ser bilinear ou não linear. O facto desta curva possuir um comportamento monotónico permite a comparação directa com os ensaios realizados a WW-S1 e WW-S2 mas apresenta dificuldades no que diz respeito à análise e comparação com os resultados dos restantes ensaios experimentais.

Considera-se, assim, necessária a determinação de gráficos, com comportamento monotónico, referentes aos ensaios cíclicos realizados. Esta tarefa é realizada de acordo com os trabalhos de Plumier [12] e de Calado et al. [13]. Sob a acção de cargas cíclicas a rotura não é óbvia pois esta pode ocorrer sob diversos modos e o endurecimento cíclico é significativo, provocando situações de “mistura” entre este efeito e o da rotura. Segundo Calado et al. [13] um importante critério na definição da rotura é a energia dissipada em cada ciclo realizado por uma ligação sujeita a um carregamento cíclico. Esta energia, directamente proporcional à área

sob o gráfico experimental, A_i , deve ser comparada com a de um gráfico de referência, A_{0i} , cuja determinação se pode fazer de acordo com o trabalho de Plumier [12]. De entre as curvas propostas em [12] recorre-se à curva bilinear com um endurecimento do ramo plástico de 10%. A determinação desta curva requer que seja traçada a recta da fase elástica com uma inclinação igual à inclinação do gráfico experimental no início do carregamento. A recta com inclinação de 10% deverá ser traçada de modo a que não intersecte nenhum dos ciclos realizados no ensaio experimental.

A determinação dos ciclos nos quais ocorre a rotura requer a definição de critérios. O mais importante critério usado é retirado de [13]. Este consiste em definir que o ciclo no qual ocorre a rotura de uma ligação é anterior ao primeiro ciclo no qual $A_i / A_{0i} \leq 0,5$. Além deste é necessário, para determinar os ciclos de rotura dos modelos ensaiados ciclicamente, definir critérios adicionais. Assim, a definição dos ciclos de rotura fez-se considerando os seguintes critérios adicionais:

- diminuição importante de resistência, M , entre dois ciclos consecutivos;
- diminuição importante da relação entre as áreas sob os diagramas, A_i/A_{0i} , em dois ciclos consecutivos;
- alteração importante da forma dos diagramas entre dois ciclos consecutivos.

Para uma melhor observação dos valores de $A_i / A_{0i} \leq 0,5$ recorre-se ao traçado de gráficos de barras desta relação. Identificados os ciclos correspondentes à rotura obtém-se os ramos positivos destes, como se ilustra na “Fig. 3”.

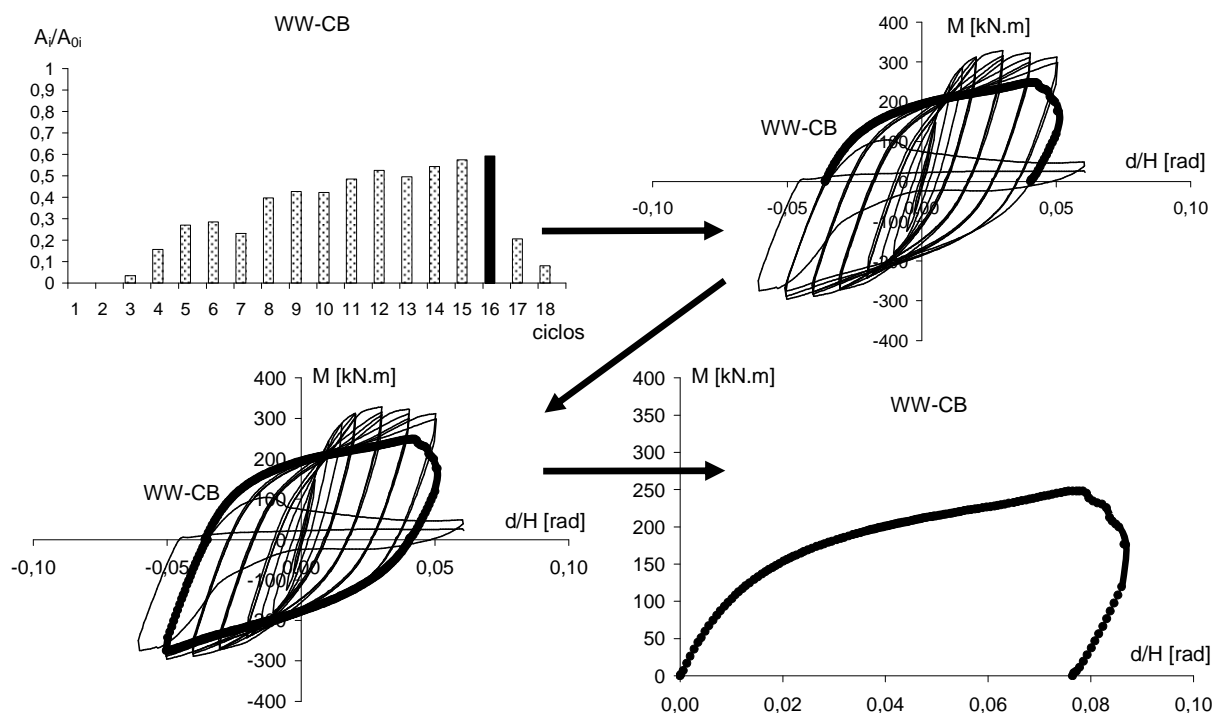


Fig. 3: Obtenção dos gráficos monotónicos correspondentes à rotura dos modelos de ligações sujeitos a ensaios cíclicos.

Estes ramos positivos constituem os gráficos monotónicos de rotura de cada um dos ensaios cíclicos estudados apresentam-se na “Fig. 4”.

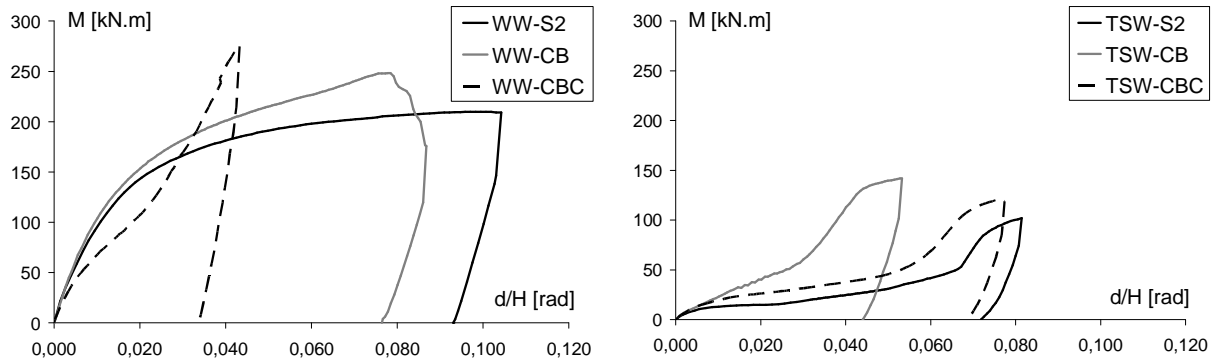


Fig. 4: Gráficos monotônicos de rotura dos modelos de ligações sujeitos a ensaios cíclicos.

3 O Método das Componentes

O Método das Componentes é, actualmente, o mais utilizado método mecânico de análise de ligações estruturais. Consiste na divisão de cada ligação em componentes e caracterização de cada uma delas separadamente. A caracterização de cada componente faz-se através de um gráfico F-d bilinear elástico perfeitamente plástico, em que F é a força aplicada à componente e d o deslocamento medido na direcção de aplicação da força. Após a caracterização de todas as componentes procede-se à sua associação, de acordo com a configuração da ligação, e à determinação do seu comportamento global através de análise elasto-plástica e modelos de associação de molas. Este comportamento é idealizado através de uma curva que pode ser, de acordo com [3][4], bilinear ou não linear. No âmbito deste trabalho foram caracterizadas ligações através de relações bilineares. Os modelos de componentes das ligações estudadas no âmbito deste trabalho apresentam-se na “Fig. 5”.

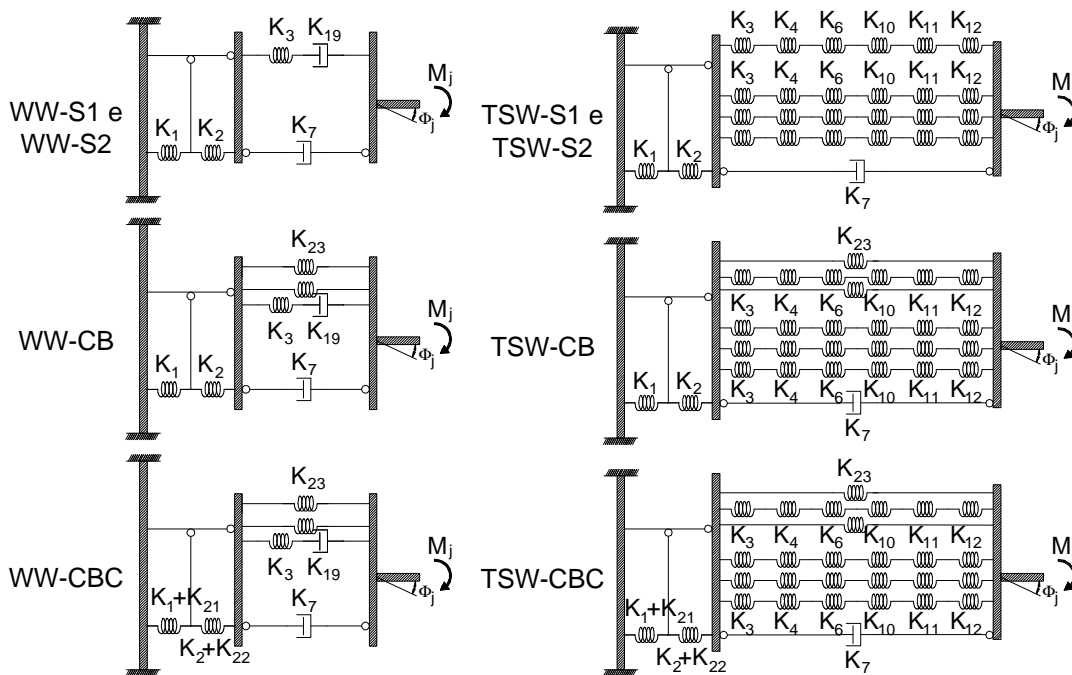


Fig. 5: Modelos de componentes das ligações soldadas.

A identificação e descrição das componentes ou as metodologias inerentes à caracterização das ligações através do Método das Componentes poderiam constituir, por si só, um trabalho de índole técnica ou científica. Estas tarefas são descritas e discutidas em [11].

Os gráficos bilineares $M - d/H$, resultantes da análise do Método das Componentes, obtêm-se através das relações $M-\Phi$, estipuladas na EN 1993-1-8 [3]. Este procedimento consiste em somar a Φ as parcelas de rotação relativas à deformação dos elementos que constituem os modelos ensaiados (pilares e vigas). As relações $M-d/H$ apresentam-se na “Fig. 6”.

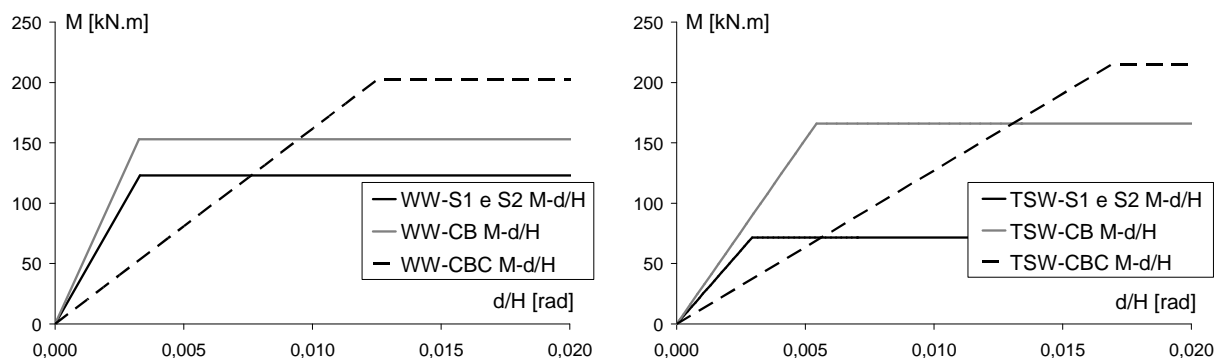


Fig. 6: Gráficos $M-d/H$ obtidos através do Método das Componentes.

4 Análise de resultados e proposta de parâmetros

4.1 Análise de resultados

De acordo com Baniotopoulos et al. [14], a resistência obtida através do Método das Componentes deverá estar próxima do início da cedência verificada num ensaio experimental monotónico. A rigidez deverá possuir um valor idêntico ao registado neste tipo de ensaios. A sobreposição dos gráficos obtidos para as ligações WW-S1 e TSW-S1 mostra (ver “Fig. 7”) que o Método das Componentes está bem calibrado para situações de carregamentos monotónicos em ligações soldadas e com cantoneiras de topo assento e alma.

Os gráficos obtidos através do Método das Componentes para os restantes modelos de ligações variam, no que diz respeito à concordância com os ensaios experimentais cíclicos. A observação da “Fig. 7” mostra que, de acordo com os ensaios estudados, a rigidez é sobrestimada pelo Método das Componentes, quer para as ligações soldadas quer para as ligações com cantoneiras. No que diz respeito à resistência os resultados e as conclusões variam com o tipo de ligação. Nas soldadas o Método das Componentes fornece valores de resistência inferiores aos valores máximos dos ensaios experimentais mas com uma diferença menor do que nos ensaios monotónicos. No caso das ligações com cantoneiras, e de acordo com os ensaios estudados, o Método das Componentes sobrestima a resistência das mesmas. Este facto torna-se especialmente notório quando descontado o efeito do *Pinching*.

4.2 Definição de critérios e proposta de parâmetros

A aparente falta de capacidade de estimar correctamente os dois parâmetros que caracterizam as ligações, M_{Rd} e S_j , motiva a idealização do comportamento cíclico de ligações e a definição de parâmetros que, aplicados ao *output* do Método das Componentes, lhe concedam capacidade de reproduzir esta idealização.

A definição destes parâmetros requer um esforço significativo na definição de critérios independentes dos resultados experimentais estudados no âmbito deste trabalho. Definem-se, assim, critérios que dependam de regras constantes nos Eurocódigos [3][4] e do comportamento intrínseco de cada tipo de ligação.

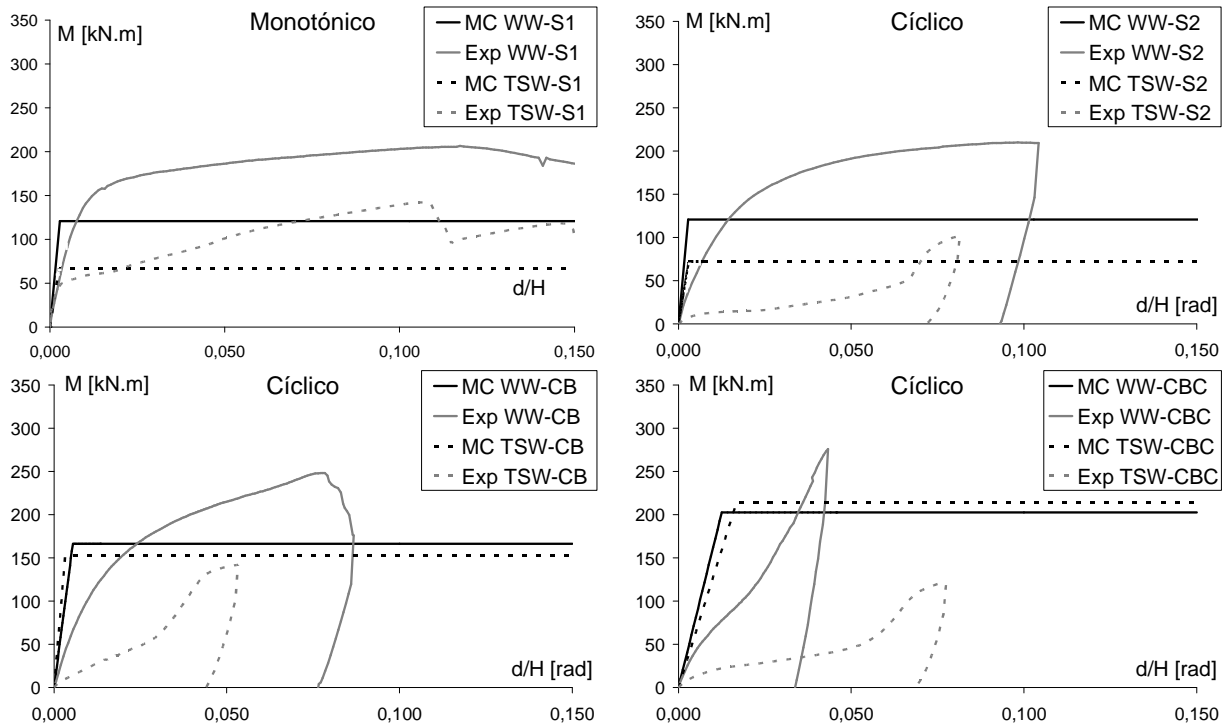


Fig. 7: Gráficos M-d/H dos modelos sujeitos a ensaios cíclicos.

Cada um dos critérios definidos estabelece um valor, de M ou de d/H. A este valor faz-se corresponder um ponto do gráfico obtido no ensaio cíclico da respectiva ligação. A idealização do comportamento dinâmico das ligações define-se como um gráfico bilinear com patamar plástico horizontal no qual o ponto definido determina a intersecção entre o comportamento elástico linear e o comportamento plástico sem endurecimento.

Definem-se como parâmetros de ajuste do Método das Componentes a comportamento dinâmico dois factores, f_M e f_S , que multiplicados, respectivamente, pela resistência, $M_{j,Rd}$, e pela rigidez inicial da ligação, $S_{j,ini}$, permitem obter as mesmas grandezas relativas a comportamento dinâmico das ligações, respectivamente, $M_{j,Rd,din}$ e $S_{j,ini,din}$.

Para a obtenção dos factores referidos foram definidos três critérios: o critério da rotação (critério 1), critério da variação da resistência (critério 2) e o critério dos múltiplos da flecha regulamentar (critério 3).

O primeiro divide-se em dois subcritérios:

- Critério da ductilidade mínima exigida a ligações soldadas: no qual se define um valor de d/H através do valor de Φ estipulado pela expressão (6.33) da EN 1993-1-8 [3];
- Critério da rotação máxima anterior à ocorrência de *pinching*: no qual a definição de d/H e de M se fazem directamente num gráfico M-d/H.

O critério da variação da resistência (critério 2) é aplicável aos dois tipos de ligações e consiste em garantir que o acréscimo de resistência verificado em ensaio monotónico, em relação ao Método das Componentes, se verifica, também, em relação aos ensaios cíclicos. A obtenção do valor de $M_{j,Rd,din}$, requer, assim, a realização de um ensaio monotónico realizado à

ligação em estudo. No âmbito do trabalho desenvolvido considerou-se que a variação de resistência é idêntica em ligações do mesmo tipo.

O terceiro critério idealiza o comportamento cíclico das ligações baseando-se em valores de d/H correspondentes a múltiplos da flecha regulamentar. No âmbito deste trabalho recorre-se aos valores referentes a vigas simplesmente apoiadas ($L/200$) e correspondentes aos múltiplos de $\delta_{MÁX}$ a $4 \delta_{MÁX}$.

Na “Fig. 8” podem ser observadas as idealizações do comportamento cíclico de ligações obtidas através de cada um dos critérios e para cada uma das ligações estudadas sujeitas a ensaios cíclicos. O critério que se considera possuir melhor desempenho e maior consistência é o 2: critério da variação da resistência. Considera-se também que, com um incremento na quantidade de ensaios monotónicos e cíclicos realizados às mesmas ligações, venha a ser possível determinar, segundo este critério, valores adequados de ajuste do Método das Componentes a situações de carregamento cíclico.

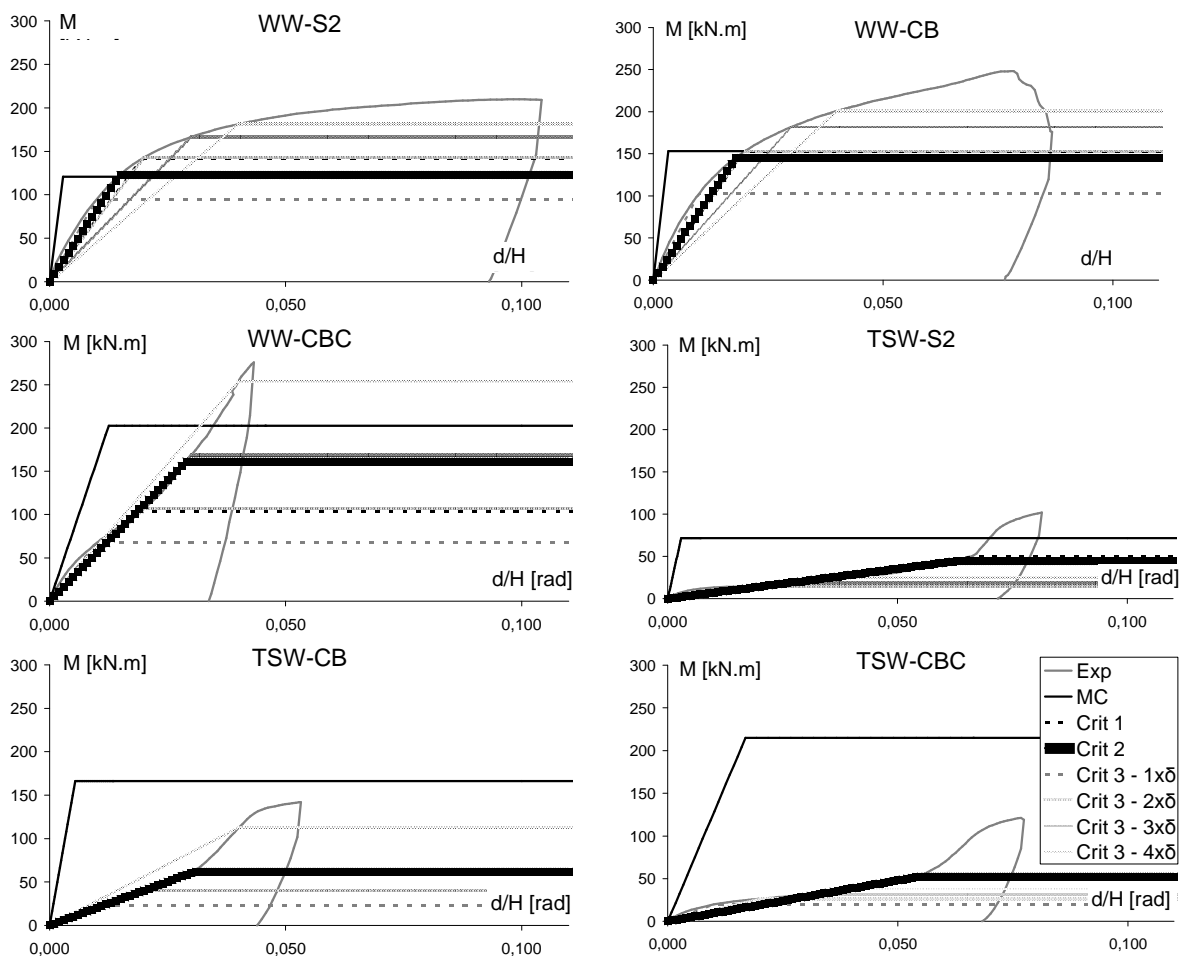


Fig. 8: Caracterização do comportamento cíclico das ligações através do Método das Componentes

Uma observação atenta dos gráficos de caracterização do comportamento cíclico (“Fig. 8”) permite, por si só, concluir que o Método das Componentes aparenta não estar ajustado à caracterização do comportamento de ligações sujeitas a carregamentos cíclicos. A determinação dos parâmetros, apresentados na “Tabela 1” permite reforçar as ideias obtidas dos gráficos. A análise dos valores dos parâmetros obtidos mostra que o Método das Componentes, de acordo com o trabalho realizado e os ensaios de laboratório estudados, sobrestima a resistência e a rigidez de ligações sujeitas a carregamentos cíclicos.

Tabela 1: Parâmetros de ajuste para ligações soldadas e com cantoneiras.

Critérios	f_M			f_S			
	Soldadas	WW-S2	WW-CB	WW-CBC	WW-S2	WW-CB	WW-CBC
1	1,171	1,000	0,513	0,086	0,073	0,249	
2	1,017	0,948	0,796	0,101	0,078	0,259	
3	1 x $\delta_{m\acute{a}x}$	0,785	0,672	0,416	0,120	0,104	0,320
	2 x $\delta_{m\acute{a}x}$	1,185	1,002	0,528	0,084	0,073	0,247
	3 x $\delta_{m\acute{a}x}$	1,379	1,187	0,834	0,063	0,055	0,261
	4 x $\delta_{m\acute{a}x}$	1,502	1,313	1,254	0,050	0,045	0,300
Cantoneiras	TSW-S2	TSW-CB	TSW-CBC	TSW-S2	TSW-CB	TSW-CBC	
1	0,690	0,364	0,237	0,011	0,024	0,054	
2	0,618	0,371	0,245	0,010	0,025	0,057	
3	1 x $\delta_{m\acute{a}x}$	0,183	0,138	0,156	0,019	0,029	0,119
	2 x $\delta_{m\acute{a}x}$	0,210	0,242	0,123	0,011	0,025	0,078
	3 x $\delta_{m\acute{a}x}$	0,266	0,364	0,148	0,009	0,025	0,062
	4 x $\delta_{m\acute{a}x}$	0,346	0,677	0,175	0,009	0,036	0,055

A sobrestimação da resistência varia, segundo o critério com melhor desempenho, entre 0% e 25% para ligações soldadas e entre 60% a 400% para ligações com cantoneiras e aparenta aumentar com o acréscimo de betão armado e decréscimo de reforços na ligação.

No que diz respeito à rigidez, o Método das Componentes, segundo o critério 2 e de acordo com os resultados experimentais estudados, sobrestima a rigidez de ligações soldadas entre 4 e 10 e de ligações com cantoneiras entre 17 a 100 vezes.

Os resultados e os ensaios experimentais estudados levantam algumas questões sobre a aplicação do Método das Componentes na caracterização do comportamento de ligações metálicas e mistas, soldadas e com cantoneiras, sujeitas a carregamentos cíclicos. Os valores de resistência obtidos podem levar a falhas na segurança estrutural e os de rigidez a distribuições de esforços inesperadas por parte dos projectistas.

Os parâmetros obtidos permitem concluir que poderá ser possível aplicar ao Método das Componentes, tal como este se apresenta na regulamentação [3][4], parâmetros correctivos que permitam caracterizar a resistência de ligações sujeitas a carregamentos cíclicos. Estes parâmetros poderão consistir nos factores f_M , determinados neste trabalho. No que diz respeito à rigidez os valores obtidos evidenciam diferenças significativas que sugerem que o método, tal como existe, pode não ser adequado à caracterização desta grandeza.

5 Conclusões

O trabalho desenvolvido permite obter as seguintes conclusões:

1. O Método das Componentes aparenta não idealizar correctamente o comportamento das ligações estudadas quando sujeitas a carregamentos cíclicos.
2. Em situações de carregamento cíclico, a diferença entre a rigidez obtida através dos ensaios experimentais cíclicos e do Método das Componentes, sugere que este método, tal como se encontra estipulado na actual regulamentação europeia, pode não ser adequado à caracterização desta grandeza.
3. Para o mesmo tipo de carregamento, a caracterização da resistência por parte do Método das Componentes e de acordo com os ensaios cíclicos estudados, pode levar a situações de insegurança estrutural. As diferenças entre os valores obtidos podem ser corrigidos por meio de factores como os que se determinam no presente trabalho.

4. A diferença entre os valores obtidos através do Método das Componentes e dos ensaios experimentais cíclicos aparenta aumentar com o acréscimo de betão armado e decréscimo de reforços na ligação.

Referências

- [1] Jaspart, J., “General Report: Session on Connections”, *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 55, pgs. 69-89, 2000.
- [2] Aribert, J., Lachal, A., “Experimental Investigation of Composite Connections and Global Interpretation”. COST C1 – Semi-Rigid Behaviour of Civil Engineering Structural Connections, Proceedings of the First State of the Art Workshop, Strasbourg, pgs. 158-169, 1992.
- [3] EN 1993-1-8: 2005, “Design of steel structures – Part 1-8: Design of joints”, CEN – Comité Européu de Normalização.
- [4] EN 1994-1-1: 2004: “Design of composite steel and concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings”, CEN – Comité Européu de Normalização.
- [5] Silva, L., Lima, L., Vellasco, P., Andrade, S., “Experimental and Numerical Assessment of Beam-to-Column Joints Under Bending and Axial Force”, Proceedings of the First International Conference on Steel & Composite Structures, pgs. 715-730, 2001, Coreia.
- [6] Cerfontaine, F., Jaspart, J., “Analytical study of the interaction between bending and axial force in bolted joints”, Eurosteel, Proceedings of the 3rd European Conference on Steel, pgs. 997 – 1016, 2002, Coimbra, Portugal.
- [7] Silva, L., Coelho, A., “A ductility model for steel connections”, *Journal of constructional Steel Research*, Vol. 57, pgs. 45-70, 2001.
- [8] Silva, L., Santiago, A., Real, P., “A component model for the behaviour of steel at elevated temperatures”, *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 57, pg. 1169-1195, 2001.
- [9] Silva, L., Santiago, A., Real, P., “Behaviour of steel joints under fire loading”, *Steel and Composite Structures*, Vol. 5, No. 6, pgs. 485-514, 2005.
- [10] Rassati, G., Leon, R., Noè, S., “Component Modeling of Partially Restrained Composite Joints under Cyclic and Dynamic Loading”, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 130, No. 2, pgs. 343-351, 2004.
- [11] Santos, J., “Aplicação do Método das Componentes a Ligações Viga-Pilar, Metálicas e Mistas, sujeitas a carregamento cíclico”, Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Estruturas, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, 2008, Lisboa.
- [12] Plumier, A., “Definition of a cyclic loading testing procedure for earthquake resistance evaluation of structural elements”, ECCS – TC13 – Earthquake and RILEM – SLB 61, 1983, Liège, Bélgica.
- [13] Calado, L., Castiglioni, A. C., Barbaglia, P., Bernuzzi, C., “Procedure for the assessment of low-cycle fatigue resistance for steel connections”, COST-C1 – Control of the Semi-Rigid Behaviour of civil engineering structures connections, Proceedings of the international conference, pgs. 435-444, Liège, Bélgica, 1998.
- [14] Baniotopoulos et al., “Structural according do Eurocode 3 – Frequently Asked Questions”, CESTRUCO – Continuing Education in Structural Connections, 2003, Praga, República Checa.